

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 322, № 1, 2013

Науки о Земле

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Редакционный совет:

Чубик П.С. (председатель), д.т.н., ректор ТПУ (г. Томск)
Пестряков А.Н. (заместитель председателя),
д.х.н., проректор ТПУ по НИИ (г. Томск)
Алексеенко С.В., д.ф.-м.н.,
член-корреспондент РАН (г. Новосибирск)
Болдырев В.В., д.х.н., академик РАН (г. Новосибирск)
Боровиков Ю.С., к.т.н. (г. Томск)
Гуляев Ю.В., д.ф.-м.н., академик РАН (г. Москва)
Дамамм Ж., PhD, д.н. (Франция)
Дмитриев А.Ю., к.т.н. (г. Томск)
Долматов О.Ю., к.т.н. (г. Томск)
Ершов Ю.Л., д.ф.-м.н., академик РАН (г. Новосибирск)
Замятин А.В., к.т.н. (г. Томск)
Клименов В.А., д.т.н. (г. Томск)
Конторович А.Э., д.г.-м.н., академик РАН (г. Новосибирск)
Крёнинг М., PhD, д.н. (Германия)
Летников Ф.А., д.г.-м.н., академик РАН (г. Иркутск)
Месяц Г.А., д.ф.-м.н., академик РАН (г. Москва)
Михайленко Б.Г., д.ф.-м.н.,
академик 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., PhD, д.н. (Исландия)
Третьяков Ю.Д., д.х.н., а. РАН (г. Москва)
Турнаев В.И., д.и.н. (г. Томск)
Филлипов Г.А., д.т.н., академик РАН (г. Москва)
Чайковский Д.В., к.ф.н. (г. Томск)
Шень Джаоли, PhD, д.н. (Китай)
Яковлев А.Н., к.ф.-м.н. (г. Томск)

Редакционная коллегия:

Пестряков А.Н. (председатель, главный редактор), д.х.н.
Коробейников А.Ф. (зам. председателя), д.г.-м.н.
Глазырин А.С. (главный редактор Издательства ТПУ), к.т.н.
Могильницкий С.Б. (учёный секретарь), к.ф.-м.н.
Барышева Г.А., д.э.н.
Григорьев В.П., д.ф.-м.н.
Заворин А.С., д.т.н.
Иванчина Э.Д., д.т.н.
Ильин А.П., д.ф.-м.н.
Корниенко А.А., д.ф.н.
Лавринович В.А., д.т.н.
Погребной В.К., д.т.н.
Савичев О.Г., д.г.н.
Тузовский А.Ф., д.т.н.
Шаманин И.В., д.ф.-м.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)
Pestryakov A.N. (Deputy Chairman) D. Chem.,
pro-rector of TPU for Research and Innovation (Tomsk)
Aleksenko 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)
Gulyaev Yu.V., Phys. and Math. D. Sc., member of RAS (Moscow)
Damamme G., Phys. and Math, D. Sc. (France)
Dmitriev A.Yu., Candidate of Science (Tomsk)
Dilmatov O.Yu., Candidate of Science (Tomsk)
Ershov Yu.L., Phys. and Math. D. Sc., member of RAS (Novosibirsk)
Zamyatin A.V., Candidate of Science (Tomsk)
Klimenov V.A., D.E. (Tomsk)
Kontorovich A.E., Geol. and Mineral. D. Sc., member of RAS (Novosibirsk)
Kröning M., Dr.h.c. (Germany)
Letnikov F.A., Geol. and Mineral. D. Sc., member of RAS (Irkutsk)
Mesyats G.A., Phys. and Math. D. Sc., member of RAS (Moscow)
Mikhailenko B.G., Phys. and Math. D. Sc.,
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. (Iceland)
Tretyakov Yu.D., D. Chem., member of RAS (Moscow)
Turnaev V.I., Ph. D. (Tomsk)
Filippov G.A., D.E., member of RAS (Moscow)
Chaikovskij D.N., Candidate of Science (Tomsk)
Shen Zhaoli, Ph. D. (China)
Yakovlev A.N., Candidate of Science (Tomsk)

Editorial:

Pestryakov A.N. (Chairman, Editor in Chief), D. Chem.
Korobeinikov A.F. (Deputy Editor in Chief), Geol. and Mineral. D. Sc.
Glazyrin A.S. (Editor in Chief), Candidate of Science
Mogilnitsky S.B. (Science Secretary), Candidate of Phys. and Math. Sc.
Barysheva G.A., Ec. D.
Grigoriev V.P., Phys. and Math. D. Sc.
Zavorin A.S., D.E.
Ivanchina E.D., D.E.
Ilyin A.P., Phys. and Math. D. Sc.
Kornienko A.A., Ph. D.
Lisitzyn V.M., Phys. and Math. D. Sc.
Pogrebnoy V.K., D.E.
Savichev O.G., Geol. D. Sc.
Tuzovsky A.F., D.E.
Shamanin I.V., Phys. and Math. D. Sc.

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 2011 г. 0,210

© Tomsk Polytechnic University, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| МИНЕРАЛОГИЯ | |
| Гидрохимические процессы формирования минералов в водосодержащей среде Онуфриенок В.В. | 5 |
| ГЕОЛОГИЯ И ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ | |
| Проблемы образования гидротермальных месторождений золота. Ч. 1. Магматогенные геолого-генетические концепции Кучеренко И.В. | 11 |
| Прогнозно-поисковый комплекс для мезотермальных месторождений золота. Ч. 1. Тектонический и геодинамический критерии Кучеренко И.В. | 19 |
| ГЕОФИЗИКА | |
| Решение прямых задач гравиметрии для сферических аппроксимирующих тел. Алгоритмы Старостенко В.И., Пятаков Ю.В. | 28 |
| Решение прямых задач гравиметрии для сферических аппроксимирующих тел. Тестирование алгоритмов Старостенко В.И., Пятаков Ю.В., Исаев В.И. | 35 |
| Сейсмогеологические критерии нефтегазоносности зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений Межовского свода (Новосибирская область) Абросимова О.О., Губа А.В. | 40 |
| Влияние палеоклимата на геотермический режим и нефтегенерационный потенциал баженовской свиты (на широтах Томской области) Лобова Г.А., Осипова Е.Н., Криницына К.А., Останкова Ю.Г. | 45 |
| Геотемпературный режим баженовской свиты и нефтеперспективные зоны меловых отложений (Нюрольская мегавпадина) Осипова Е.Н., Лобова Г.А. | 51 |
| Глубинная тектоника Северо-Восточного Прибайкалья Пашевин А.М., Лаврентьева А.Е., Иванов Н.К. | 57 |
| Цифровые модели физических полей и морфоповерхностей при региональном прогнозе нефтегазоносности Устинова В.Н., Устинова И.Г., Устинов В.Г., Стариков Н.Н. | 63 |
| ГЕОХИМИЯ | |
| Вертикальная геохимическая зональность нефтегазоносных комплексов (на примере Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений) Жильцова А.А., Исаев В.И., Коржов Ю.В. | 69 |
| Металлоносность углей Ирана Рыбалко В.И., Арбузов С.И., Волостнов А.В. | 83 |
| ГЕОЛОГИЯ НЕФТИ И ГАЗА | |
| Метод материального баланса как первичный инструмент оценки показателей разработки участка месторождения при заводнении Абидов Д.Г., Камартидинов М.Р. | 91 |
| Схема индексации продуктивных песчаных пластов юры Западной Сибири на основе инверсионной циклогенеза Бейзель А.Л. | 96 |
| О возможности выделения аналогов васыуганского, георгиевского и частично баженовского горизонтов Западной Сибири в стратотипических разрезах келловейского, оксфордского и киммериджского ярусов Южной Англии Бейзель А.Л., Алифинов А.С. | 100 |
| Месторождения нефти и газа трещинно-метасоматического генезиса в доюрских отложениях Западно-Сибирской геосинеклизы Ковешников А.Е. | 105 |
| Источник поступления нефти и газа в палеозойские отложения Западно-Сибирской геосинеклизы Ковешников А.Е. | 111 |

CONTENTS

| | |
|--|-----|
| MINERALOGY | |
| Hydrochemical processes of forming minerals in water-bearing medium Onufrienok V.V. | 5 |
| GEOLOGY AND MINERALS | |
| The problems of formation of hydrothermal gold deposits. P. 1. Magmatogene geological and genetic concepts Kucherenko I.V. | 11 |
| Prognosis-search complex for mesothermal gold deposits. P. 1. Tectonic and geodynamic criteria Kucherenko I.V. | 19 |
| GEOPHYSICS | |
| Solution of the direct gravity problems for spherical approximate bodies. Algorithms Starostenko V.I., Pyatakov Yu.V. | 28 |
| Solution of the direct gravity problems for spherical approximate bodies. Algorithms testing Starostenko V.I., Pyatakov Yu.V., Isaev V.I. | 35 |
| Seismic criteria for petroleum potential of reservoirs at the Paleozoic-Mesozoic boundary of Mezhovka arch (Novosibirsk region) Abrosimova O.O., Guba A.V. | 40 |
| The effect of paleoclimate on geometry mode and oil generation potential of Bazhenov formation (at Tomsk region latitudes) Lobova G.A., Osipova E.N., Krinitsyna K.A., Ostantkova Yu.G. | 45 |
| Geotemperature mode of Bazhenov formation and oil-bearing areas of cretaceous deposits (Nyurolsky megahollow) Osipova E.N., Lobova G.A. | 51 |
| Deep tectonics of north-east Baikal region Pashevina A.M., Lavrentieva A.E., Ivanov N.K. | 57 |
| Digital models of physical fields and morphosurfaces at regional prediction of oil-and-gas content Ustinova V.N., Ustinova I.G., Ustinov V.G., Starikov N.N. | 63 |
| GEOCHEMISTRY | |
| Vertical geochemical zonality of oil-and-gas complex (by the example of Rogozhnikovsky and Severo-Rogozhnikovsky fields) Zhiltsova A.A., Isaev V.I., Korzhov Yu.V. | 69 |
| Iran coal metal-bearing Rybalko V.I., Arbuzov S.I., Volostnov A.V. | 83 |
| OIL AND GAZ GEOLOGY | |
| The method of material balance as a primary tool for estimating the indices of field area development at flooding Abidov D.G., Kamartdinov M.R. | 91 |
| The chart of indexing the productive sand layers of Jurassic in Western Siberia on the basis of cyclogenesis inversion model Beyzel A.L. | 96 |
| The possibility of determining the analogues of Vasyugan, Georgiev and partially Bazhenov zones of Western Siberia in stratotypical sections of Callovian, Oxfordian and Kimmeridgian stages of Southern England Beyzel A.L., Alifirov A.S. | 100 |
| Oil-and-gas fields of fractured-metasomatic genesis in pre-Jurassic deposits of Western-Siberian geosineclise Koveshnikov A.E. | 105 |
| The source of oil and gas delivery into Paleozoic deposits of Western-Siberian geosineclise Koveshnikov A.E. | 111 |

| | | |
|---|-----|---|
| Оценка извлекаемых запасов газовых и газоконденсатных месторождений на основе метода интегрированных моделей Журавский В.В., Сергеев В.Л. | 116 | Estimation of recoverable reserves in gas and condensate fields on the basis of the integrated model method Zhuravsky V.V., Sergeev V.L. |
| Влияние барических условий на петрофизические связи для коллекторов Северо-Венинского месторождения Мезенцев Д.Н., Щемелин Ю.А., Ледовская Т.И., Войков Г.Г. | 119 | The effect of pressure conditions on petrophysical bonds for reservoirs of North-Veninsk field Mezentsev D.N., Shchemelin Yu.A., Ledovskaya T.I., Voykov G.G. |
| Оценка восстановления проницаемости терригенных коллекторов при моделировании процессов глушения Мезенцев Д.Н., Квеско Н.Г. | 122 | Estimation of permeability recovery in terrigenous reservoirs when modeling sealing processes Mezentsev D.N., Kvesko N.G. |
| Оценка проницаемостей и внутрипластового перетока в вертикально неоднородном по фильтрационно-емкостным свойствам пласте Мартынов М.Е., Квеско Б.Б., Карпова Е.Г., Квеско А.Р. | 124 | Evaluation of permeability and intrastratal cross-flow in a layer vertically inhomogeneous in porosity and permeability properties Martynov M.E., Kvesko B.B., Karpova E.G., Kvesko A.R. |
| ГИДРОГЕОЛОГИЯ | | |
| Углеводороды и кислородорганические соединения в донных отложениях озер Алтая и Хакасии Серебренникова О.В., Русских И.В., Гулая Е.В., Стрельникова Е.Б., Кадычагов П.Б. | 130 | Hydrocarbons and organic compounds of oxygen in bottom sediments of Altay and Khakassia lakes Serebrennikova O.V., Russkikh I.V., Gulaya E.V., Strelnikova E.B., Kadychagov P.B. |
| Формы миграции химических элементов в водах северной части Колывань-Томской складчатой зоны Колубаева Ю.В. | 136 | Migration patterns of chemical elements in waters of northern part of Kolyvan-Tomsk folded zone Kolubaeva Yu.V. |
| Распространенность редкоземельных элементов в природных водах Хакасии Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Леушина С.К. | 141 | Abundance of rare earth elements in natural waters of Khakassia Guseva N.V., Kopylova Yu.G., Leushina S.K. |
| ГЕОЭКОЛОГИЯ | | |
| Распределение некоторых химических элементов в снеготалой воде из районов нефтедобывающего комплекса Томской области Большунова Т.С. | 147 | Distribution of some chemical elements in snow melted water form areas of oil and gas plants of Tomsk region Bolshunova T.S. |
| Геоэкологические проблемы освоения Бакcharского железорудного месторождения методом скважинной гидродобычи Шайхиев И.Р. | 152 | Geo-ecological problems of developing Bakchar iron-ore deposit by hydraulic borehole mining Shaykhiev I.R. |
| Ситуационный анализ экологических рисков при сжигании твердотопливных зарядов энергетических установок на открытом стенде Попова М.В., Литвинов А.В., Козлов С.Н., Лушев В.П. | 157 | Case study of ecological risks when firing propulsion system solid-propellant on the open stand Popova M.V., Litvinov A.V., Kozlov S.N., Lushev V.P. |
| КАЛЕНДАРЬ ПАМЯТНЫХ ДАТ | | |
| В.И. Вернадский – ученый-энциклопедист, опередивший свое время. К 150-летию со дня рождения Рихванов Л.П. | 162 | The 150 th anniversary of birth of V.I. Vernadsky, the polymath who was far ahead of his time Rikhvanov L.P. |
| НАШИ ЮБИЛЯРЫ | | |
| Профессору И.В. Кучеренко – 75 лет | 166 | Professor I.V. Kucherenko is 75 |
| Профессору В.Г. Ворошилову – 60 лет | 158 | Professor V.G. Voroshilov is 60 |
| РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ | | |
| | 170 | SUMMARIES |
| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | | |
| | 173 | INFORMATION ABOUT AUTHORS |

Минералогия

УДК 549.322.21:548.73

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ В ВОДОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ

В.В. Онуфриенко

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

Проводились исследования особенностей гидратации парами атмосферной воды сульфидов железа с различным соотношением серы и железа, полученных методом сухого синтеза. Образцы после синтеза, по данным рентгеноструктурного анализа, не содержали соединений с кислородом, водородом и гидроксильной группой. Процесс гидратации сульфидных фаз осуществлялся путем адсорбции воды из атмосферы воздуха при температуре 293 К без вмешательства исследователей в течение 29 лет после синтеза. Рентгеноструктурный анализ фазового состава выдержанных образцов показал наличие соединений, в структуре которых содержится гидроксильная группа OH: парабутлерит – $\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{OH})2\text{H}_2\text{O}$, гетит – $\text{FeO}(\text{HO})$, сомолюнокит – $\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})$, розенит – $\text{Fe}(\text{SO}_4)4(\text{H}_2\text{O})$, ромбоклазит – $\text{FeH}(\text{SO}_4)_24(\text{H}_2\text{O})$. Эти образцы содержали первоначально сульфиды железа в метастабильном состоянии. Установлено, что узкие интервалы ряда стабильных пирротинов FeS , $\text{Fe}_{0,875}\text{S}$, $\text{Fe}_{0,905}\text{S}$, $\text{Fe}_{0,950}\text{S}$ и $\text{Fe}_{0,975}\text{S}$ не содержат фаз с гидроксильной группой. Полученные результаты исследований показывают, что гидратации подвергаются метастабильные сульфиды железа, и при адсорбции воды образуются соединения, в структуре которых содержится вода в связанном состоянии.

Ключевые слова:

Гидроксильная группа, метастабильные сульфиды железа, рентгеноструктурный анализ, фазовый состав.

Key words:

Hydroxyl group, metastable iron sulfides, X-ray analysis, phase composition.

Экспериментально не исследованы в достаточной степени процессы естественной адсорбции атмосферной воды метастабильными пирротинами и перехода их в новое фазовое состояние. Очевидно, что это очень длительный во времени процесс. Теоретические предположения на практике могут оказаться абсолютно неверными. Поэтому представляют интерес длительные во времени эксперименты, в которых наблюдалась адсорбция воды пирротинами в изотермических условиях атмосферы Земли. Свойства нестехиометрических ферримагнетиков отличаются рядом особенностей, обусловленных катионными вакансиями в структуре [1]. Катионные вакансии представляют собой активные центры, определяющие ряд неизученных пока специфических физико-химических свойств.

В настоящее время возрос интерес к соединениям, содержащим гидроксильную группу (OH) в структуре [2, 3]. Примерами таких образцов могут служить гетит $\{\text{FeO}(\text{HO})\}$, гидрониум $\{\text{Fe}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_32\text{H}_2\text{O}\}$, сомолюнокит $\{\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})\}$, парабутлерит $\{\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{OH})2\text{H}_2\text{O}\}$ и т. д. Образование этих минералов в природной среде происходит

в условиях низкотемпературного гидротермального метасоматоза и в зоне гипергенеза, особенно активно в участках сульфидных рудных тел.

Природные сульфиды железа семейства пирротина являются широко распространенными минералами, образующимися при гидротермальных процессах и подвергающимися активному преобразованию в экзогенных условиях. Характерной особенностью пирротина является его химическая и структурная неоднородность, в его кристаллической решетке содержатся катионные вакансии [4–7]. Влияние температуры, давления, концентрации вакансий на свойства нестехиометрических сульфидов железа широко исследуется [7–9], однако практически нет работ по изучению кристаллохимических фазовых переходов, обусловленных точечными дефектами в слабоактивной среде.

Цель настоящей работы – на примере синтетических метастабильных пирротинных различного химического и фазового состава исследовать особенности естественной адсорбции воды метастабильными сульфидными соединениями железа и переход их в новое фазовое состояние. Показать особенности

трансформации пирротинов в водосодержащей атмосфере в минералы, в кристаллическую структуру которых входит вода в связанном состоянии. Определить равновесные фазовые соотношения в минеральной смеси, сформировавшиеся из сульфидов железа при их длительной изотермической выдержке в атмосфере лаборатории.

Методом сухого синтеза в кварцевых ампулах в вакууме (~1 Па) при температуре 1270 К получены образцы с различным отношением серы к железу S/Fe. Полученные после синтеза образцы анализировались на дифрактометре ДРОН-3 с использованием рентгеновского излучения $\text{Co}(K_{\alpha})$. Магнитные исследования проводились на вибрационном магнитометре со сверхпроводящим соленоидом в магнитном поле напряженностью 80 А/м.

Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов после синтеза показал отсутствие в них соединений, содержащих кислород, водород и гидроксильную группу ОН. Затем образцы выдерживались при температуре 293 К в течение 29 лет и снова исследовались методами РФА на дифрактометре XRD-7000S фирмы Shimadzu с использованием рентгеновского излучения $\text{Cu}(K_{\alpha})$. Фазовый состав образцов определялся по методу, предложенному П.С. Дубининым [10]. Химический состав пирротинов определялся рентгеноспектральным методом на установке «Самбах-Мисго» в лаборатории микрозондового анализа СО РАН. Ошибка в определении S/Fe не превышала 10^{-3} .

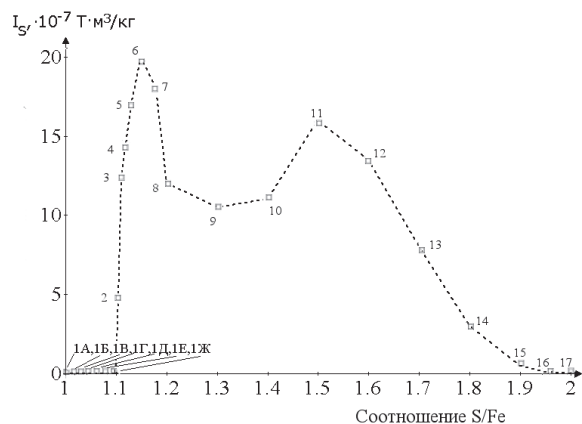


Рис. 1. Зависимость намагниченности (I_s) синтезированных сульфидов железа от отношения S/Fe (x) в образцах. (1А, 1Б, ..., 1Ж – антиферромагнитные пирротины)

На рис. 1 представлена зависимость намагниченности синтезированных образцов в поле напряженностью 80 А/м от отношения S/Fe, а фазовый состав этих образцов приведен в табл. 1. Пилообразное изменение намагниченности свидетельствует о неоднородности фазового состава образцов. Детальные результаты исследований исходных образцов, а также их фазовый состав описаны в работе [9]. РФА выдержанных образцов показал, что все образцы, состоящие первоначально из сульфидов железа в метастабильном состоянии, содержали в кристаллической структуре гидроксильную группу ОН. Распре-

деление образовавшихся в процессе 29-и летней выдержки гидроксилсодержащих фаз в образцах характеризуется неоднородностью (табл. 2, 3, рис. 2).

Таблица 1. Фазовые соотношения в образцах после синтеза на основе РФА

| Номер образца | Отношение анион/катион | Фазовый состав образцов, % | | | | |
|---------------|------------------------|--|------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| | S/Fe | $\text{Fe}_{0,875}\text{S}^{\ddagger}$ | FeS , троилит | $\text{Fe}_n\text{S}^{\#}$ | $\text{Fe}_n\text{S}^{\#}$ | FeS_2 , пирит |
| 1А | 1,00 | – | 100 | – | – | – |
| 1Б | 1,02 | – | 25 | – | 75 | – |
| 1В–1Ж | 1,04...1,09 | – | – | – | 100 [*] | – |
| 2–5 | 1,10...1,13 | – | – | – | 100 [‡] | – |
| 6 | 1,14 | 100 [‡] | – | – | – | – |
| 7 | 1,16 | 90 [‡] | – | 8 [‡] | – | 2 |
| 8 | 1,19 | 56 [‡] | – | 16 [‡] | – | 29 |
| 9 | 1,30 | 30 [‡] | – | 32 [‡] | – | 38 |
| 10 | 1,40 | 18 [‡] | – | 35 [‡] | – | 47 |
| 11 | 1,50 | – | – | 44 [‡] | – | 56 |
| 12 | 1,60 | – | – | 35 [‡] | – | 65 |
| 13 | 1,70 | – | – | 26 [‡] | – | 74 |
| 14 | 1,80 | – | – | 17 [‡] | – | 83 |
| 15 | 1,90 | – | – | 5 [‡] | – | 95 |
| 16 | 1,95 | – | – | 2 [‡] | – | 98 |
| 17 | 2,00 | – | – | – | – | 100 |

[#] – сульфиды железа с моноклинной структурой; [‡] – ферри-магнитные образцы; ^{*} – сульфиды железа с гексагональной структурой; [†] – антиферромагнитные образцы.

Установлен ряд закономерностей в фазовом составе выдержанных образцов:

1. Максимальное процентное содержание ОН достигло 10,79 % в образце S/Fe=1,48 (рис. 3). С уменьшением S/Fe содержание гидроксильной группы в образцах также уменьшалось до значения 1,7 (S/Fe=1,138), а затем возрастало до значения 3,74 % (S/Fe=1,039). При этом справа от минимума наблюдалась фаза ромбозита (S/Fe=1,157, табл. 3), а слева отмечена фаза парабутлерита (S/Fe=1,104, табл. 3).
2. Содержание сомольнокита максимально для образца с S/Fe=1,48 и составляет 56,13 % (рис. 2). Содержание этой фазы уменьшается как с увеличением S/Fe, так и с его уменьшением. Например, в табл. 3 представлены образцы различного фазового состава. Содержание сомольнокита в образце с соотношением 1,497 (S/Fe) равно 41,55 %, для соотношения 1,684 (S/Fe) содержание сомольнокита в образце составило 12,92 %, а для S/Fe=1,039–12,52 %. Более подробно образование сомольнокита из метастабильного пирротина анализируется в статье [11], а в данной работе отмечаются лишь наиболее общие закономерности. Следует также отметить, что вблизи максимума содержания ОН в образцах наблюдается фаза гидронима $\text{Fe}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})5\text{H}_2\text{O}_2$. Например, для S/Fe=1,563 содержание гидронима в образце составило 6,83 %, а для S/Fe=1,571–4,92 % (табл. 3).

- Вблизи фаз стехиометрического состава (FeS) содержание гетита максимально. Для образца S/Fe=1,039 содержание гетита составляет 11,13 % (табл. 3). При увеличении отношения S/Fe в исследуемых образцах содержание гетита экспоненциально уменьшается. Например, для образца с S/Fe=1,157 концентрация гетита составляет уже 3,29 % (табл. 3). В работе [2] представлена квантовая модель формирования гетита из метастабильного пирротина, и вычислены энергии образования и взаимодействия элементарных ячеек гетита и троилита.
- Вблизи минимума концентрации ОН в образцах с относительно высоким содержанием серы (S/Fe=1,63) наблюдается фаза розенита. Процентное содержание розенита в данном случае составляет 3,24 % (табл. 3).

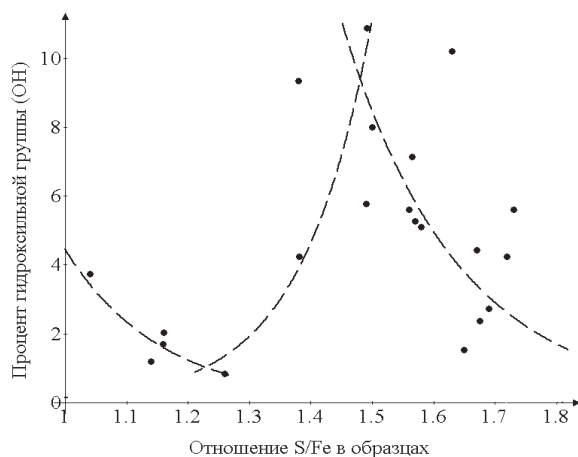


Рис. 2. Зависимость процентного содержания ОН в образцах от атомного отношения S/Fe

Зафиксированы узкие интервалы составов в серии образцов, не содержащих фаз с гидроксильной группой (табл. 1). Эти области расположены при S/Fe < 1,143 (рис. 2). К ним прежде всего относится пирротин состава Fe₇S₈ (Fe_{0,875}S). Образец данного химического состава выдержан 29 лет после синтеза в лабораторных условиях при температуре 293 К и не претерпел изменений (S/Fe=1,147 в табл. 2). При незначительном уменьшении S/Fe образцы содержат две фазы: пирротин состава Fe_{0,875}S, и пирротин состава Fe_{0,905}S (S/Fe=1,135, табл. 2). Можно предположить, что пирротин состава Fe_{0,905}S также является стабильным. Вероятно, эту фазу можно синтезировать гомогенной по составу, варьируя при синтезе содержанием серы и железа.

Отметим, что пирротин состава Fe_{0,905}S присутствует в довольно узком интервале ΔS/Fe, т. к. уже при соотношении S/Fe=1,131 он отсутствует, при этом в равновесии с Fe_{0,875}S отмечается другая стабильная фаза — троилит (табл. 2). С уменьшением S/Fe содержание троилита увеличивается, а содержание пирротина состава Fe_{0,875}S уменьшается (S/Fe=1,124, табл. 2). Для S/Fe=1,052 наблюдается практически гомогенный образец, содержащий

97,25 % пирротина состава Fe_{0,950}S. Этот образец содержит также 2,75 % сомолюнокита (S/Fe=1,108, табл. 2). Замыкают эту серию три образца с высоким содержанием троилита. В двух из них есть примесь пирротина состава Fe_{0,905}S (S/Fe=1,022) и Fe_{0,975}S (S/Fe=1,001). Фаза Fe_{0,975}S, по-видимому, также находится в стабильном состоянии, и ее можно получить в чистом виде, варьируя условиями синтеза.

Таблица 2. Фазовый состав образцов, не содержащих в структуре ОН

| Образец | Элементный состав образца | | Фазовый состав образца, % | | | | | | Сумма фаз, % |
|---------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|-----------------------|--|-----------------------|-----------------------|--------------|
| | S, % | Fe, % | Fe _{0,875} S | FeS | Fe _{0,950} S | Fe(SO ₄)(H ₂ O) | Fe _{0,905} S | Fe _{0,975} S | |
| 1,147 | 39,6 | 60,3 | 100,0 | 0,0 | — | — | — | — | 100,0 |
| 1,135 | 41,7 | 58,2 | 79,71 | 0,00 | — | — | 20,29 | — | 100,0 |
| 1,131 | 39,9 | 59,9 | 96,34 | 3,28 | — | — | — | — | 99,62 |
| 1,124 | 39,1 | 60,8 | 86,60 | 13,40 | — | — | — | — | 100,0 |
| 1,052 | 36,2 | 60,7 | — | 0,00 | 97,25 | 2,75 | — | — | 100,0 |
| 1,022 | 36,9 | 63,0 | 11,85 | 75,25 | 11,82 | — | — | — | 98,82 |
| 1,010 | 36,5 | 63,2 | 7,62 | 92,38 | — | — | — | — | 100,0 |
| 1,001 | 28,6 | 71,3 | 1,44 | 95,86 | — | — | — | 2,70 | 100,0 |

Первой особенностью всей серии образцов является то, что в ней отсутствует пирит. Второй особенностью является то, что, хотя составы FeS и Fe_{0,875}S способны формировать различные количественные фазовые соотношения, тем не менее, в интервале 1,00 < S/Fe < 1,14 возможны другие гомогенные составы.

Стабильные фазы не захватывали в кристаллическую структуру группу ОН, таким образом, не осуществлялась их гидратация и образование новых фаз. После адсорбции воды метастабильные сульфиды железа образуют соединения, в структуре которых содержится гидроксильная группа. Однако в образцах не было соединений, содержащих в структуре кислород без водорода, например, FeO, Fe(SO₄)₂, Fe₂O₃ или Fe₃O₄.

Примечательно, что в образцах, содержащих химически чистое железо и серу, выдержанных в течение 29 лет в атмосфере лаборатории, окислительных процессов железа за время эксперимента не обнаружено.

Фазовый состав образца, %: а) 98,9 чистой серы и 1,1 чистого железа; б) 75 FeS (троилит), 21,5 чистого железа — αFe, 2,16 пирротина состава Fe_{0,975}S, 1,32 пирротина состава Fe₇S₈.

На рис. 3 представлены дифрактограммы образцов, содержащие свободное железо и серу. Химически чистая мелкодисперсная сера с железом находилась в лабораторных условиях 29 лет и не проявила реакций с кислородом. Сера не вступила в реакцию и с железом, хотя шихта в процессе измельчения тщательно перемешана. Не прореагировавшее в реакции чистое железо даже через 29 лет остается неизменным при хранении в тех же условиях (рис. 3). Отметим, что условия выдержки были идентичны для всех образцов.

Таблица 3. Фазовый состав образцов, содержащих в структуре группу OH

| S/Fe | Фазовый состав образца, % | | | | | | | Сумма фаз, % |
|-------|---------------------------|-------|------|--------------------------------|------------------------------------|---|------|--------------|
| | FeS ₂ | FeOOH | FeS | Fe ₇ S ₈ | FeSO ₄ H ₂ O | Примесные фазы | | |
| 1,490 | 46,1 | 2,05 | – | 21,91 | 29,32 | – | – | 99,38 |
| 1,497 | 44,10 | 0,85 | – | 13,50 | 41,55 | – | – | 100,00 |
| 1,684 | 68,02 | 1,27 | – | 17,78 | 12,92 | – | – | 99,99 |
| 1,039 | 7,15 | 11,13 | – | 69,20 | 12,52 | – | – | 100,00 |
| 1,567 | 53,18 | 1,88 | – | 7,67 | 37,27 | – | – | 100,00 |
| 1,563 | 58,22 | 3,14 | – | 16,12 | 15,69 | Fe (SO ₄) ₂ (OH)5H ₂ O ₂ | 6,83 | 100,00 |
| 1,571 | 58,49 | 2,93 | – | 16,30 | 17,36 | Fe (SO ₄) ₂ (OH)5H ₂ O ₂ | 4,92 | 100,00 |
| 1,134 | 11,87 | 8,34 | – | 70,19 | – | Fe ₂ S ₁₁ | 9,57 | 99,97 |
| 1,740 | 67,02 | 0,4 | – | 3,73 | 28,84 | – | – | 99,99 |
| 1,630 | 54,22 | – | – | 0,84 | 41,70 | Fe (SO ₄) ₄ (H ₂ O) | 3,24 | 100,00 |
| 1,157 | 5,91 | 3,29 | – | 86,90 | – | FeH (SO ₄) ₂ ·4 (H ₂ O) | 3,90 | 100,00 |
| 1,003 | – | – | 96,8 | – | – | Fe (SO ₄) ₂ (OH)2H ₂ O | 1,59 | 99,99 |
| | | | | | | Fe _{0,975} S | 1,60 | |
| 1,104 | – | – | 27,5 | 70,8 | – | Fe (SO ₄) ₂ (OH)2H ₂ O | 1,68 | 99,98 |

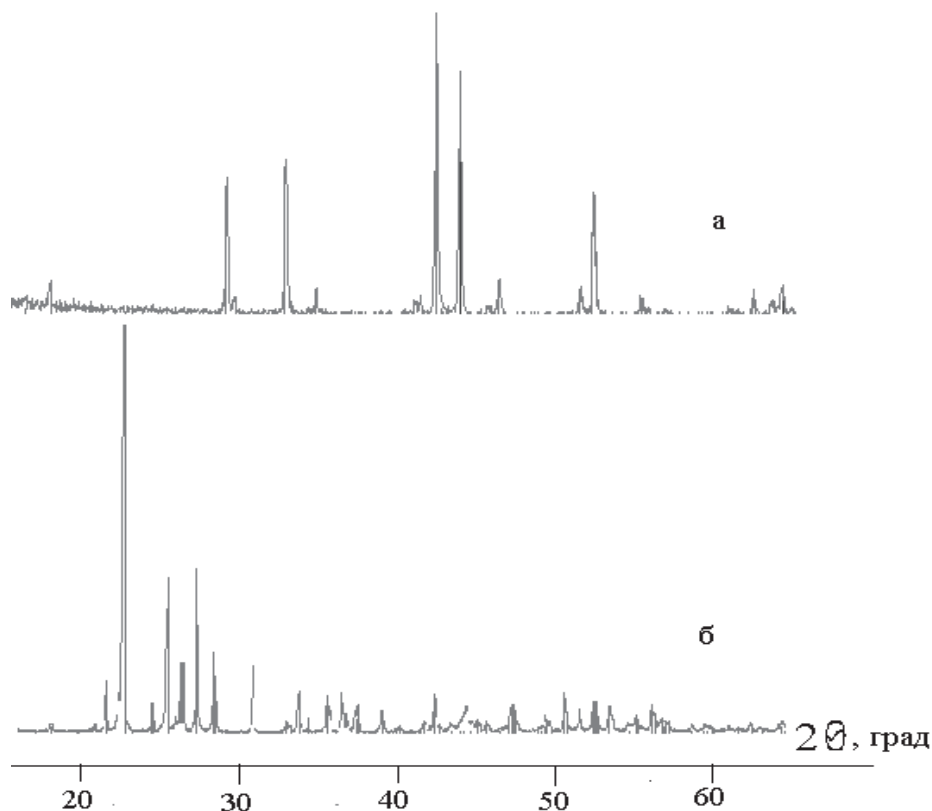
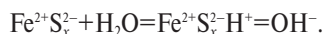


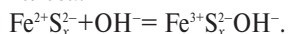
Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы составов, выдержанных в течении 29 лет в лаборатории при температуре ~ 20 °С

Новые минеральные фазы образуются в результате захвата метастабильными сульфидами железа молекул воды после сухого синтеза. Тот факт, что при синтезе отсутствовал кислород, подтверждается наличием свободного железа и отсутствием его оксидов в синтезированных образцах. Постепенная адсорбция водяных паров из атмосферы активными центрами, в роли которых и выступают катионные вакансии, приводит к образованию следующих соединений – Fe(SO₄)(H₂O), Fe(SO₄)(OH)2H₂O, FeH(SO₄)₂·4(H₂O), Fe(SO₄)₄(H₂O). Рассмотрим возможные превращения, происходящие в структуре

пирротина при внедрении в нее гидроксильной группы. На первом этапе атмосферная вода адсорбируется поверхностью пирротина. Так как молекула воды полярна, то один из атомов водорода стремится занять место катионной вакансии. При этом электроны близлежащих атомов серы смещаются в сторону положительно заряженного водорода. Данный атом вступает в связь с ионами серы, в то же время его связь с группой OH⁻ ослабляется и легко может быть разорвана за счет теплового движения. Этот процесс можно представить реакцией:

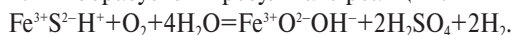


На следующем этапе, группа OH^- присоединяется к атому железа:

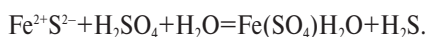


В результате этих реакций получают промежуточные соединения, которые в дальнейшем образуют ряд минералов. Предполагается, что схемы образования этих минералов выглядят следующим образом.

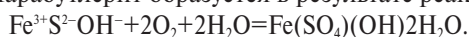
Гётит образуется в результате реакции:



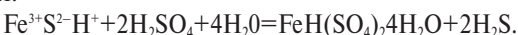
К образованию самольнокита приводит реакция:



Парабултерит образуется в результате реакции:



К образованию ромбоклазита приводит реакция:



Образование розенита $[\text{Fe}(\text{SO}_4)_4\text{H}_2\text{O}]$ подобно образованию самольнокита.

Реакции являются предположительными. Детальный анализ констант равновесия, расчет изобарно-изотермических потенциалов автором не проводился, так как в данном случае предложена модель, в которой возможны процессы обмена энергией молекул воды с кристаллом. Таким образом, даже такие реакции, как расщепление воды на водород и гидроксильную группу могут стать энергетически выгодными.

Возникает вопрос — почему трансформируются только метастабильные сульфиды железа? Стабильными являются структуры, в которых вакансии упорядочены. В метастабильных же структурах вакансии расположены хаотично, а следовательно, есть области с различной их концентрацией. Образуются локальные зоны, где вакансии расположены близко друг от друга (или рядом), создаются условия возникновения двухвалентных «гантелей» из атомов серы (S—S), подобно таким, какие типичны для структуры пирита.

Отметим, что пирит обладает наиболее стабильным кристаллохимическим строением (из всех соединений железа с серой) в нормальных условиях. Образование «гантелей» не приводит к фазовому переходу пирротин—пирит, потому что их концентрация мала, однако они придают структуре неустойчивость. Очевидно, что катионная вакансия имеет отрицательный заряд. Учитывая то, что молекула воды полярна, она притягивается к отрицательно заряженной катионной вакансии положительно заряженным протоном. Отрицательно заряженная гидроксильная группа OH^- может заместить серу только в том случае, если сера структурирована в «гантель» — такая сера нестабильна в структуре пирротина. Именно поэтому пирротин только в метастабильном состоянии может трансформироваться в минерал, содержащий в кристаллической структуре связанную воду. Отметим, что кон-

центрация областей с повышенным содержанием вакансий зависит от соотношения серы и железа в образцах (рис. 1, табл. 1).

Рост намагниченности (рис. 1, табл. 1) в интервале $1,14 < \text{S}/\text{Fe} < 1,51$ объясняется тем, что в этом случае образуются структуры, в которых сера связана в «гантель» (Fe_nS , табл. 1). В стабильных пирротинах такая связь для серы невозможна. При $\text{S}/\text{Fe} = 1,51$ концентрация «гантелей» максимальна (рис. 1, табл. 1). Максимальная концентрация гидроксильной группы OH^- в выдержанных образцах также практически совпадает с таким соотношением серы и железа (рис. 1, табл. 1). При дальнейшем увеличении серы в образцах содержание фазы с максимальной концентрацией «гантелей» уменьшается, увеличивается концентрация парамагнитного пирита в образцах, а следовательно, происходит спад намагниченности.

Анализируя процентное содержание серы и железа в образце и их рентгеновские спектры, можно предположить, что фазой Fe_nS является феррисульфид Fe_2S_3 с моноклинной симметрией, содержащий 94 % трехвалентного железа. Специфические свойства соединения Fe_2S_3 уже отмечались в литературе [4, 5, 8]. Такие сульфиды обладают свойствами ферримагнетика, а из-за наличия в структуре трехвалентного железа удельная намагниченность их существенно превышает удельную намагниченность $\text{Fe}_{0,875}\text{S}$.

В заключение отметим, что авторы различают стабильные, метастабильные и нестабильные сульфиды железа. Стабильные составы находятся в состоянии с минимумом свободной энергии, нестабильные стремятся занять это состояние, а метастабильные соединения занимают примесный энергетический уровень, время жизни на котором определяется временем релаксации, т. е. через определенное время они могут перейти в нестабильное состояние, а затем — в стабильное. Более подробный анализ возможных метастабильных состояний в минералах представлен в работе [11].

Тот факт, что пирротин в контакте с атмосферой Земли может переходить в парабултерит — $\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{OH})2\text{H}_2\text{O}$, гётит — $\text{FeO}(\text{OH})$, самольнокит — $\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})$, гидрониум — $\text{Fe}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$, розенит — $\text{Fe}(\text{SO}_4)_4(\text{H}_2\text{O})$, ромбоклазит — $\text{FeH}(\text{SO}_4)_24(\text{H}_2\text{O})$, известен давно. Также ни у кого не вызывает сомнения, что чистое мелкодисперсное железо в контакте с атмосферой Земли непременно окисляется и переходит в конечном счете в магнетит и гётит. Уникальность данного эксперимента заключается в том, что все образцы находились в идентичных условиях в течение 29 лет, в том числе и химически чистое мелкодисперсное железо в смеси с чистой серой. В условиях этого длительного эксперимента никаких окислительных процессов с железом не произошло. Никаких соединений железа с серой и кислородом не отмечено. Дифрактограммы РФА это подтверждают. Заметим, что метастабильный пирротин переходит в другие

минералы в таких условиях, в которых мелкодисперсное железо даже не окисляется в течение 29 лет – вот уникальность эксперимента по взаимодействию минералов с водосодержащей атмосферой. Молекулы воды оказываются, при определенных условиях, химически более активны, чем кислород. То, что в таких условиях без всякого внешнего воздействия из метастабильного пирротина образовался парабутлерит – $\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{OH})2\text{H}_2\text{O}$, гетит – $\text{FeO}(\text{OH})$, сомольнокит – $\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})$, гидронит – $\text{Fe}(\text{SO}_4)2(\text{OH})_32\text{H}_2\text{O}$, розенит – $\text{Fe}(\text{SO}_4)4(\text{H}_2\text{O})$, ромбозлазит – $\text{FeH}(\text{SO}_4)_24(\text{H}_2\text{O})$, является уникальным фактом, а не общеизвестным явлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Онуфриенок В.В. Температурные изменения намагниченности пирротина в метастабильном фазовом состоянии // Известия вузов. Физика. – 1989. – Т. 32. – № 4. – С. 56–61.
2. Onufrienok V.V., Sazonov A.M. Pilot Study of Isothermal Crystallization of Goethite from Metastable Synthetic Pyrrhotite // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2011. – V. 4. – № 2. – P. 123–131.
3. Ткач О.Д., Онуфриенок В.В. Влияние времени термообработки гидроксида алюминия на поверхность получившихся активных окислов // Журнал прикладной химии. – 1979. – Т. 52. – № 1. – С. 30–32.
4. Ward J.C. Interaction between cation vacancies in pyrrhotite // Solid State Communication. – 1971. – V. 9. – P. 357–361.
5. Rickard D., Luther G. Chemistry of Iron Sulfides // Chem. Rev. – 2007. – V. 107. – P. 514–565.
6. Novikov G.V., Egorov V.K., Sipavina L.B. Mossbauer and X-Ray Studies of Relaxation Kinetics in Troilite-Pyrrhotite Assemblages // Physics and Chemistry of Minerals. – 1978. – V. 3. – P. 82–88.

Выводы

Предложен механизм фазового превращения в результате адсорбции воды метастабильными сульфидами железа в другие минералы, содержащие в структуре связанную воду. Определены стабильные фазовые составы пирротина (FeS , $\text{Fe}_{0,975}\text{S}$, $\text{Fe}_{0,950}\text{S}$, $\text{Fe}_{0,875}\text{S}$, $\text{Fe}_{0,909}\text{S}$). Выявлена зависимость процентного содержания ОН в образцах от соотношения серы и железа в системе. Предложено объяснение формирования минералов, содержащих гидроксильные группы, посредством длительного выдерживания в атмосферных условиях.

Работа выполнена при поддержке Программы развития Сибирского Федерального университета.

7. Онуфриенок В.В., Звегинцев А.Г. Полиморфное превращение у сульфидов железа состава $\text{Fe}_{0,88}\text{S}$ // Неорганические материалы. – 1981. – Т. 17. – № 8. – С. 1483–1484.
8. Онуфриенок В.В. Метастабильные сульфиды железа // Неорганические материалы. – 2005. – Т. 41. – № 6. – С. 744–747.
9. Онуфриенок В.В., Звегинцев А.Г. Магнитные свойства и кристаллическая структура сульфидов железа в интервале составов FeS – $\text{FeS}_{1,18}$ // Неорганические материалы. – 1982. – Т. 18. – № 3. – С. 366–371.
10. Dubinin P.S., Yakimov I.S., Piksina O.E., Yakimov Y.I., Zaloga A.N. RETRIEVE – a system for XRPD phase and structure analysis // Z. Kristallogr. Suppl. – 2009. – V. 30. – P. 209–211.
11. Nikiforov A. G., Onufrienok V.V., Sazonov A.M., Terehova A.V. Weathering of Pyrrhotite to Szomolnokite // Proceedings of the Xth International Congress for Applied Mineralogy (ICAM). – Springer, 2012. – P. 463–469.

Поступила 28.07.2012 г.

Геология и полезные ископаемые

УДК 553.411.071.061

ПРОБЛЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА. Ч 1. МАГМАТОГЕННЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ

И.В. Кучеренко

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

Приведены содержание и обоснования четырех современных концепций образования гидротермальных месторождений золота – гранитогенной, базальтогенной, метаморфогенной, полигенной. Критический анализ аргументов сочетается с предложением и интерпретацией авторских данных, характеризующих в первой части статьи соотношения оруденения с магматизмом, во второй части – петрохимические, геохимические черты околорудных метасоматических ореолов. Предложенные материалы обсуждаются во второй части статьи, в завершение которой формулируются выводы.

Ключевые слова:

Гидротермальные месторождения золота, гранитогенная, базальтогенная концепции рудообразования, золотопродуцирующие флюидно-магматические комплексы.

Key words:

Hydrothermal gold deposits, granite-genetic, basalt-genetic ore-formation conceptions, gold-forming fluid-magmatic complexes.

Введение

Актуальная задача восполнения сокращающихся в недрах запасов высоколиквидного металла золота, как известно, решается посредством прогнозирования и локализации перспективных площадей, поисков на этих площадях новых месторождений и оценки обнаруженных ранее рудопроявлений и рудных тел в законсервированных и освоенных месторождениях. При существовании разных источников металла – комплексных месторождений эндогенных, из руд которых он извлекается попутно (магматических ликвационных медно-никелевых, гидротермальных медно-порфировых, колчеданных и полиметаллических гидротермальных, гидротермально-осадочных и вулканогенно-осадочных, вулканогенно-гидротермальных золото-серебряных), и экзогенных, образованных в корях выветривания и россыпях, важнейшее экономическое значение, не считая золотоносных конгломератов Ранда (ЮАР), имеют многочисленные гидротермальные собственно золотые месторождения, образованные, как считается, на умеренных (более 1,5...2,0 км), отчасти значительных, глубинах и представленные рудными телами разной морфологии, – кварцевыми жилами, минерализованными зонами, залежами, штокверками, в том числе, – в разных сочетаниях.

Эффективность перечисленных операций в прогнозно-поисково-оценочной практике зависит от ряда факторов: геологической изученности территорий, природных условий выполнения поисковых работ, наличия адекватных целям и задачам исследований аппаратуры и методов, знания законов, управляющих процессами рудообразования в земной коре.

Роль последнего важнейшего в развитии теории фактора возрастает и в прикладном аспекте – по мере сокращения фонда так называемых легко открываемых месторождений и ориентации на поиски оруденения, залегающего на экономически приемлемых глубинах, но не вскрытого эрозией. Разработка критериев прогнозирования рудоносных блоков земной коры и месторождений в них в этом случае опирается на знание геолого-генетической сущности рудообразующих и более масштабных инициирующих рудообразование геологических процессов, причинно-следственных связей оруденения с узнаваемыми элементами геологического строения территорий, – ареалами метаморфизма и магматизма, структурами и структурно-вещественными комплексами – производными конкретных геологических, в том числе геодинамических, режимов формирования верхней оболочки планеты.

Реконструкция геологических – рудообразующих – процессов, функционировавших в прошлые геологические эпохи сотни млн...миллиарды лет назад, представляет известные трудности, поскольку оставленные этими процессами вещественные следы – основа реконструкции, нередко сохранились в их первозданном виде и/или доступны для исследований лишь частично. Многие эмпирические данные, включая изотопно-геохимические, по объективным обстоятельствам не получают однозначной генетической интерпретации, но служат питательной средой для многолетней, кажущейся бесконечной дискуссии и формулировки выводов, отражающих сильные личностные акценты.

Доказательством неудовлетворительного состояния проблемы образования гидротермальных собственно золотых месторождений служит мирное сосуществование четырех с вариантами геолого-генетических гипотез-концепций – гранитогенной, базальтогенной, метаморфогенной, полигенной, представляющих итог столетних исследований. Источники информации для разработки концепций, – как правило, одни и те же уникальные и крупные месторождения, вскрытые эксплуатационными и/или разведочными работами на значительные глубины и, следовательно, доступные для исследований, – Мурунтау, Бакырчик, Советское, Холбинское, Дарасун, Сухой Лог, Наталка и другие. В связи с этим трудно предположить в качестве причины многовариантных представлений о происхождении каждого из упомянутых месторождений конвергенцию рудообразования. Более вероятно то, что по крайней мере три из четырех предложенных для одного месторождения концепций не описывают реальный процесс его образования. Это, однако, не исключает некоторое разнообразие месторождений данной совокупности, образованных по разным написанным природой сценариям.

Существующая ситуация такова, что в обоснованиях концепций, за редкими исключениями, по неизвестным причинам не учитываются и не обсуждаются опубликованные в разные годы факты, которые не вписываются в авторские представления, либо, наоборот, использование которых усилило бы доказательную базу одной из них. Последнее невозможно объяснить иначе как неосведомленностью. Вместе с тем популярный ныне «мягкий» вариант дискуссии не способствует углублению теории и актуализирует потребность оценивать каждую концепцию на предмет ее соответствия всей совокупности накопленных достоверных фактов.

В статье дан аналитический обзор современных представлений об условиях образования гидротермальных золотых месторождений, приведены и обсуждаются не включенные в научный оборот эмпирические данные, использование которых призвано способствовать корректировке и конкретизации, большей обоснованности теоретических по-

строений и прогнозных критериев оруденения. В первой части статьи рассмотрены и обсуждаются магматогенные – гранитогенная и базальтогенная, во второй – метаморфогенная и полигенная концепции рудообразования. Во второй части, кроме того, подведены итоги обсуждения и формулируются выводы.

Гранитогенная и базальтогенная концепции предполагают генерацию металлоносных, очевидно газовых, флюидов в очагах соответственно гранитных и базальтовых расплавов, диагностика золотопродуцирующей способности которых осуществляется с привлечением косвенных данных. Прямых признаков (фактов) связей золота и сопровождающего его в рудах геохимического и металлогенического спутника серебра с так называемыми предположительно материнскими магматическими породами пока не найдено. Вместе с тем повторяемость во многих золотых месторождениях, принадлежащих к одному генетическому типу, но образованных в разных геологических ситуациях и в разные геологические эпохи, косвенных данных в их совокупности служит доказательством достоверности следующих из их анализа и синтеза выводов.

Гранитогенная концепция

Со среднепалеозойским гранитоидным магматизмом генетически связывают образование близких к гранитам по возрасту и совмещённых с ними в пространстве золоторудных месторождений Урик-Китойской зоны Восточного Саяна – Холбинского, Водораздельного и других [1]. По мнению указанных авторов, рудообразование стало возможным при условии обогащения палингенных гранитных расплавов золотом вследствие переплавления обогащённого им офиолитового субстрата земной коры. Одновременно в сульфидных руд этих месторождений исследованы изотопные отношения серы [2]. $\delta^{34}\text{S}$ пирита изменяется в пределах 2...5 ‰, галенита – 1...3,5 ‰. Обращает внимание на то, что указанный изотопный состав свойствен пириту и галениту рудовмещающих чёрных сланцев, образующих в них согласные стратификации слои и линзы массивных полиметаллических руд с участием кварцевых жил. С позиции генетических связей рудообразования с гранитным магматизмом мантийный изотопный состав серы минералов руд и возможных синрудных сульфидов в сланцах надо было бы прокомментировать, однако этого не сделано. Остаётся неопределённой справедливость утверждения об обогащении золотом вмещающих массивы гранитов пород расплавов как предпосылке рудообразования, – кроме факта присутствия на прилегающих площадях офиолитов других доказательств нет, притом, что содержание золота в этих породах отличается от такового в гранитах всего на несколько мг/т.

На основе исследований состава минералов гранитоидов Сибирского перикратонного металлогенического пояса, примесей в них, включая зо-

лото, газово-жидких включений в минералах, последующей реконструкции физико-химических и термодинамических режимов функционирования гранитоидных очагов высказывается предположение, согласно которому потенциальная рудогенерирующая способность гранитоидных магм определяется сложными процессами экстракции золота из расплавов под воздействием летучих компонентов [3]. Однако реализуется ли эта следующая из результатов экспериментов и теоретических построений рудогенерирующая способность в природе, остается неизвестным. Выводы даются как один из возможных вариантов формирования металлоносных растворов в гранитных магмах.

Проблема связей рудообразования с гранитным магматизмом обсуждается на примере одного из крупнейших золотых месторождений – Нежданнинского [4], золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозоид [5] и мезозоид Северо-Востока Азии [6]. Исследователи считают, что золотое оруденение Верхояно-Колымских мезозоид и Нежданнинского месторождения связано с гранитоидами парагенетически. Наличие послегранитных дорудных малых интрузивных тел и даек основного состава дает основание полагать, что ответственными за образование золото-кварцевого оруденения следует считать более глубокие сравнительно с гранитными промежуточные магматические очаги, которые могут создавать передовой высокопроницающий фронт магматитов в сопровождении металлоносных флюидов. В складчатом поясе мезозоид Северо-Востока Азии утверждается, напротив, генетическая связь золотого оруденения с гранитами, притом что изотопные отношения серы сульфидов руд большинства месторождений региона, отвечающие мантийным меткам, не укладываются в это представление. Авторы подчеркивают, что при формировании магматической колонны в масштабах всего складчатого пояса главным источником золота служили сланцевые осадочные толщи, подвергавшиеся плавлению с образованием обогащённых золотом гранитных расплавов.

Подобной точки зрения, хотя и с оговорками, придерживается В.А. Степанов [7]. Он высказывает предположение, что в Центральной Колыме золото поглощается гранитоидными магмами из черносланцевых толщ верхоянского комплекса, для которых характерно повышенное содержание золота, природа которого остаётся неизвестной. Из расплавов металл поступает в рудообразующие растворы.

А.А. Сидоров и А.В. Волков [8] подчёркивают обнаруживаемую в ряде случаев положительную связь между золото-порфировым оруденением и ранними допорфировыми зонами тонкорассеянной золотоносной сульфидизации в черносланцевых толщах различного генезиса. С учётом масштабов сульфидизации и мобилизационных возможностей тонкорассеянных рудных минералов эти зоны рекомендуется рассматривать в качестве основ-

ных источников рудного вещества золоторудных месторождений, связанных с гранитоидами – интрузиями Na и K-Na монзонитов и гранодиоритов до калиевых лейкократовых гранитов. Авторы идеи полагают, что степень постмагматической золотоносности интрузий, вероятно, определяется не столько петрохимическим составом гранитоидных комплексов, сколько взаимоотношениями магм с более ранними зонами золотоносной сульфидизации и особенностями постмагматических процессов. Однако несколько позже А.А. Сидоров высказывает мнение [9], что золоторудные месторождения в черносланцевых толщах Северо-Востока России образованы посредством переработки золотосодержащей сульфидной до-синаккреционной вулканогенно-осадочной, гидротермально-осадочной минерализации в сланцах метаморфическими растворами.

Существенная эволюция взглядов в последнее десятилетие произошла при исследовании проблемы происхождения уникального золотого месторождения черносланцевого типа Сухой Лог в Ленском районе.

Коллектив авторов [10] определил его как полигенную геохимическую систему с многообразием источников рудного вещества и процессов его концентрирования. Фиксируемая в рудах ассоциация элементов, образующих собственные минеральные фазы, – Au, Ag, Pt, Pd, Fe, Ni, Co, Cr, Ti, Zn, Pb, Cu, TR, W, Mo, Zr соответствует двум геохимическим сообществам – базит-гипербазитового и габбро-гранитного рядов. Полигенная природа рудообразования устанавливается при исследовании изотопных равновесий группы стабильных изотопов – C, O, S, H, радиогенных изотопов Sr, Pb, Sm, Nd. По изотопным отношениям C и O ($\delta^{13}\text{C} = -30 \dots -3,5\%$, $\delta^{18}\text{O} = 16,3 \dots 30,2\%$) сделан вывод о формировании кварц-карбонатной минерализации вследствие окисления органического углерода при участии в рудообразовании глубинного источника вещества. Этот вывод подтвержден результатами исследования серы, редкоземельных элементов и радиогенных изотопов. В целом высказано мнение о том, что при рудообразовании были задолжены два источника компонентов и флюидов – коровый и глубинный.

Позже [11] был установлен значительный отрыв во времени процессов образования руд от формирования рудовмещающих отложений (~1000 млн л) и их регионального метаморфизма (510 ± 30 млн л). С применением Rb-Sr метода радиологического датирования по валовым рудным пробам и по гидротермальному жильному золотоносному кварцу процесс рудообразования разделён на два этапа, отвечающих возрастам 440 и 315 ± 15 млн л соответственно. Конкретизированы данные об источниках сосредоточенных в рудах металлов: Au, Pt, W, Mo, TR, Ni, Co, Cr, Pb, Zn привнесены в зону рудоотложения извне, другие заимствованы из пород и несколько перераспределены в пространстве с повышением их концентраций в рудных телах.

В дальнейшем эти результаты подтверждены и уточнены [12]: 447 ± 6 млн л назад образованы прожилково-вкрапленные руды Сухого Лога, 321 ± 14 млн л назад – поздние золотоносные кварцевые жилы. Образование кварцевых жил авторы связывают со становлением гранитоидов конкудеро-мамаканского комплекса ~ 300 млн л назад.

В развитие этой идеи разработана гипотеза рудообразования, существо которой сводится к следующему [11]. Рудно-магматическая система месторождения Сухой Лог включает мантийный источник флюидов, базит-гипербазитовые породы докембрийского фундамента Бодайбинского прогиба, как считают авторы, «с высокой степенью надёжности» прогнозируемые глубинными геофизическими методами (гравirazведкой), прогнозируемый гравirazведкой Угаханский гранитный плутон, кровля которого находится на глубине 3,0...3,2 км от современной дневной поверхности, и рудные залежи на указанном расстоянии выше плутона. Связующее все эти элементы звено – глубинный разлом. Восходящие и гранитизирующие мантийные флюиды предварительно извлекают золото и платину из базит-гипербазитовых пород фундамента и доставляют металлы в образованный под их воздействием Угаханский гранитный очаг. Из последнего растворы выносят металлы на верхние горизонты земной коры, где и образуется месторождение, которое, таким образом, по версии авторов, генетически связано с предполагаемыми угаханскими гранитами, а позднепротерозойские углеродистые сланцы хомолхинской свиты служат всего лишь рудовмещающей средой.

Эту гипотезу рудообразования позже подтвердили Э.Н. Лишневский и В.В. Дистлер [13], привлекая результаты изучения глубинного строения земной коры района месторождения, но в части источников золота опровергли И.В. Чернышов и другие [14]. Последние авторы считают, что изотопный состав свинца, сосредоточенного в пирите и галените руд Сухого Лога, соотношения его изотопов, наличие тренда изотопного состава свинца и смешение свинца различного происхождения и изотопного состава согласуются с представлением о двух этапах формирования месторождения: сначала прожилково-вкрапленных руд (447 ± 6 млн л) и затем золотоносных кварцевых жил (321 ± 14 млн л), и подтверждают ведущую роль коровых источников золота и других металлов – черносланцевых терригенно-карбонатных пород верхнепротерозойского возраста. Металлы были мобилизованы из пород в процессе палеозойской тектоно-магматической активизации. Ранее представление [11, 13] о базит-гипербазитовом фундаменте Бодайбинского прогиба как источнике золота, поступившего с мантийными флюидами в Угаханский гранитный очаг, а из него – в образующееся месторождение, данными по изотопии свинца не подтвердилось.

Как следует из результатов изучения расплавных включений в кварце в районе золотого место-

рождения Тимбарра (Австралия), условия для формирования связанных с гранитоидами месторождений золота создаются в ходе фракционирования обычного гранитного расплава с образованием пород ряда от монцогранитов до высоко фракционированных щелочно-полевошпатовых гранитов, и сопровождающим его обогащением расплавов золотом [15]. Существует также мнение, что содержание золота в гранитоидах определяется условиями генерации исходных магм [16]. Так, в Главном гранитном поясе южного Урала продуктивными на золотое оруденение являются гранитоиды позднедевонских вулканоплутоновых интрузий, тесно ассоциирующие с базальтоидным вулканизмом, для которых, по версии авторов, характерны повышенные средние содержания золота – от 2,8 до 6,8 мг/т. Надо, однако, иметь в виду, что еще в семидесятых–восемидесятых годах было известно и на многих примерах подтверждалось, что повышенные или пониженные содержания золота в гранитах не есть показатель реализации их золотопродуцирующей способности [17, 18].

Базальтогенная концепция

Концепция опирается на один–два признака, подтверждающих участие мантийных производных в составе руд и окорудных метасоматитов.

На основе анализа современных представлений о составе верхней мантии и происходящих в ней процессах в сочетании с фактами участия в рудах ряда компонентов (С, N, H) в восстановленной форме, элементов с переменной валентностью, изотопные отношения которых отвечают мантийным меткам (S, C, Sr и др.), некоторые исследователи [19–22] полагают генерацию металлоносных рудообразующих растворов в мантийных магматических очагах; растворы поступают в области рудообразования по глубинным разломам, минуя промежуточные коллекторы в виде, скажем, коровых (палингенных) гранитоидных расплавов, то есть иначе, чем это мыслится в некоторых вариантах гранитогенной гипотезы.

Об иницировании рудообразования в черных сланцах процессами в мантии, в частности о генерации в мантии металлоносных флюидов, поступлении их по раствороподводящим глубинным разломам в области рудообразования, свидетельствуют, по мнению И.Н. Томсона и др. [23], контроль последними метасоматитов, насыщенных абиогенным углеродистым веществом (углеродистых метасоматитов), и одновозрастных с ними тел щелочных базитов. Высказано предположение о переносе золота и других металлов в форме металлоорганических соединений, которые позднее были обнаружены в рудовмещающих метасоматитах Дальнегорского района.

Э.А. Развозжаева с соавторами [24] полагают, что присутствие в газовой-жидких включениях минералов руд месторождения Сухой Лог наряду с углеводородами (метаном, этаном), CO_2 , N, H, ионов хлора и хлорсодержащих в рудах фаз в сра-

станции с рудными элементами позволяет предполагать изначальное поступление эндогенного рудного вещества в виде хлоридных комплексов. С учетом эндогенного (мантийного) происхождения части заключенного в рудах азота авторы считают установленной основную геохимическую особенность Главного этапа рудообразования на месторождении – взаимодействие глубинных, обогащенных азотом и благородными металлами флюидов с углеродистым веществом черносланцевых толщ, которое являлось геохимическим барьером. С представлением о генерации металлоносных флюидов, создавших Сухой Лог, в базит-гепербазитовых расплавах мантии согласуются результаты изучения метасоматических минералов руд, в частности обогащение последних минералами титана, а хлорита – никелем, который в повышенных концентрациях считается вестником мантийных глубин [25]. Об этом же свидетельствуют факты присутствия даек базитов в контролирующем рудные залежи Сухого Лога Кадали-Сухоложском глубинном разломе [26], даек камптонитов в месторождениях Енисейского, Ленского золоторудных районов, Кузнецкого Алатау [27]. Последний факт рассматривается В.А. Злобиным как признак наступления вслед за формированием ранних магматитов повышенной основности и натриевости позднего щелочно-базальтоидного этапа магматизма и связанного с ним рудообразования.

В контролируемом зоной Тамдытау-Нуратинского глубинного разлома месторождении-гиганте Мурунтау, которое формировалось, по данным детальных радиологических изотопных исследований, 70 млн л, присутствует множество преимущественно субщелочных даек. Среди них диагностированы, в частности, дорудные диоритовые порфириты и кварцевые диорит-порфириты с возрастом 286 млн л и внутрирудные керсантиты и кварцевые сиенит-порфиры с возрастом 273 млн л [28]. Как считают упомянутые и другие [29] авторы, для поддержания рудообразующей системы в рабочем состоянии столь долгое время был необходим постоянный флюидно-тепловой поток из мантийно-корового магматического источника. Его метками в рудах и метасоматических породах Мурунтау служат повышенные содержания металлов платиновой группы и изотопные отношения Sr. Седиментогенное биогенное (по изотопным данным) углеродистое вещество в рудно-метасоматическом процессе под действием флюидного потока трансформировалось в миграционноспособные формы, вступая в реакции с флюидами, и удалялось из метасоматитов, переотлагаясь на периферии метасоматических тел. Приведённые факты с учётом парагенетических отношений золота с платиновыми металлами преимущественно палладиевого профиля и связей его с высокотемпературными Mg-Са метасоматитами составили эмпирическую основу вывода о генерации металлоносных флюидов в глубинном очаге дифференцировавшейся базитовой магмы [28].

Как факт, подтверждающий связи процессов образования золоторудных месторождений с мантийным магматизмом в рудовмещающих углеродистых толщах разного возраста, рассматривается обнаруженное П.В. Комаровым и И.Н. Томсоном [30] соответствие в каждом районе возраста оруденения возрасту мантийных плюмов. Предполагается, что рудообразование обусловлено их функционированием.

В реконструкции вероятных причинно-следственных связей рудообразования с магматизмом привлекаются абсолютный возраст магматических пород и руд [1, 28, 30, 31–33 и др.] и относительные раскрывающие последовательность геологических событий пространственно-временные соотношения между ними [31, 34–37 и др.], диагностируемые пересечениями поздними производными геологических процессов ранних в сочетании с признаками термического воздействия первых на вторые, – зонами закалки в эндоконтактах даек, разгерметизированными вакуолями в кварцевых жилах, гидротермальными изменениями. В результате получены эмпирические доказательства подтверждающей во многих месторождениях последовательности сближенных во времени в диапазоне до нескольких десятков млн л сопровождаемых рудообразованием геологических процессов.

В разные геологические эпохи – в позднем рифее (Енисейский район), раннем (Кузнецкий Алатау), среднем (Окино-Китайский район Восточного Саяна), позднем (Кызыл-Кайнарская зона Южного Казахстана, Муйский район Северного Забайкалья, Ленский район, Патомское нагорье) палеозое, процессы начинаются с образования плутонов, массивов, поясов даек, зрелых очагово-купольных построек кислых плутонических пород – палингенных гранитоидов, образованных, судя по Sr^{87}/Sr^{86} -отношениям, под воздействием на субстрат земной коры мантийных флюидов-теплоносителей.

В ряде месторождений – Центральном, Бериккульском (Кузнецкий Алатау), Ирокиндинском, Кедровском (Муйский район), Чертово Корыто (Патомское нагорье), в телах гранитоидов и их обрамлении, в том числе в рудовмещающих толщах углеродистых (черных) сланцев, залегают сравнительно мощные (до 20 м) дайки гидротермально измененных микродиоритов, диоритовых порфиритов, которые сменяются во времени поздними дайками умеренно щелочных долеритов не менее 5 генераций.

Среди последних диагностированы дорудные, внутрирудные и послерудные.

В гранитных массивах дорудные дайки обычно сопровождаются золотоносными кварцевыми жилами и/или минерализованными зонами прожилково-вкрапленных руд и среди всех пород гидротермально изменены с образованием в экзоконтактах рудных тел оторочек березитов, а в обрамлении последних – пропилитов в большей части объема дайковых тел. В редких останцах относи-

тельно слабого изменения умеренно щелочные долериты сохранили свойственный им в пределах нормативного минералого-химический состав, из чего следует вывод о затвердевании кислых расплавов, как правило, до внедрения ранних порций базальтовых, поскольку в результате смешения тех и других образовались бы «пестрые» по составу породы, что наблюдается достаточно редко (Мурунтау).

Внутрирудные дайки пересекают ранние рудно-минеральные комплексы, но пересекаются поздними и, сохраняя присущие им черный цвет, массивную текстуру и кристаллическую структуру, преобразованы на 70...90 % объема в метасоматиты-пропилиты, в том числе среди слабо измененных и неизмененных пород – покровных базальтов (Берикульское месторождение), гранитоидов (Холбинское месторождение в Восточном Саяне), ультраметаморфитов и гранодиоритов очагово-купольной постройки (Кедровское месторождение), углеродистых (черных) сланцев раннепротерозойской михайловской (месторождение Чертово Корято), позднерифейских кедровской, хомолхинской, аунakitской (месторождения Кедровское, Сухой Лог в Ленском районе) свит [37]. В перечисленных месторождениях, кроме Берикульского, в составе минеральных новообразований участвуют кристаллы роговой обманки и/или чешуйки биотита в объеме до нескольких десятков %, – сравнительно высокотемпературных минералов, не встречающихся в обрамляющих и вмещающих рудные тела метасоматических ореолах пропилит-березитового профиля. Биотит относится к числу поздних метасоматических минералов, – он замешает пироксен, лабрадор, роговую обманку, но в агрегате хлорита, альбита, серицита, магнезиально-железистых карбонатов, рутила, лейкоксена, магнетита, пирита, апатита его чешуйки сохраняются свежими или слабо корродированными, при этом аподайковые метасоматиты вдвое, вчетверо против нормативного содержания в долеритах обогащены магнием, фосфором, титаном, золотом (до 11 мг/т) [31, 34, 35]. В Ленском районе вместе с более ранними дайками гранитоидов позднепалеозойского агланьянского комплекса дайки долеритов, объединяемые в кадали-бутуинский комплекс, образуют совмещенный региональный пояс малых интрузий, контролируемый системой глубинных разломов северо-северо-восточного простирания, в том числе залегают в контролирующем месторождения Сухой Лог, Вернинское, Невское Кадали-Сухоложском глубинном разломе. Радиологический Sm-Nd возраст даек долеритов здесь составляет 312 ± 59 млн л [38], возраст Сухого Лога по Rb-Sr изотопной системе – 315 млн л [39]. В других месторождениях возраст даек долеритов и руд, как отмечалось [32, 33, 37], близок к возрасту ранних гранитоидов.

Послерудные (позднерудные) дайки долеритов пересекают продуктивные рудно-минеральные комплексы, слабо гидротермально изменены (се-

рицит, хлорит) и, очевидно, с поздними растворами завершают процесс.

Пространственно-временные и причинно-следственные связи оруденения с производными базитового магматизма подчеркиваются накоплением в тыловых зонах (березитах) околорудных (рудовмещающих) метасоматических ореолов в ближнем обрамлении рудоконтролирующих глубинных и оперяющих их разломов ассоциации фемофильных элементов в составе Р, Ti, Mg, Fe, Ca, Mn в сочетании с К, восстановленными С и S [40, 41]. В контрастных аномалиях этих элементов содержания их в разы и десятки раз превышают содержания в исходных породах – архейских ультраметаморфитах Муйского выступа фундамента Сибирского кратона (Ирокиндинское месторождение) [40] и позднепалеозойских ультраметаморфитах Кедровского купола (Кедровское месторождение), в позднерифейских гранитах падоринского комплекса (Каралонское месторождение в Северном Забайкалье), в черных сланцах раннепротерозойской михайловской свиты (месторождение Чертово Корято), позднерифейских кедровской (Кедровское месторождение), водораздельной (Каралонское месторождение), хомолхинской, имняхской (месторождение Сухой Лог) свит [41]. По мере удаления от глубинных разломов содержания некоторых элементов, прежде всего титана и фосфора, снижаются до свойственных исходным породам кларковых уровней. Снижение согласуется с тенденцией уменьшения средних содержаний и запасов золота в рудах, что в сочетании служит признаком раствороподводящей функции рудоконтролирующих разломов.

Заключение

Приведенные факты расширяют и углубляют доказательства базальтогенной концепции образования гидротермальных месторождений золота, содержание которой заключается в следующем.

На раннем этапе функционирования в горячих точках мантии очагов базальтовых расплавов под воздействием поступающих из них высокотемпературных флюидов-теплоносителей на разных этапах земной коры плавится слагающий её субстрат с последующей кристаллизацией расплавов и образованием кислых плутонических пород. Не исключено образование последних и более поздних диоритоидов также посредством дифференциации базальтовых расплавов в промежуточных магматических очагах. Вещественных следов функционирования на этом этапе металлоносных растворов нигде не зафиксировано.

На позднем этапе процессов формирования антидромных флюидно-магматических комплексов повышение щелочности базальтовых расплавов сопровождается генерацией в них металлоносных флюидов, которые экстрагируют из расплавов серу, углерод, фосфор, металлы, которые определяют петрохимическое своеобразие базитовых магм (титан, магний и другие). Многократно чередующиеся

ся инъекции расплавов и металлоносных флюидов в верхние горизонты земной коры по глубинным и оперяющим их разломам завершаются образованием даек и отложением на физико-химических и термодинамических барьерах рудно-минеральных комплексов. Каналами для движения флюидов, вероятно, в верхних горизонтах земной коры служат также еще горячие массивные дайки – флюидопроводники, способные в соответствии с известным физическим эффектом [42] аккумулялировать в горячем состоянии среди относительно холодных пород горячие растворы. Под воздействием последних дайки преобразуются в метасоматиты и в них кристаллизуются сравнительно высокотемпературные роговая обманка и биотит в случаях, когда температуры даек выше температур поступающих растворов. Часть растворенных веществ, в том числе золото, серебро, фемофильные элементы, при этом оседают в образующихся аподолеритовых метасоматитах, обогащая их. Таким образом, роговая обманка и биотит для внутрирудных даек приобретают статус индикаторных. Очевидно, поступление в дайки и фильтрация металлоносных растворов в них происходит через

промежутки времени после внедрения расплавов и их затвердевания, в течение которых они не успевают остыть.

Таким образом, согласно полученным результатам, золотопродуцирующие флюидно-магматические системы включают глубинные очаги умеренно щелочных базальтовых расплавов, глубинные разломы – каналы движения расплавов и генерируемые в очагах металлоносных растворов и верхнекоровые блоки рудообразования на уровнях создаваемых метеорными водами физико-химических и термодинамических барьеров.

Следующие из рассмотренных материалов магматический и петрохимический критерии пространственно-временных и причинно-следственных связей рудообразования с магматизмом в объеме антидромных гранит-диорит-долеритовых флюидно-магматических комплексов предлагается использовать в прогнозно-поисковой практике.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». Гос. контракт № П238 от 23.04.2010 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов А.Г., Жмодик С.М. Золоторудные месторождения Урик-Китойской металлогенической зоны (Восточный Саян, Россия) // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41. – № 1. – С. 54–69.
2. Жмодик С.М., Гравин А.В., Пономарчук В.А., Миронов А.Г., Морозова И.П., Киселева В.Ю. Pb-, S-изотопная систематика золоторудных месторождений юго-восточной части Восточного Саяна // Доклады РАН. – 1999. – Т. 366. – № 3. – С. 392–394.
3. Гусев А.И. Петрология золотогенерирующих гранитоидов Сибирского перикратонного металлогенического пояса // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – Томск, 2000. – Т. 1. – С. 57–59.
4. Гамянин Г.Н., Бортников Н.С., Алпатов В.В. Нежданское золоторудное месторождение – уникальное месторождение северо-востока России. – М.: ГЕОС, 2000. – 230 с.
5. Гамянин Г.Н. Минералого-геохимические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозоид. – М.: ГЕОС, 2001. – 222 с.
6. Гамянин Г.Н., Горячев Н.А., Бахарев А.Г. и др. Условия зарождения и эволюции гранитоидных золоторудно-магматических систем в мезозоидах Северо-Востока Азии. – Магадан: СВ КНИИ ДВО РАН, 2003. – 196 с.
7. Степанов В.А. Зональность золото-кварцевого оруденения Центральной Колымы. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 70 с.
8. Сидоров А.А., Волков А.В. О золоторудных месторождениях в гранитоидах // Доклады РАН. – 2000. – Т. 375. – № 6. – С. 806–811.
9. Сидоров А.А. О золотоносности углеродистых метасоматитов // Доклады РАН. – 2001. – Т. 378. – № 2. – С. 218–220.
10. Лаверов Н.П., Дистлер В.В., Сафонов Ю.Г., Чернышов И.В., Юдовская М.А., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К. Рудообразующая система золото-платинового месторождения Сухой Лог // Металлогения, нефтегазоносность и геодинамика Северо-Азиатского кратона и орогенных поясов его обрамления: Материалы II Всеросс. металлогенического совещания. – Иркутск, 1998, 25–28 августа. – Иркутск: ООО «Сантай», 1998. – С. 296.
11. Лаверов Н.П., Лишневецкий Э.Н., Дистлер В.В., Чернов А.А. Модель рудно-магматической системы золото-платинового месторождения Сухой Лог // Доклады РАН. – 2000. – Т. 375. – № 5. – С. 652–656.
12. Лаверов Н.П., Чернышов И.В., Чугаев А.В., Баирова Э.Д., Гольдман Ю.В., Дистлер В.В., Юдовская М.А. Этапы формирования крупномасштабной благороднометалльной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения // Доклады РАН. – 2007. – Т. 415. – № 2. – С. 236–241.
13. Лишневецкий Э.Н., Дистлер В.В. Глубинное строение земной коры района золото-платинового месторождения Сухой Лог по геолого-геофизическим данным (Восточная Сибирь, Россия) // Геология рудных месторождений. – 2004. – Т. 46. – № 1. – С. 88–96.
14. Чернышов И.В., Чугаев А.В., Сафонов Ю.Г., Сароян М.Р., Юдовская М.А., Еремينا А.В. Изотопный состав свинца по данным высокоточного ICP MS метода и источники вещества крупномасштабного благороднометалльного месторождения Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51. – № 6. – С. 550–559.
15. Mustard R., Ulrich T., Kamenetsky V.S., Mernagh T. Gold and metal enrichment in natural granitic melts during fractional crystallization // Geology. – 2006. – V. 34. – № 2. – P. 82–88.
16. Самаркин Г.И., Самаркина Е.Я. Распределение золота в породах гранитоидных серий главного гранитного пояса южного Урала // Геохимия. – 2000. – № 8. – С. 869–880.
17. Шилин Н.Л., Кумеев С.С., Колосков А.В. Золото в калиевых полевых шпатах из интрузивных и метасоматических образований // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1986. – № 10. – С. 93–101.
18. Амузинский В.А. Геохимические особенности распределения золота в магматических породах Верхоянской антиклинальной зоны // Минералогия и геохимия производных гранитоидного магматизма. – Якутск: Институт геологии Якутского филиала СО АН СССР, 1981. – С. 89–98.

19. Зубков В.С. Роль мантийных углеводородов в металлогении литосферы // Металлогения, нефтегазоносность и геодинамика Северо-Азиатского кратона и орогенных поясов его обрамления: Материалы II Всеросс. металлогенического совещания. – Иркутск, 1998, 25–28 августа. – Иркутск: ООО «Сантай», 1998. – С. 48–49.
20. Абрамович И.И., Вознесенский С.Д., Маннафов Н.Г. Геодинамика и золотоносность Колымы (Россия) // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41. – № 1. – С. 43–53.
21. Русинова О.В., Русинов В.Л., Абрамов С.С., Кузнецова С.В., Висюта Ю.В. Околорудные изменения пород и физико-химические условия формирования золото-кварцевого месторождения Советского (Енисейский край, Россия) // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41. – № 4. – С. 308–328.
22. Остапенко Н.С. Основные факторы и механизмы эндогенной концентрации золота (на примере месторождений Приамурья): автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Благовещенск, 2007. – 46 с.
23. Томсон И.Н., Полякова О.П., Алексеев В.Ю., Баскина В.А. О двух типах углеродистых металллоносных пород // Геология рудных месторождений. – 2006. – Т. 48. – № 1. – С. 86–88.
24. Развозжаева Э.А., Прокофьев В.Ю., Спиридонов А.М., Мартихаева Д.Х., Прокопчук С.И. Благородные металлы и углеродистое вещество в рудах месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия) // Геология рудных месторождений. – 2002. – Т. 44. – № 2. – С. 116–124.
25. Русинов В.Л., Русинова О.В., Борисовский С.Е., Алышева Е.И. Состав метасоматических минералов золоторудного месторождения Сухой Лог как критерий его генетической связи с базит-гипербазитовым магматизмом // Доклады РАН. – 2006. – Т. 405. – № 5. – С. 661–665.
26. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Спиридонов А.И., Немеров В.К., Иванов А.И., Митрофанов Г.Л. Геодинамические условия формирования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба // Доклады РАН. – 2006. – Т. 407. – № 6. – С. 793–797.
27. Злобин В.А. Новые данные о геохимических особенностях и петрологических связях камптонитовых даек в золоторудных провинциях Сибири // Доклады РАН. – 2000. – Т. 373. – № 6. – С. 805–808.
28. Русинова О.В., Русинов В.Л. Метасоматический процесс в рудном поле Мурунтау (Западный Узбекистан) // Геология рудных месторождений. – 2003. – Т. 45. – № 1. – С. 75–96.
29. Дистанов Э.Г., Сотников В.И., Оболенский А.А., Борисенко А.С., Берзина А.П., Ковалев К.Р. Главные факторы формирования крупных и уникальных месторождений мантийно-коровых рудообразующих систем // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39. – № 7. – С. 870–881.
30. Комаров П.В., Томсон И.Н. О плюмах и их влиянии на формирование благороднометалльного оруденения в углеродсодержащих породах // Доклады РАН. – 2007. – Т. 415. – № 6. – С. 779–781.
31. Кучеренко И.В. Пространственно-временные и петрохимические критерии связи образования золотого оруденения с глубинным магматизмом // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1990. – № 10. – С. 78–91.
32. Кучеренко И.В. Концепция мезотермального рудообразования в золоторудных районах складчатых сооружений южной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2001. – Т. 304. – № 1. – С. 182–197.
33. Кучеренко И.В. Металлогения золота: приложение к мезотермальным месторождениям, образованным в несланцевом и черносланцевом субстрате горно-складчатых сооружений южной Сибири // Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых: Материалы Междунар. конф., посвящ. 80-летию основания в Томском политехническом университете первой в азиатской части России кафедры «Разведочное дело». – Томск, 2010, 5–8 октября. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 241–256.
34. Шер С.Д. Жильные изверженные породы основного состава в районе р. Бодайбо и их соотношения с кварцевыми жилами // Труды Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института. – 1959. – Вып. 4. – С. 104–114.
35. Кондратенко А.К., Шер С.Д. Метасоматические изменения жильных пород в Ленской золотоносной области и их возможное значение с точки зрения золотоносности // Вопросы геологии месторождений золота и золотоносных районов. – М.: ЦНИГРИ, 1968. – С. 312–314.
36. Кучеренко И.В., Грибанов А.П. Взаимоотношения дайковых образований с золоторудными кварцевыми жилами в Беркульском рудном поле // Известия Томского политехнического института. – 1968. – Т. 134. – С. 153–158.
37. Кучеренко И.В. Петрологические и металлогенические следствия изучения малых интрузий в мезотермальных золоторудных полях // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 1. – С. 49–57.
38. Рундквист И.К., Бобров В.А., Смирнова Т.Н. и др. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района // Геология рудных месторождений. – 1992. – Т. 34. – № 6. – С. 3–15.
39. 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 РАН. – 2000. – Т. 371. – № 1. – С. 88–92.
40. Кучеренко И.В. О фосфор-магний-титановой специализации золотоносных березитов // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 293. – № 2. – С. 443–447.
41. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Y. Femophilic elements in wallrock metasomatites and in ores of mesothermal gold deposits – newsletters of mantle deep // International Journal of applied and fundamental research. – 2011. – № 1. – P. 37–43.
42. Рундквист Д.В. О влиянии распределения температур горных пород на процессы метасоматического гидротермального минералообразования // Записки Всесоюз. минералогич. об-ва. – 1966. – Ч. 95. – Вып. 5. – С. 509–525.

Поступила 01.06.2012 г.

УДК 553.411.04/071(571.5)

ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МЕЗОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА. Ч. 1. ТЕКТОНИЧЕСКИЙ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИИ

И.В. Кучеренко

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

Приведены данные, раскрывающие разнообразие геологических ситуаций локализации мезотермальных золотых месторождений южного горно-складчатого обрамления Сибирского кратона, образованных в кристаллическом и черносланцевом субстрате в позднем рифее (Енисейский район), раннем палеозое (Кузнецко-Алатаусский район), позднем палеозое (Муйский, Ленский районы). Показано, что прогнозное значение имеют контроль оруденения глубинными разломами, геодинамические режимы коллизии на активных континентальных окраинах и активизации внутриконтинентальных рифтов. Оба критерия – тектонический и геодинамический, рекомендуется включить в состав прогнозно-поискового комплекса.

Ключевые слова:

Мезотермальные месторождения золота, прогнозно-поисковый комплекс, тектонический, геодинамический критерии.

Key words:

Mesothermal gold deposits, prognosis-search complex, tectonic, geodynamic criteria.

Введение

В современной прогнозно-поисковой практике существуют, помимо прочих, две ключевые проблемы, от решения которых зависит открытие новых месторождений и, следовательно, наращивание неуклонно сокращающихся запасов чрезвычайно ценного высоколиквидного металла золота.

Первая заключается в необходимости усиления эффективности выделения (локализации) перспективных площадей для организации поисков промышленных не вскрытых эрозией месторождений, но залегающих на экономически приемлемых глубинах. Это, в свою очередь, предполагает решение второй проблемы – совершенствование известных и разработку новых эффективных глубинных методов поисков в сочетании с созданием соответствующих аппаратуры и других технических средств.

Выделение перспективных площадей по совокупности прогнозных критериев, в том числе в условиях дефицита выраженных на поверхности и вблизи нее поисковых признаков, опирается, как известно, на знание законов, управляющих процессами рудообразования, и геологических ситуаций, по возможности типовых, узнаваемых при прогнозировании оруденения. Приходится, однако, констатировать, что в приложении к золоту познание законов образования месторождений отстает от потребностей.

Это выражается в конкуренции четырех с вариантами концепций (гипотез) образования промышленных месторождений золота. Гранитогенная концепция предполагает генерацию металлонесных растворов в коровых очагах гранитоидных расплавов, базальтогенная – в нижнекоровых-мантийных магматических камерах. Источниками золота и, надо думать, сопровождающих его металлов служат гранитные или базальтовые расплавы. Согласно популярной метаморфогенно-гидротермальной концепции, предложенной для объясне-

ния условий образования месторождений, локализованных в толщах черных сланцев, источниками золота и других металлов служат гидротермально-осадочная, вулканогенно-гидротермальная сингенетичная породам минерализация или сверхкларковые массы металлов, накопленные при седиментации. Во всех случаях металлы экстрагируются из пород и переотлагаются при региональном метаморфизме под воздействием растворов метаморфогенного и/или магматогенного происхождения. Полигенная концепция описывает условия образования уникальных по запасам золота месторождений посредством «ступенчатого» его накопления в ходе нескольких не связанных между собой геологических процессов.

Сосуществование альтернативных представлений об условиях образования одних и тех же, как правило, крупных и уникальных месторождений означает, что авторами-разработчиками концепций наряду с немногочисленными фактами, однообразно повторяющимися во многих месторождениях, достоверность которых очевидна, использованы, как правило, более многочисленные данные сомнительной репутации, интерпретация которых к тому же в силу объективных или субъективных обстоятельств содержит сильный личностный акцент. К числу упомянутых фактов, например, относится тектонический контроль месторождений, к сомнительным данным – противоречивые оценки дорудной золотоносности черных сланцев одних и тех же литотипов и свит в диапазоне от первых мг/т до первых г/т. Вызывает затруднения интерпретация результатов анализов изотопного состава химических элементов для диагностики их возможных источников и т. д.

Доказательная база концепций такова, что корректная оценка каждой из них на предмет соответствия реальному повторяющемуся во времени и пространстве рудообразующему процессу невозможна без привлечения новых достоверных фак-

тов, способных существенно усилить аргументацию одной из них.

В статье приведены удовлетворяющие этому требованию проверяемые факты, которые пока не вовлечены в широкий научный оборот, но пригодны для совершенствования теории образования мезотермальных месторождений золота, использования в качестве критериев их прогнозирования и в поисковой практике. Ранее [1, 2] в результате обсуждения этих фактов были сформулированы выводы о геолого-генетической однородности противопоставляемых многими [3–5 и др.] золотых месторождений, образованных в кристаллическом и черносланцевом субстрате южного горноскладчатого обрамления Сибирского кратона,

и их принадлежности к магматогенным мезотермальным. Наблюдаемые в месторождениях той и другой совокупности различия, выраженные в усредненных содержаниях золота в рудах, больших в кристаллической, меньших в черносланцевой средах, в обратных соотношениях масштабов запасов металла, в некоторых особенностях околорудного метасоматизма, обусловлены специфическим влиянием среды рудообразования, но не принципиальными отличиями в сущности инициирующих рудообразование геологических процессов. Поэтому обсуждаемые ниже прогнозно-поисковые критерии в равной степени распространяются на месторождения, залегающие в том и другом субстрате.

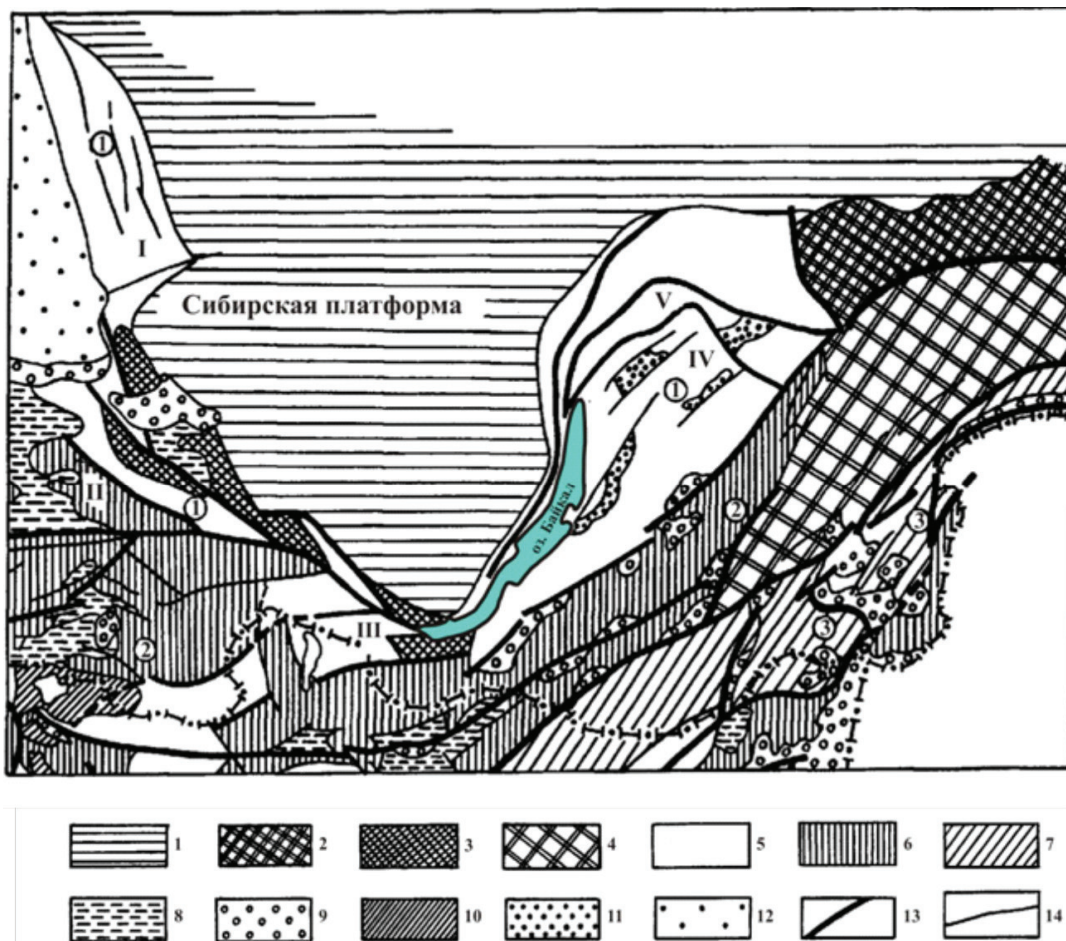


Рис. 1. Схема тектонического районирования Южно-Сибирской металлогенической провинции (по Э.Г. Дистанову и др., 1985 г.). 1 – Сибирская платформа; 2 – Алданский щит; 3 – выступы древних структур, сложенных породами архея, в складчатом обрамлении Сибирской платформы; 4 – области раннепротерозойской складчатости Станового хребта; 5 – области байкальской (позднепротерозойской) складчатости и выступы пород основания в каледонских структурах; 6 – области каледонской складчатости; 7 – области каледонско-герцинской консолидации; 8 – герцинские унаследованные и наложенные (орогенные) прогибы; 9 – мезозойские терригенно-вулканогенные прогибы и впадины; 10 – мезо-кайнозойские терригенные межгорные впадины; 11 – кайнозойские впадины; 12 – чехол Западно-Сибирской плиты; 13 – главные глубинные разломы; 14 – прочие разломы.
1–3 – металлогенические зоны (цифры на схеме): 1 – Байкало-Саяно-Енисейская (области докембрийской складчатости), 2 – Алтае-Саяно-Забайкальская (области салаирско-каледонской складчатости), 3 – Восточно-Забайкальская (структуры каледонско-герцинской консолидации с интенсивно проявленными процессами мезозойской тектоно-магматической активизации).
I–V – золоторудные районы (цифры на схеме): I – Енисейский, II – Кузнецко-Алатаусский, III – Окино-Китойский, IV – Северо-Забайкальский (Муйский), V – Ленский

В первой части статьи рассмотрены тектонический и геодинамический, во второй — петрологический, в третьей — петрохимический и геохимический критерии.

Тектонический и геодинамический критерии

Согласно результатам палеогеодинамических и палеотектонических реконструкций, мезотермальные месторождения золота в составе рудных зон, рудных районов, рудных узлов образуются на активных континентальных окраинах в режимах коллизии островодужных этапов геологического развития земной коры и во внутриконтинентальных рифтах в периоды их тектоно-магматической активизации. Рудоносные блоки земной коры отличаются разнообразием структурных форм, представленных антиклинориями, горстами, выступами фундамента, нередко в сопровождении очагово-купольных построек, синклинориями, прогибами, грабенами. Во всех случаях оруденение контролируется глубинными и оперяющими их разломами, как правило, размещено в зонах деформационного воздействия разломов на разнообразный по составу и происхождению вмещающий рудные тела субстрат. Глубинный статус разломов подчеркивается присутствием в них базит-ультрабазитовых интрузий, образованных, в том числе, синхронно с рудообразованием и в связи с геологическими процессами, инициирующими рудообразование.

Типовые геодинамические режимы и некоторые геологические ситуации иллюстрируются материалами на примере ряда золоторудных районов южного горно-складчатого обрамления Сибирского кратона (рис. 1).

Размещение многочисленных мезотермальных месторождений золота в Кузнецком Алатау контролируется Кузнецко-Алтайской субмеридиональной, круто, под углами более 60° , падающей на восток (под Сибирский палеоконтинент) зоной глубинных разломов (рис. 2), образованной первоначально, на венд-средне-кембрийском островодужном этапе функционирования активной западной окраины Сибирского палеоконтинента, как палеозона субдукции [6]. В дальнейшем, начиная со среднего кембрия и до силура включительно, эта зона разломов функционировала как палеозона коллизии (островная дуга — континент) с последующим переходом территории в континентальный режим.

В этот период в режиме коллизии образованы мартайгинский, тельбесский и другие магматические комплексы Кузнецкого Алатау, составившие основу мартайгинской региональной формации гранитоидных батолитов пестрого состава (по Ю.А. Кузнецову). С поздним базальтоидным этапом становления мартайгинского флюидно-магматического комплекса связано образование Бериккульского, Центрального, Комсомольского и других мезотермальных золотых месторождений в генетической связи с базальтоидным магматизмом [7]. Коллизионный геодинамический режим образова-

ния одного из месторождений этого района (Бериккульского) подтвержден в [7] петрохимическими данными, характеризующими две генерации послегранитных дорудных, одну генерацию внутрирудных, две генерации послерудных даек умеренно щелочных долеритов, завершающих становление мартайгинского комплекса, и обработанными по методике [8].

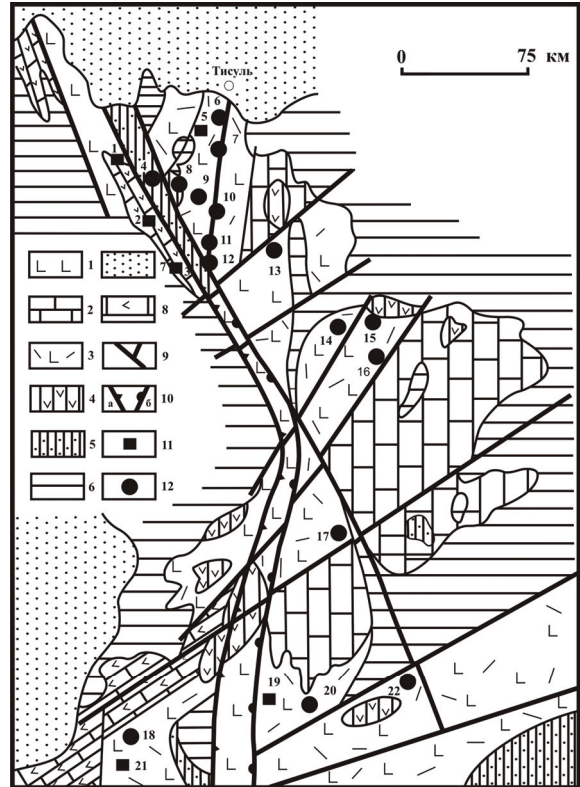


Рис. 2. Схема размещения золоторудных месторождений в главных типах тектонических структур Кузнецкого Алатау (по [6]). Типы тектонических структур: 1 — океаническая (R_3-E_1); 2 — окраинно-континентальная (R_3-E_1); 3 — ранняя островодужная ($V-E_1$); 4 — поздняя островодужная (E_1-S); 5 — коллизионная (E_2-S); 6 — рифтогенная внутриплитная (D_{1-2}); 7 — мезозойский (J-K) чехол Западно-Сибирской плиты; 8 — палеоокеанические острова с карбонатным чехлом и базальтовым толеитовым основанием (R_3-E_1); 9 — Кузнецко-Алтайский глубинный разлом и оперяющие его разрывы (палеозона субдукции в $V-E_1$; палеозона коллизии в E_2-S); 10 — направление движения структур субдукции (а), коллизии (б). Типы месторождений: 11 — золото-скарновые; 12 — золото-сульфидно-кварцевые.

Золоторудные месторождения: 1 — Ольгинское; 2 — Филатьевское; 3 — Федоровско-Талановское; 4 — Федотовское; 5 — Натальевское; 6 — Комсомольское; 7 — Бериккульское; 8 — Центральное; 9 — Кундат-Кундустюльская золоторудная зона; 10 — Первомайское; 11 — Ударное; 12 — горы Зеленой; 13 — Саралинское; 14 — Базанское; 15 — Коммунарское; 16 — Балахчинское; 17 — Федоровско-Магызынская золоторудная зона; 18 — Ульменское; 19 — Лебедское (Чанышский золоторудный район); 20 — Верхнемрасское; 21 — Синухинское (Горный Алтай); 22 — Казасский рудный район (Западный Саян)

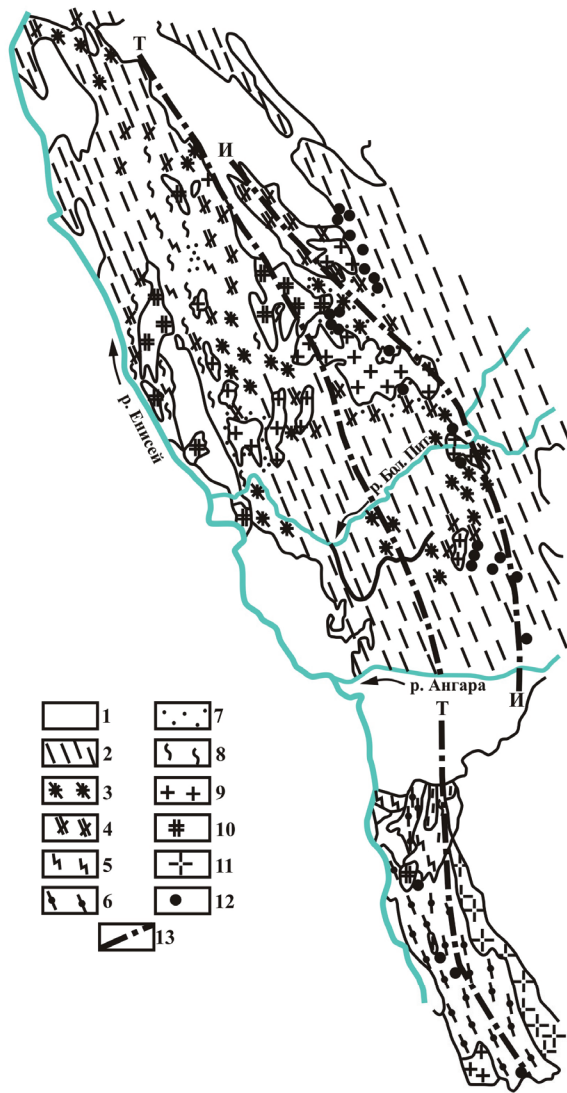


Рис. 3. Схема распределения главнейших месторождений и рудопроявлений золота в метаморфических зонах Енисейского края (по [9], с дополнениями): 1 – неметаморфизованные отложения; 2–6 – метаморфизованные породы: 2 – хлорит-серицитовая субфация зеленосланцевой фации, 3 – хлорит-биотитовой субфации зеленосланцевой фации, 4 – эпидот-амфиболитовой фации, 5 – амфиболитовой фации, 6 – гранулитовой фации; 7 – ореолы контактового метаморфизма; 8 – площади проявления ультраметаморфизма и гранитизации; 9 – интрузивно-анатектические позднеорогенные гранитоиды; 10 – метаморфогенные палингенно-метасоматические синорогенные гранитоиды; 11 – ультраметаморфогенные палингенно-анатектические гранитоиды архейского кристаллического основания; 12 – проявления золота; 13 – зоны глубинных разломов (по Е.С. Постельникову, 1980 г.); И – Ишимбинского; Т – Татарского

Многочисленные золоторудные месторождения Енисейского района в Заангарской его части в составе Центральной золоторудной зоны контролируются Татарско-Ишимбинской зоной глубинных разломов, залегают в слагающих восточный склон Центрального антиклинория допалеозойских толщах углеродистых карбонатно-терриген-

ных сланцев, на юге района – в Канском выступе архейского фундамента Сибирского кратона (рис. 3) и образованы в геодинамическом режиме внутриконтинентального рифтогенеза.

В допалеозойской истории геологического развития района по геологическим и изотопно-геохимическим данным выделяется три этапа (млрд л): мезопротерозойский (1,6...1,05), ранний (1,05...0,8) и поздний (0,8...0,6) неопротерозойский [10].

Рудоконтролирующая Татарско-Ишимбинская зона глубинных разломов заложена в раннемезопротерозойское время в сопровождении перикратонного прогиба на активной юго-западной окраине Сибирского кратона с последующим отложением в прогибе вулканогенно-осадочных, терригенных и карбонатно-терригенных осадочных серий общей мощностью от 10 до 14 км.

На раннепротерозойском этапе гренвильской орогении осадочные толщи наиболее древней сухопитской серии подверглись деформации, метаморфизму и гранитизации – наиболее интенсивным в Татарско-Ишимбинской системе разломов с образованием в раннюю синколлизионную эпоху (1050...950 млн л) гранито-гнейсовых куполов. Дальнейший рост гранито-гнейсовых куполов продолжился в позднеколлизионную эпоху (880...860 млн л).

Золотое оруденение в зоне Татарско-Ишимбинской системы глубинных разломов образовано в связи с рифтогенными внутриплитными тектоно-магматическими процессами постколлизионного позднего неопротерозойского этапа. По данным Ag-Ag изотопного датирования Советское, Эльдорадинское, Васильевское и другие месторождения золото-кварцевого типа формировались в возрастном диапазоне 830...775 млн л, Олимпиадинское, Ведугинское, Боголюбовское, Попутнинское и другие месторождения золото-сульфидного прожилково-вкрапленного типа – в диапазоне 720...711 млн л. Авторы полагают [10], что процессам многоэтапного рифтогенеза и внутриплитного магматизма принадлежит решающая роль в зарождении, формировании и эволюции рудообразующих и рудоконцентрирующих систем.

Выступы архейского фундамента Сибирского кратона, обрамляющие и сопровождающие их глубинные разломы контролируют размещение мезотермальных золоторудных месторождений в Окино-Китойском районе на юго-востоке Восточного Саяна в северном обрамлении Гарганского выступа и в Северо-Забайкальском (Муйском) районе на западной, восточной периферии и внутри Муйского выступа (рис. 4).

В обрамлении Муйского выступа осадочные, вулканогенные структурно-вещественные комплексы образованы в основном в допалеозойские эпохи, включая поздний рифей-венд (кедровская, водораздельная свиты углеродистых терригенных, карбонатно-терригенных сланцев, келянская свита покровных дифференцированных вулканитов в составе позднерифейского субширотного Байкало-Витимского офиолитового пояса, мухтунная вулканогенно-осадочная свита в раннекембрийском

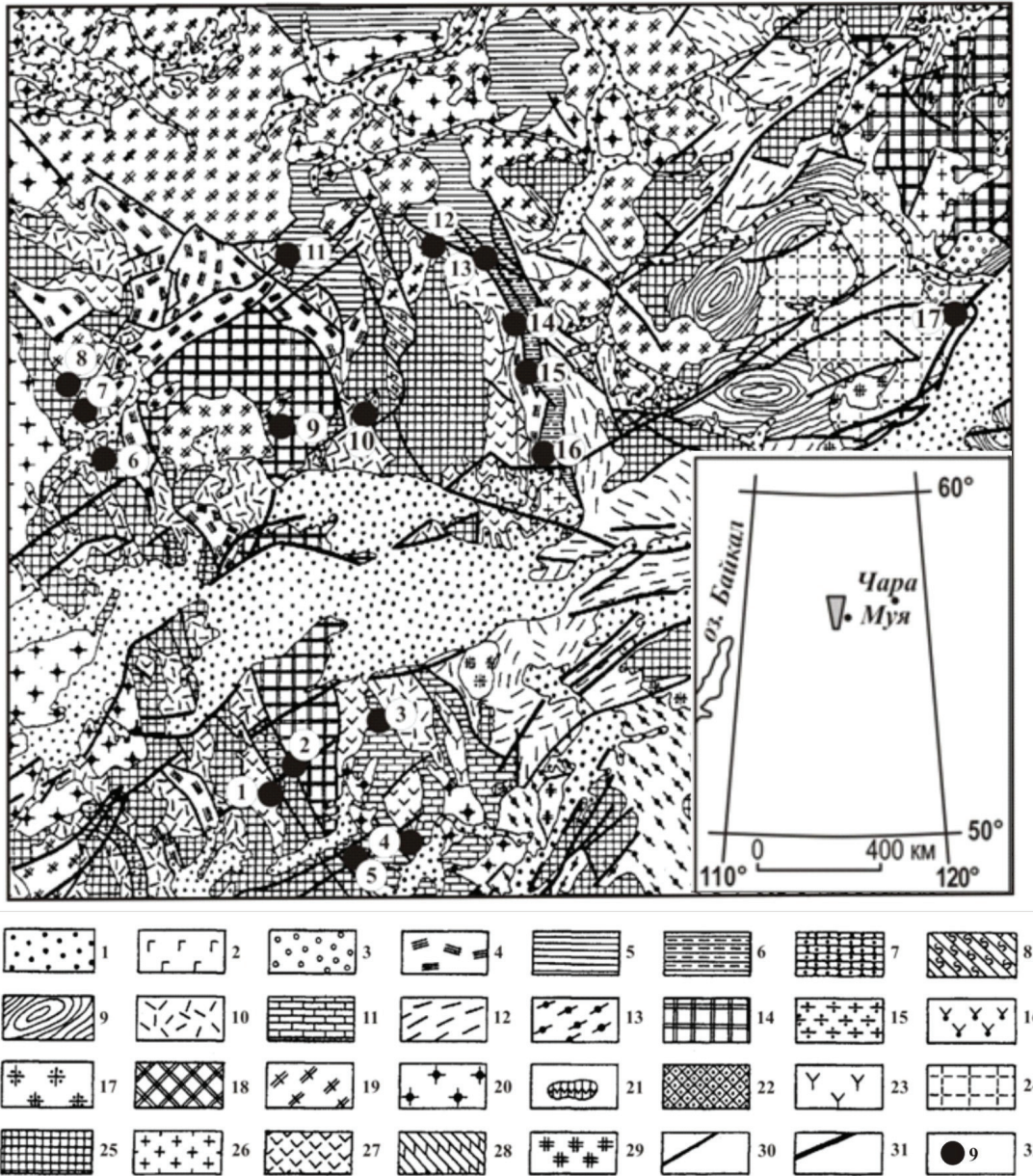


Рис. 4. Геолого-тектоническая позиция золоторудных месторождений в Северо-Забайкальском (Муysком) районе (геологическая основа по [11], с упрощениями и изменениями; использованы материалы Е.А. Намолова, 1974 г., И.А. Томбасова и др., 1978 г.). Стратифицированные образования: 1 – четвертичные отложения; 2 – кайнозойские вулканогенные образования; 3 – юрские отложения (чепинская и станнахская свиты); 4 – кембрийские терригенно-вулканогенные отложения; 5–7 – поздний протерозой: 5 – патомская серия в районе Бодайбинского синклиналя и его бортов, 6 – патомская серия в грабен-синклиналях (сеньская, шумнинская и джелагунская свиты), 7 – мухтунная свита; 8 – средний протерозой (падринская свита); 9–12 – ранний протерозой: 9 – удоканская серия, кодарская подсерия, 10 – муйская серия, верхняя подсерия (келянская и нижнегорбылюкская свиты), 11 – муйская серия, нижняя подсерия, 12 – сюльбанская серия и ее аналоги; 13 – поздний архей Становой области; 14 – архейские образования Муйской (западной) и Чарской (восточной) глыб.

Интрузивные образования: 15–16 – мезозой: 15 – гранитоиды гуджирского и аманатского комплексов нерасчлененные, 16 – аманатский комплекс основных и ультраосновных пород; 17–19 – палеозой: 17 – гранитоиды сакунского комплекса, 18 – сакунский и атарханский комплексы основных пород объединенные, 19 – конкудеро-мамаканский и витимканский комплексы нерасчлененные; 20–21 – поздний протерозой: 20 – гранитоиды мамско-оронского и баргузинского комплексов объединенные, 21 – икатский комплекс основных пород; 22 – средний протерозой, витимканский комплекс; 23–27 – ранний протерозой: 23 – муйский комплекс гипербазитов, 24 – чуйско-кодарский комплекс гранитоидов, 25 – ничатский, куандинский, становой и муйский комплексы гранитоидов объединенные, 26 – реоморфические гранитоиды Чарской глыбы, 27 – муйский, каларский, тепроканский комплексы основных пород; 28–29 – архей: 28 – чарнокиты, 29 – ультраметаморфические гранитоиды, гранито-гнейсы и мигматиты.

Разломы: 30–31 – докайнозойские, в том числе 31 – активизированные в кайнозое.

32 – Месторождения и проявления золоторудной минерализации: 1 – Западное; 2 – Ирокиндинское; 3 – Кедровское; 4 – Витимконское; 5 – Тилишминское; 6 – Богодиканское; 7 – Ирбинское; 8 – Юбилейное; 9 – Самокутское; 10 – Каменское; 11 – Чаянго-Джелагунское; 12, 13 – Каралон-Нижнеорловское; 14 – Уряхское; 15 – Таллоинское; 16 – Бахтарканское; 17 – Верхне-Сакуканское

Ирокиндинском прогибе, муйский и другие плуто-нические комплексы). В послепротерозойское время на территории существовал континентальный режим и образовано несколько в основном позднепалеозойских (330...290 млн л) плуто-нических (гранитоидных) комплексов в составе гигантского Ангаро-Витимского батолита.

Мезотермальные золоторудные месторождения района размещены и образуют цепочки в зонах деформационного воздействия систем глубинных разломов – Келянской вдоль западной, Тулдуньской вдоль восточной окраин Муйского выступа архейского фундамента, Сюльбанской на восточном окончании Байкало-Витимского офиолитового пояса. Разнообразен вмещающий месторождения субстрат: архейский ультраметаморфический (Ирокиндинское, Самокутское), раннепротерозойский гранитоидный кодарского комплекса (Верхне-Сауканское в юго-западном обрамлении Чарского выступа архейского фундамента), поз-

днерифейский гранитоидный муйского комплекса (Западное), позднерифейский черносланцевый кедровской, водораздельной свит, покровно-вулканический келянской свиты (Кедровское, Каралонское, Ирбинское, Юбилейное, Уряхское), позднепалеозойский гранитоидный конкудеро-мамаканского комплекса (Богодиканское) и др. Месторождения образованы в геодинамическом режиме внутриконтинентального рифтогенеза в позднепалеозойскую эпоху (275...285 млн л назад) [12].

Золоторудные месторождения Ленского района залегают в позднерифейских сложно-дислоцированных толщах углеродистых терригенных, карбонатно-терригенных сланцев хомолхинской, имняхской, аунакитской, вачской, догалдынской и других свит, выполняющих Бодайбинский прогиб (синклиорий шириной 90 км), унаследовавший раннепротерозойский палеоавлакоген северо-восточного простирания в фундаменте Сибирского кратона (рис. 5). Борта прогиба ступенчато

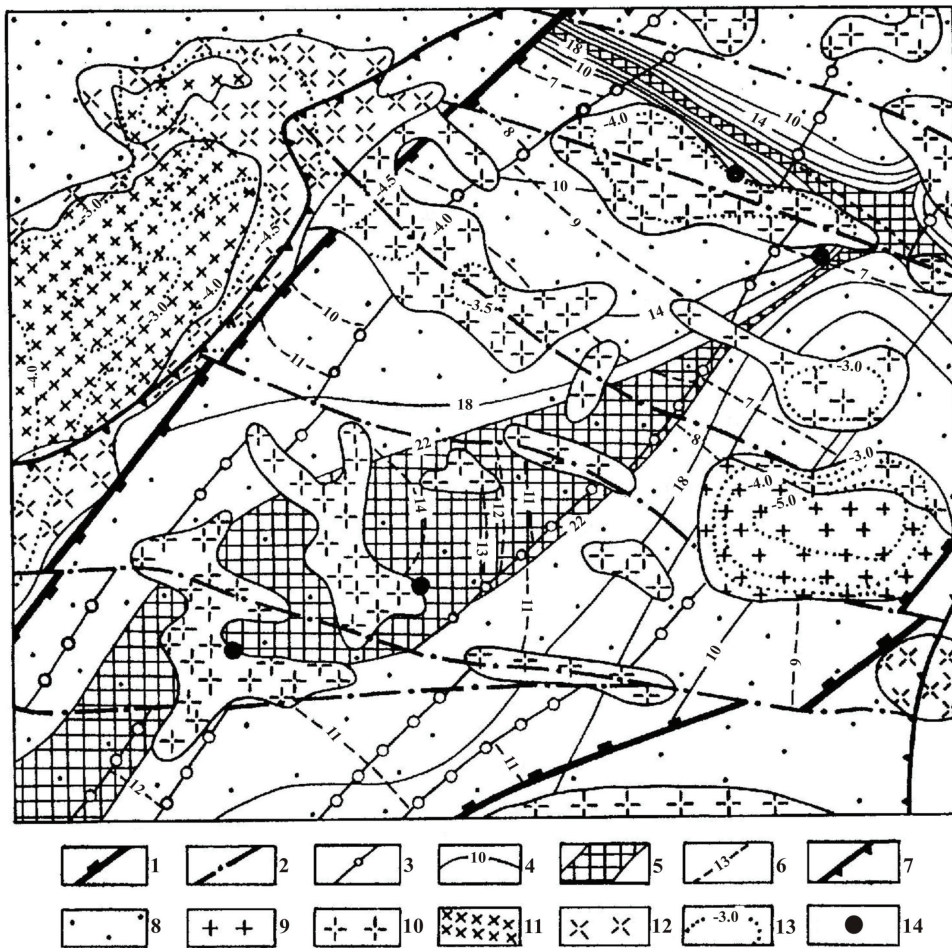


Рис. 5. Схема объемного геологического строения Ленского золоторудного района (по [13]): 1) сквозные разломы, ограничивающие нижнепротерозойский палеоавлакоген; 2) магмаконтролирующие разломы; 3) прочие разрывные нарушения; 4) изогипсы глубин основания нижнепротерозойского палеоавлакогена, в км; 5) положение основания нижнепротерозойского палеоавлакогена между изогипсами 22 км; 6) изогипсы глубин кровли нижнепротерозойского палеоавлакогена, в км; 7) граница синклиория по геологическим данным; 8) карбонатно-терригенный осадочно-метаморфический комплекс верхнего протерозоя; биотитовые граниты; 9) выходящие на поверхность, 10) скрытые; гранит-пегматиты; 11) выходящие на поверхность, 12) скрытые; 13) изогипсы глубин подошвы гранитоидов, в км; 14) золоторудные месторождения

по глубинным разломам погружаются к центральной (осевой) части палеоавлакогена. Прогиб окружен очагово-купольными сооружениями Тонодского, Нечерского и других поднятий. Многокилометровой мощности черносланцевые толщи в прогибе-палеоавлакогене насыщены «слепыми» телами гранитоидов предположительно позднепалеозойского конкудеро-мамаканского комплекса – составной части Ангаро-Витимского батолита. Апикальная часть одного из тел обнажена на дневной поверхности – Константиновский шток в районе месторождения Сухой Лог.

В приосевой части прогиба осадочные толщи пересечены поясом малых интрузий северо-северо-восточного (17°) простирания протяженностью около 400 км и шириной до 40 км. Малые интрузии, преимущественно дайки, принадлежат раннему аглан-янскому гранитоидному и более позднему кадали-бутуинскому базитовому (долеритовому) комплексам. Sm-Nd радиологический возраст долеритов составляет 312 ± 59 млн лет [14].

Золоторудные месторождения района – Высочайшее, Сухой Лог, Вернинское, Невское, Ожерелье, Кавказ, расположены в пределах дайкового пояса над наиболее погруженным разбитым глубинными разломами основанием прогиба-палеоавлакогена веерообразно в вертикальном направлении и образованы, как и в соседнем Северо-Забайкальском районе, в позднепалеозойскую эпоху (Rb-Sr радиологический возраст, в частности, месторождения Сухой Лог 315 млн лет [15]) в геодинамическом режиме внутриконтинентального рифтогенеза – тектоно-магматической активизации.

Обсуждение результатов и выводы

На примере ряда золоторудных районов с мезотермальными месторождениями можно видеть разнообразие геологических ситуаций размещения оруденения. Разнообразен по составу, происхождению, возрасту вмещающий оруденение субстрат, разнообразны в верхних горизонтах земной коры региональные и локальные рудовмещающие структуры, созданные в ходе и в результате геологических процессов, задолго и непосредственно предшествовавших рудообразованию. Очевидно, зарождение рудообразующих систем происходит на значительных глубинах, и этот вывод согласуется с тесной пространственно-временной сопряженностью рудообразования с базитовым магматизмом, обсуждаемой во второй части статьи. Крупные структурные элементы земной коры на ее верхних уровнях оказывают лишь некоторое влияние на положение месторождений, обусловленное, скажем, направлением потоков металлоносных растворов в те или иные уже локальные проницаемые структуры.

Незыблем везде контроль рудных районов, рудных зон, рудных узлов, рудных полей глубинными разломами, подчеркиваемый концентрацией оруденения разных масштабов в зонах их деформа-

ционного воздействия на субстрат земной коры. Глубинный статус разломов, обеспечивающих пути перемещения расплавов и металлоносных растворов из очагов генерации в верхние горизонты земной коры до уровней циркуляции грунтовых вод, смешение с которыми металлоносных растворов обуславливает тотальное нарушение химического равновесия в породно-флюидных системах и, как следствие, массовое отложение рудного вещества, доказывается обычным присутствием в них базит-гипербазитовых интрузий. Другими словами, контроль разномасштабного оруденения глубинными разломами реализуется через их раствороподводящую функцию. Высокая проницаемость локальных трещинно-разломных структур объясняет размещение в них и рудных тел.

Таким образом, природа постоянно на всех уровнях, от маломощных минерализованных зон в объеме месторождений до рудоносных блоков земной коры масштабов рудных зон, рудных и металлогенических поясов, демонстрирует оказываемое металлоносными растворами предпочтение перемещаться в пространстве струями, потоками по более проницаемым структурам – разнопорядковым разломам, зонам расщепления и дробления, а не по труднее в общем случае преодолеваемому поровому пространству горных пород. Вещественным выражением этого предпочтения служат в дополнение к упомянутым выше прямые признаки – оставленные растворами следы в виде околоразломных, околотрещинных оторочек наиболее гидротермально измененных пород и заполняющих разломы рудно-минеральных комплексов. Пропагандируемое метаморфогенно-гидротермальной концепцией рудообразования, декларирующей извлечение золота из пород, представление, согласно которому в сильно трещиноватой, а потому высокопроницаемой черносланцевой среде растворы предпочитают в своем движении крупнообъемное, но труднопреодолимое поровое пространство, способное обеспечить поставки значительной массы золота (металлов), а не узко локальные, но проницаемые разломы и трещины с ограниченными в силу малых объемов возможностями экстракции из них значительных количеств металлов, остается не объясненным. Объяснить это действительно трудно, если не невозможно.

С другой стороны, с позиции представлений о дренирующей функции разломно-трещинных структур, способных аккумулировать поступающие из пор поднимающиеся растворы, остается открытым, судя по публикациям, вопрос о том, почему только глубинные и сообщающиеся с ними (оперяющие) разломы более высоких порядков дренируют растворы и контролируют месторождения, а множество достаточно крупных разломов и трещин, не имеющих глубинный статус, но расположенных на путях подъема и возможной фильтрации растворов по поровому пространству пород, особенно в сланцевых толщах, не обладают такой способностью, поскольку не содержат упо-

мянутых следов и не контролируют оруденение. Без содержательного ответа на этот вопрос считать породы источниками золота (и других металлов), будто-бы экстрагируемого из них в количествах, сопоставимых с реальными запасами его в месторождениях, было бы преждевременно.

Приведенные факты и соображения согласуются с отсутствием в золотоносных районах минеральных признаков фильтрации горячих металлоносных растворов во вмещающих месторождения кристаллических породах и толщах черных сланцев на разных высотах и гипсометрических уровнях за пределами локальных приразломных околорудных метасоматических ореолов. На обширных межрудных пространствах в значительном (до 2000 м) высотном диапазоне современного рельефа даже древние, включая архейские и раннепротерозойские ультраметаморфические и плутонические (гранитоиды) породы, например, сохраняются в их первозданном виде, а в черных сланцах минеральные парагенезисы, образованные на этапах предшествовавшего рудообразованию регионального метаморфизма нагревания, не затронуты гидротермальными изменениями этапов последующего рудообразования и сопровождающего метасоматизма. Очевидно, без химического разложения минералов-носителей золота и других металлов невозможен переход их в раствор, а следовательно, и миграция. Этот факт противоречит идее извлечения золота (металлов) из крупных объемов черносланцевых толщ.

В свою очередь, на многочисленных примерах можно убедиться в том, что околорудные метасоматические ореолы в любом субстрате в тыловых зонах обогащены поступившим извне золотом (металлами), а в периферийных зонах и вне ореолов содержат его (их) на околорудных уровнях [2].

Все это означает, что предлагаемая некоторыми авторами [16–18] идея о существовании сопряженных областей выноса–привноса металлов в плане решения проблемы источников рудного вещества на обсуждаемых рудоносных площадях не подтверждается – не отражает реальной ситуации.

Вопрос о геодинамических режимах образования мезотермальных месторождений золота в современных условиях решается без альтернативных вариантов.

Обычна одноактная реализация того или другого геодинамического режима, сопровождаемая генерацией приобретающих золотопродуцирующую способность силикатных расплавов, на других, помимо обсуждаемых, рудоносных площадях. Дополнительным примером, в частности, служат золотоносные штокверки Васильковского, Туранского, Орловского месторождений в Кокшетауском районе, Когадыр в Кендыктасе Кокшетау–Северо-Тяньшаньской структурно-формационной зоны, образованные в позднем ордовике синхронно с коллизионными гранитными плутонами зерендинского, крыккудукского, курдайского комплексов [19]. Известны примеры смены во времени, в частности, в возрастном диапазоне 155...100 млн л на одной рудоносной территории – в Яно-Колымском поясе коллизионного геодинамического режима рифтогенным внутриплитным (орогенной тектоно-магматической активизации) [20].

По мере совершенствования методов реконструкции геологических процессов в геодинамическом аспекте не исключены доказательство, конкретизация, уточнение условий образования мезотермальных месторождений золота и в других геодинамических режимах формирования земной коры.

Таким образом, для целей прогнозирования мезотермального золотого оруденения необходимо решение следующих задач.

Первая заключается в том, чтобы в истории геологического развития исследуемой территории посредством реконструкции геодинамических режимов и их эволюции во времени и пространстве выделить эпохи потенциального (вероятного) рудообразования. Вторая сводится к локализации перспективных площадей в зонах деформационного воздействия глубинных разломов, существовавших (функционировавших) в прогнозируемые эпохи.

Успешное решение обеих задач призвано обеспечить эффективное участие тектонического и геодинамического критериев наряду с другими в составе прогнозно-поискового комплекса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию. 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. Концепция мезотермального рудообразования в золоторудных районах складчатых сооружений южной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2001. – Т. 304. – № 1. – С. 182–197.
2. 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.
3. Гаврилов А.М., Кряжев С.Г. Минералого-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 8. – С. 3–16.
4. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
5. Лаверов Н.П., Чернышов И.В., Чугаев А.В., Баирова Э.Д., Гольцман Ю.В., Дистлер В.В., Юдовская М.А. Этапы формирования крупномасштабной благороднометалльной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения // Доклады РАН. – 2007. – Т. 415. – № 2. – С. 236–241.
6. Алабин Л.В., Калинин Ю.А. Металлогения золота Кузнецкого Алатау. – Новосибирск: Изд-во СО РАН НИЦ ОИГМ, 1999. – 237 с.
7. Кучеренко И.В. Петрологические и металлогенетические следствия изучения малых интрузий в мезотермальных золоторуд-

- ных полях // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 1. – С. 49–57.
8. Миронов Ю.В. Соотношение титана и калия в базальтах как индикатор тектонической обстановки // Доклады АН СССР. – 1990. – Т. 314. – № 6. – С. 1484–1487.
 9. Ли Л.В. О связи формирования золоторудных месторождений с процессами прогрессивного регионального метаморфизма в Енисейском кряже // Рудоносность и металлогения структур Енисейского кряжа. – Красноярск: Красноярское кн. изд-во, 1974. – С. 102–113.
 10. Ножкин А.Д., Борисенко А.С., Неволько П.А. Позднепротерозойский рифтогенный и внутриплитный магматизм, золото и золото-урановое оруденение Енисейского кряжа // Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых: Матер. Междунар. конф., посвящ. 80-летию основания в Томском политехническом университете первой в азиатской части России кафедры «Разведочное дело». – Томск, 2010, 5–8 октября. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 266–274.
 11. Замираев С.М., Грабкин О.В., Мазукабзов А.М. и др. Геология и сейсмичность зоны БАМ (от Байкала до Тынды). Структурно-вещественные комплексы и тектоника. – Новосибирск: Наука, 1983. – 190 с.
 12. Кучеренко И.В. Позднепалеозойская эпоха золотого оруденения в докембрийском обрамлении Сибирской платформы // Известия АН СССР. Сер. геологическая. – 1989. – № 6. – С. 90–102.
 13. Фельдман А.А., Потоцкая Е.А., Ковалева Л.А. и др. Объемное изучение глубинного строения одного из золоторудных районов по геолого-геофизическим данным // Геофизические исследования при прогнозировании и поисках эндогенных месторождений. – М.: ЦНИГРИ, 1979. – С. 9–15.
 14. Рундквист И.К., Бобров В.А., Смирнова Т.Н. и др. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района // Геология рудных месторождений. – 1992. – Т. 34. – № 6. – С. 3–15.
 15. 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 РАН. – 2000. – Т. 371. – № 1. – С. 88–92.
 16. Лось В.Л., Гольдберг И.С., Абрамсон Г.Я. Геохимические системы рудных объектов: примеры, модель, генетические и поисковые аспекты // Геология и охрана недр. – 2003. – № 1. – С. 24–33.
 17. Ганжа Г.Б., Ганжа Л.М. Золото-битумная минерализация в черносланцевой толще, Центральная Колыма // Руды и металлы. – 2004. – № 4. – С. 24–32.
 18. Плюшев Е.В., Кашин С.В., Молчанов А.В., Шатов В.В. Методы петрографо-геохимического картирования и прогнозно-металлогенического анализа потенциальных рудных узлов и полей гидротермально-метасоматического типа // Поисковые геолого-геохимические модели рудных месторождений: Матер. II Всеросс. конф. по прикладной геохимии. – Воронеж, 2009, 26–28 февраля. – Воронеж: ИП Гончаровой, 2009. – С. 93–96.
 19. Рафаилович М.С. Нетрадиционные месторождения золота Казахстана // Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых: Матер. Междунар. конф., посвящ. 80-летию основания в Томском политехническом университете первой в азиатской части России кафедры «Разведочное дело». – Томск, 2010, 5–8 октября. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 368–373.
 20. Волков А.В., Егоров В.Н., Прокофьев В.Ю., Сидоров А.А., Горячев Н.А., Бирюков А.В. Месторождения золота в дайках Яно-Колымского пояса // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 4. – С. 311–337.

Поступила 18.06.2012 г.

УДК 550.831.01

РЕШЕНИЕ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ ГРАВИМЕТРИИ ДЛЯ СФЕРИЧЕСКИХ АППРОКСИМИРУЮЩИХ ТЕЛ. АЛГОРИТМЫ

В.И. Старостенко, Ю.В. Пятаков*

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, г. Киев
*Воронежский государственный университет инженерных технологий
E-mail: pyatakovjv@mail.ru

Рассмотрены математические постановки, и приведены алгоритмы решения прямых задач гравиметрии для сферического многогранника и сферической треугольной призмы с произвольно расположенными верхним и нижним основаниями. Плотность многогранника меняется в радиальном направлении по линейному закону. Плотность призмы меняется вдоль параллелей и меридианов пропорционально длинам дуг на верхнем и нижнем основаниях и линейно вдоль любого радиуса, принимая заданные значения в вершинах.

Ключевые слова:

Прямая задача гравиметрии, сферический многогранник, сферическая треугольная призма.

Key words:

Direct gravity problem, spherical polyhedron, spherical triangular prism.

Введение

При выполнении расчетов, которые проводятся с целью построения по наблюдаемому гравитационному полю плотностных моделей земной коры и верхней мантии, обычно принимается, что поверхность Земли плоская, а вектор силы тяжести направлен вниз и не меняет своего направления. Такой подход не приводит к заметным погрешностям, если измерения проводятся на поисковой площади с линейными размерами порядка десятков и первых сотен км.

При построении моделей крупных геологических объектов необходимо учитывать сферичность Земли, а расчеты проводить в сферической системе координат [1–3]. В качестве элементов аппроксимации удобно использовать сферические аппроксимирующие тела [1–4]. В работах [1–3] для аппроксимации плотностного строения среды используется сферический прямоугольный параллелепипед с плотностью, меняющейся в радиальном направлении по линейному закону, в работе [4] плотностная параметризация среды осуществляется с использованием сферической прямоугольной призмы с произвольно расположенными верхним и нижним основаниями. Плотность аппроксимирующего элемента в работе [4] меняется вдоль параллелей и меридианов пропорционально длинам дуг на верхнем и нижнем основаниях, линейно или экспоненциально вдоль любого радиуса и принимает заданные значения в вершинах призмы.

В настоящей статье рассматриваются решения прямой задачи гравиметрии для аппроксимирующих тел в виде сферического многогранника и сферической треугольной призмы.

Данные тела имеют хорошие аппроксимационные свойства, позволяющие с высокой степенью точности учитывать размеры и форму моделируемых объектов, используя при этом минимальное количество элементов аппроксимации.

Прямая задача гравиметрии для сферического многогранника

Постановка задачи. В соответствии с работой [5], дадим определение рассматриваемому аппроксимирующему элементу.

В геоцентрической системе координат $\Sigma_{\text{сф}}(0; r; \varphi, \lambda)$ (определение которой приводится в работах [1–3]) выделим тело D (рис. 1, а), имеющее $2 \times N$ вершин.

N вершин тела расположены на сфере радиуса r_2 и имеют координаты $r_2, \varphi_i, \lambda_i, i=1, 2, \dots, N$; остальные N вершин расположены на сфере радиуса r_1 ($r_1 < r_2$) и имеют координаты $r_1, \varphi_i, \lambda_i$.

Каждая боковая грань тела лежит в плоскости большого круга, проведенного через смежные вершины $r_2, \varphi_i, \lambda_i; r_2, \varphi_{i+1}, \lambda_{i+1}$ и начало системы координат.

Верхняя и нижняя грани тела образованы сегментами сфер радиусов r_2 и r_1 – т. н. сферическими многоугольниками. Каждая сторона (ребро) верхней (нижней) грани представляет собой дугу больш-

шого круга, соединяющую смежные вершины $r_2, \varphi_i, \lambda_i; r_2, \varphi_{i+1}, \lambda_{i+1}$ и $r_1, \varphi_i, \lambda_i; r_1, \varphi_{i+1}, \lambda_{i+1}$. Боковые ребра тела представлены отрезками прямых, соединяющих вершины с координатами $r_1, \varphi_i, \lambda_i$ и $r_2, \varphi_i, \lambda_i$. Определенное таким образом тело будем называть сферическим многогранником.

Под прямой задачей для сферического многогранника D будем понимать определение радиальной составляющей гравитационного потенциала:

$$V_r(R, \varphi_0, \lambda_0) = \int \int \int_D \rho(r)(R-r \cos \omega) P^{-3} r^2 \sin \varphi dr d\varphi d\lambda. \quad (1)$$

Здесь R, φ_0, λ_0 – координаты точки расчета поля в сферической системе координат; D – сферический многогранник; r, φ, λ – переменные интегрирования; ω – угол при центре сферы между направлениями на точки R, φ_0, λ_0 и r, φ, λ соответственно;

$$P^2 = R^2 + r^2 - 2Rr \cos \omega,$$

$$\cos \omega = \cos \varphi_0 \cos \varphi + \sin \varphi_0 \sin \varphi \cos(\lambda_0 - \lambda).$$

Плотность сферического многогранника D будем полагать меняющейся в радиальном направлении по линейному закону:

$$\rho(r) = \rho + k(r_2 - r), \quad (2)$$

где ρ – постоянная плотность; k – коэффициент, характеризующий изменение плотности по направлению r .

Решение задачи. Будем полагать, что все точки многогранника D лежат по одну сторону относительно плоскости каждой из его боковых граней (этого всегда можно добиться, выполнив соответствующее разбиение исходного произвольного сферического многогранника). Тогда (рис 1, б) ин-

теграл в правой части (1) можно представить в виде суммы интегралов:

$$\int \int \int_D \rho(r)(R-r \cos \omega) P^{-3} r^2 \sin \varphi dr d\varphi d\lambda = \sum_{i=1}^N t_i \cdot \int \int \int_{D_i} \rho(r)(R-r \cos \omega) P^{-3} r^2 \sin \varphi dr d\varphi d\lambda, \quad (3)$$

где

$$t_i = \text{sign}[(a_i x_0 + b_i y_0 + c_i z_0)(a_i x_{i+2} + b_i y_{i+2} + c_i z_{i+2})];$$

$$a_i = y_i z_{i+1} - y_{i+1} z_i; \quad b_i = -x_i z_{i+1} + x_{i+1} z_i;$$

$$c_i = x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i; \quad x_i = \sin \varphi_i \cos \lambda_i; \quad y_i = \sin \varphi_i \sin \lambda_i;$$

$$z_i = \cos \varphi_i; \quad i = 1, 2, \dots, N+2; \quad \varphi_{N+1} = \varphi_1; \quad \varphi_{N+2} = \varphi_2;$$

$$\lambda_{N+1} = \lambda_1; \quad \lambda_{N+2} = \lambda_2.$$

Расчет интегралов в правой части (3) удобно проводить в системе координат $O'X'Y'Z'$, полученной ортогональным вращением системы координат $OXYZ$ вокруг центра O таким образом, чтобы точка M оказалось на оси OZ' , как это показано на рис. 2, а.

Тогда выражения для слагаемых в правой части (3) можно записать в виде:

$$\int \int \int_{D_i} \rho(r)(R-r \cos \omega) P^{-3} r^2 \sin \varphi dr d\varphi d\lambda = \int \int \int_{D_i} \rho(r)(R-r \cos \varphi') P^{-3} r^2 \sin \varphi dr d\varphi d\lambda', \quad (4)$$

где D_i – элементарный сферический многогранник (рис. 1, б, 2, а); φ', λ' – переменные интегрирования, определенные в системе координат $\Sigma_{\text{сф}}(0; r; \varphi'; \lambda')$, связанной с декартовой системой координат $O'X'Y'Z'$.

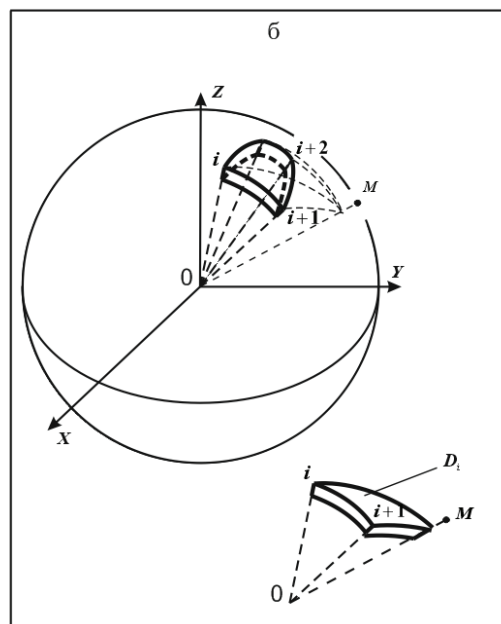
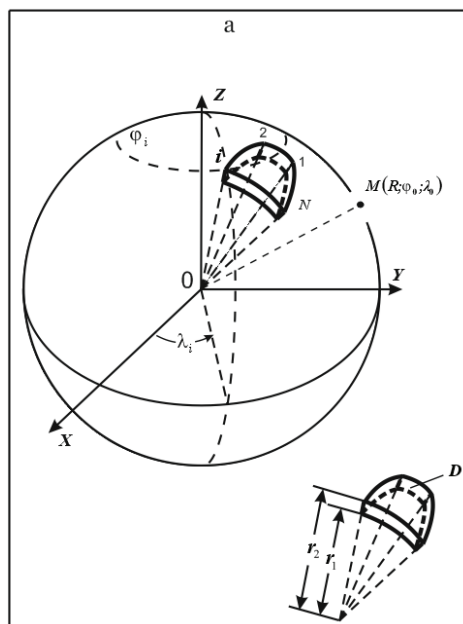


Рис. 1. Сферический многогранник: а) пространственное расположение сферического многогранника; б) к расчету радиальной составляющей гравитационного потенциала для сферического многогранника

Подставляя в правую часть (4) выражение (2) для плотности $\rho(r)$ и выполняя последовательное интегрирование по переменным φ' и r , получим выражение следующего вида:

$$f \iiint_{D_i} \rho(r)(R-r \cos \varphi') P^{-3} r^2 \sin \varphi' dr d\varphi' d\lambda' =$$

$$= f(\sigma + k \cdot r_2) R \int_0^{L_i} F_1(\lambda') d\lambda' - f \cdot k \cdot R^2 \int_0^{L_i} F_2(\lambda') d\lambda', \quad (5)$$

где

$$F_1(\lambda') =$$

$$= t \left[\frac{(2-3t)p_k}{3} - \frac{r_k'^2 p_k + t \cdot r_k' p_k}{3} \right]_{k=1}^{k=2} + \left[t = \cos \varphi'(\lambda') \right]_{t=1}$$

$$+ 2t(1-t^2) \text{Arth } \Lambda(t)$$

$$F_2(\lambda') =$$

$$= t \left[\frac{3t^2 p_k (r_k' - t)}{2} + \frac{3r_k' p_k^3}{4} + \frac{5t \cdot p_k^3}{4} - \frac{3(1-t^2)p_k (r_k' - t)}{8} \right]_{k=1}^{k=2} + \left[t = \cos \varphi'(\lambda') \right]_{t=1}$$

$$- r_k'^3 p_k + 3(1-t^2)^2 \text{Arth } \Lambda(t) / 4$$

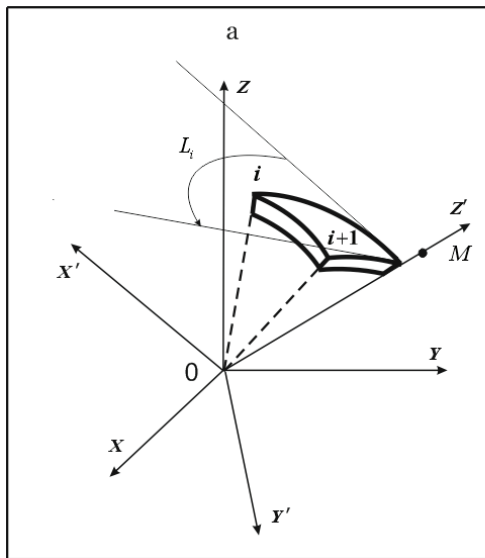
$$r_k' = r_k / R; \quad p_k = \sqrt{1 + r_k'^2 - 2t \cdot r_k'};$$

$$\Lambda(t) = (r_2' - r_1') / (p_2 + p_1).$$

Воспользовавшись формулами сферической тригонометрии [6], определим выражение для углов L_i (рис. 2, а):

$$L_i = 2 \arctg \sqrt{\frac{[\cos(a_i - b_i) - \cos c_i]}{[\cos c_i - \cos(a_i + b_i)]}},$$

где



$$\cos a_i = \cos \varphi_0 \cos \varphi_i + \sin \varphi_0 \sin \varphi_i \cos(\lambda_0 - \lambda_i);$$

$$\cos b_i = \cos \varphi_0 \cos \varphi_{i+1} + \sin \varphi_0 \sin \varphi_{i+1} \cos(\lambda_0 - \lambda_{i+1});$$

$$\cos c_i = \cos \varphi_i \cos \varphi_{i+1} + \sin \varphi_i \sin \varphi_{i+1} \cos(\lambda_i - \lambda_{i+1}).$$

Аналогично определим выражение для $\cos \varphi'(\lambda')$:

$$\cos \varphi'(\lambda') = (1 - \beta_1 \beta_2) / \sqrt{(1 + \beta_1^2)(1 + \beta_2^2)},$$

где

$$\beta_1 = \sin[(A - \lambda') / 2] \cdot \text{tg}(b_i / 2) / \sin[(A + \lambda') / 2],$$

$$\beta_2 = \cos[(A - \lambda') / 2] \cdot \text{tg}(b_i / 2) / \cos[(A + \lambda') / 2],$$

$$\text{tg}(b_i / 2) = \sqrt{(1 - \cos b_i)(1 + \cos b_i)},$$

$$\sin[(A \pm \lambda') / 2] =$$

$$= \sin(A / 2) \cdot \cos(\lambda' / 2) \pm \cos(A / 2) \cdot \sin(\lambda' / 2),$$

$$\sin(A / 2) = \sqrt{[\cos(b_i - c_i) - \cos a_i] / 2} / \sin b_i / \sin c_i,$$

$$\cos(A / 2) = \sqrt{[\cos a_i - \cos(b_i + c_i)] / 2} / \sin b_i / \sin c_i,$$

$$\cos[(A \pm \lambda') / 2] =$$

$$= \cos(A / 2) \cdot \cos(\lambda' / 2) \mp \sin(A / 2) \cdot \sin(\lambda' / 2),$$

A – угол при i -й вершине сферического треугольника (рис. 2, б).

Интегралы в правой части (5) не выражаются в конечном виде, поэтому для их вычисления будем использовать квадратурную формулу Гаусса–Легандра, обладающую наивысшей алгебраической степенью точности при заданном количестве узлов интегрирования [1–4, 7, 8]:

$$\int_0^{L_i} F_k(\lambda') d\lambda' \approx \frac{L_i}{2} \sum_{j=1}^n A_j F_k(\lambda'_j), \quad k=1,2; \quad i=1,2,\dots,N, \quad (6)$$

где $\lambda'_j = L_i x_j / 2$; n – порядок квадратуры; x_j и A_j – узлы и коэффициенты квадратурной формулы.

Для обеспечения расчета интегралов по формуле (6) с заданной точностью используем процедуру, описанную в работе [3].

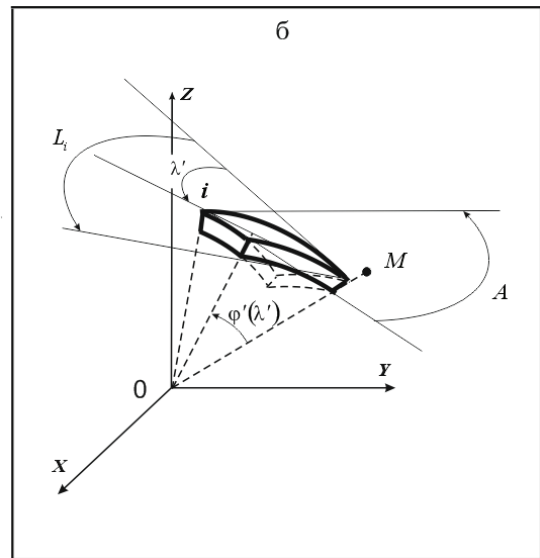


Рис. 2. К расчету радиальной составляющей гравитационного потенциала для элементарного сферического многогранника D_i . а) определение угла L_i ; б) определение угла $\varphi'(\lambda')$

При $k=0$ решение (1–6) дает, как частный случай, решение задачи для сферического многогранника постоянной плотности, рассматриваемой в работе [9].

Прямая задача гравиметрии для сферической треугольной призмы с произвольными верхним и нижним основаниями

Постановка задачи. Как и в случае сферического многогранника, в соответствии с работой [5], дадим определение рассматриваемому аппроксимирующему элементу.

В геоцентрической системе координат $\Sigma_{сф}(0;r;\varphi;\lambda)$ выделим тело (рис. 3), имеющее вершины с координатами $(r_1^B, \varphi_1, \lambda_1)$, $(r_1^H, \varphi_1, \lambda_1)$, $(r_2^B, \varphi_2, \lambda_2)$, $(r_2^H, \varphi_2, \lambda_2)$, $(r_3^B, \varphi_3, \lambda_3)$, $(r_3^H, \varphi_3, \lambda_3)$. Каждая боковая грань тела лежит в плоскости большого круга, проведенного через смежные вершины $r_1^B, \varphi_1, \lambda_1$; $r_2^B, \varphi_2, \lambda_2$; $r_3^B, \varphi_3, \lambda_3$ ($i=1,2,3$; $r_4^B=r_1^B$; $r_4^H=r_1^H$; $\varphi_4^B=\varphi_1^B$; $\lambda_4^B=\lambda_1^B$) и начало системы координат.

Верхнее и нижнее основания призмы (поверхности) опираются на верхние и нижние вершины тела и описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} r^B(\varphi, \lambda) &= a^B \varphi + b^B \lambda + c^B; \\ r^H(\varphi, \lambda) &= a^H \varphi + b^H \lambda + c^H. \end{aligned} \quad (7)$$

Поверхности (основания) $r^B(\varphi, \lambda)$, $r^H(\varphi, \lambda)$ будем называть сферическими, а рассматриваемое тело – треугольной сферической призмой с произвольно расположенными верхним и нижним основаниями.

Будем полагать, что плотность призмы меняется в радиальном направлении по линейному закону:

$$\rho(r) = \rho - k \cdot r. \quad (8)$$

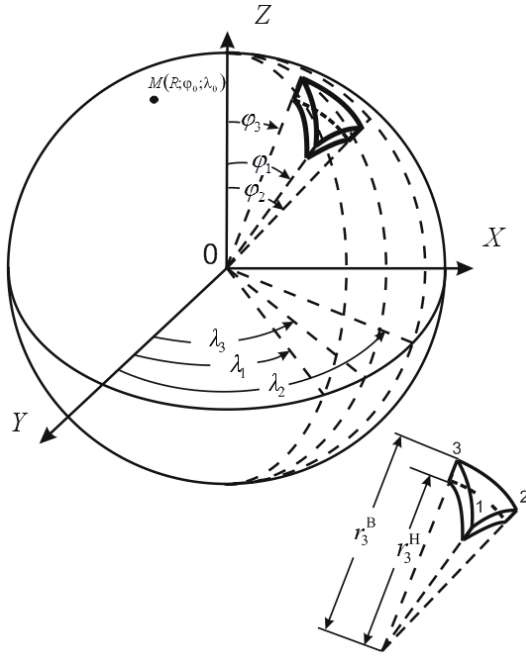


Рис. 3. Сферическая треугольная призма

Под прямой задачей гравиметрии для сферической треугольной призмы D будем понимать опре-

деление радиальной составляющей гравитационного потенциала:

$$\begin{aligned} V_r(R, \varphi_0, \lambda_0) &= \\ &= f \iiint_D \rho(r)(R-r \cos \omega) P^{-3} r^2 \sin \varphi dr d\varphi d\lambda. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь $R, \varphi_0, \lambda_0, r, \varphi, \lambda$ – те же, что и в выражении (1); $\rho(r)$ – плотность, описываемая соотношением (8).

Аналогом данного аппроксимирующего элемента в декартовой системе координат является вертикальная треугольная призма с плотностью, меняющейся с глубиной по линейному закону – типовой аппроксимирующий элемент, рассмотренный в работе [10].

Решение задачи. Интеграл в выражении для гравитационного эффекта сферической призмы допускает аналитическое интегрирование только по одной переменной, поэтому для численного решения прямой задачи (9) будем использовать квадратурный вычислительный метод, описанный в работах [1–4]. Так же как и при решении прямой задачи для сферического многогранника, выполним поворот системы координат так, чтобы расчетная точка M оказалось на оси OZ' новой системы координат. Подставим в правую часть (9) выражение для плотности (8) и, выполнив интегрирование по переменной r , получим следующее выражение для $V_r(R, \varphi_0, \lambda_0)$:

$$V_r(R, \varphi_0, \lambda_0) = f \iint_S F(\varphi', \lambda') \sin \varphi' d\varphi' d\lambda', \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} F(\varphi', \lambda') &= \\ &= \rho[R \cdot F_3^2 - \cos \varphi' \cdot F_3^3] - k[R \cdot F_3^3 - \cos \varphi' \cdot F_3^4], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} F_n^m &= F_n^m(\varphi', \lambda') = \int_{r^H(\varphi, \lambda)}^{r^B(\varphi, \lambda)} \frac{r^m}{P^n} dr; \\ m &= 0, 1, 2, 3, \dots; n = 2i + 1; i = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (12)$$

Выражения для интегралов (12) записываются с помощью рекуррентных соотношений, приведенных в работе [3]:

$$\begin{aligned} F_{2i+1}^m &= -\frac{m-i-0,5}{m-2i} \cdot r^{m-1} P^{-2i-1} b F_{2i+1}^{m-1} - \\ &- \frac{m-1}{m-2i} r^{m-1} P^{-2i-1} a F_{2i+1}^{m-2} + \frac{r^{m-1}}{m-2i} / P^{-2i+1}, \quad m \neq 2i; \\ F_{2i+1}^{2i} &= -b / 2 F_{2i+1}^{2i-1} + F_{2i-1}^{2i-2} - r^{2i-1} / (2i-1) P^{-2i+1}; \\ F_{2i+1}^0 &= \begin{cases} \frac{2(2r+b)}{\Delta} / \Delta P^{-2i+1} + \\ \frac{8(i-1)}{\Delta} / (2i-1) F_{2i-1}^0, & \Delta \neq 0, \\ (2i+2)^{-1} P^{-2i-2}, & \Delta = 0; \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_1^0 &= -\ln(P-b/2-r); \quad a = R^2; \quad b = -R \cos \varphi'; \\ \Delta &= 4a - b^2. \end{aligned}$$

В зависимости от расположения расчетной точки M относительно тела, показанного на рис. 4, расчетная формула (10) может принимать одну из следующих форм:

а) $V_r(R, \varphi_0, \lambda_0) = f \sum_{m=1}^3 \int_0^{L_m} \int_0^{\varphi_m(\lambda')} F(\varphi', \lambda') \sin \varphi' d\varphi' d\lambda'$;

б) $V_r(R, \varphi_0, \lambda_0) = f \sum_{m=j}^{j+1} \int_0^{L_m} \int_0^{\varphi_m(\lambda')} F(\varphi', \lambda') \sin \varphi' d\varphi' d\lambda'$;

в) $V_r(R, \varphi_0, \lambda_0) = f \int_0^{L_j} \int_0^{\varphi_j(\lambda')} F(\varphi', \lambda') \sin \varphi' d\varphi' d\lambda'$;

г) $V_r(R, \varphi_0, \lambda_0) = f \int_0^{\varphi_j(\lambda')} \int_0^{\varphi_j(\lambda')} F(\varphi', \lambda') \sin \varphi' d\varphi' d\lambda'$.

д) $V_r(R, \varphi_0, \lambda_0) = f \int_0^{\varphi_i(\lambda')} \int_0^{\varphi_j(\lambda')} F(\varphi', \lambda') \sin \varphi' d\varphi' d\lambda' + f \int_0^{\varphi_i(\lambda')} \int_0^{\varphi_i(\lambda')} F(\varphi', \lambda') \sin \varphi' d\varphi' d\lambda'$.

Здесь $L_j, \varphi_j(\lambda')$ – те же, что и в формуле (5) для сферического многогранника.

Значения $r^{\mu}(\varphi, \lambda)$, $r^{\mu}(\varphi, \lambda)$ в выражениях (12) определяются соотношениями (7), представленными в исходной системе координат $\Sigma_{сф}(0; r; \varphi; \lambda)$. Для определения этих значений в системе координат $\Sigma_{сф}(0; r; \varphi'; \lambda')$ приведем формулы расчета для $\varphi(\varphi', \lambda')$, $\lambda(\varphi', \lambda')$, полученные с помощью формул [7]:

$$\varphi(\varphi', \lambda') = \arccos d, \quad \lambda(\varphi', \lambda') = \arctg(s/c), \quad (13)$$

где

$$d = \cos \varphi' \cos \varphi_0 + \sin \varphi' \sin \varphi_0 \cos \lambda',$$

$$s = \sin \varphi_j' / \sin \varphi' \cdot \sin \lambda',$$

$$c = (\cos \varphi_j' - \cos \varphi_0 \cos \varphi') / \sin \varphi_0 / \sin \varphi'.$$

Таким образом, решение прямой задачи гравиметрии (9) сводится к расчету двойных интегралов вида $\int_0^{\lambda} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} F(\varphi', \lambda') \sin \varphi' d\varphi' d\lambda'$, который будем осуществлять с помощью квадратурных формул Гаусса–Лежандра:

$$\int_0^{\lambda} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} F(\varphi', \lambda') \sin \varphi' d\varphi' d\lambda' \approx \lambda / 4 \cdot \sum_{i=1}^{n_1} (\varphi_2(\lambda_i') - \varphi_1(\lambda_i')) \sum_{j=1}^{n_2} A_i A_j F(\varphi_j', \lambda_i') \sin \varphi_j', \quad (14)$$

где

$$\lambda_i' = \lambda(x_i + 1) / 2;$$

$$\varphi_j' = (\varphi_2(\lambda_i') - \varphi_1(\lambda_i'))x_j / 2 + (\varphi_2(\lambda_i') + \varphi_1(\lambda_i')) / 2;$$

x_i, x_j – узлы; A_i, A_j – весовые коэффициенты квадратурных формул Гаусса–Лежандра.

Как и в случае сферического многогранника, расчет интегралов по формуле (14), обеспечивающий заданную точность, осуществляется с помощью процедуры, описанной в работе [3].

Известно [3], что скорость и точность вычисления гравитационного эффекта с помощью квадратурных формул Гаусса–Лежандра зависят от горизонтальных размеров тела, глубины его погружения и места положения точки, для которой ведутся вычисления. В частности, если точка расположена

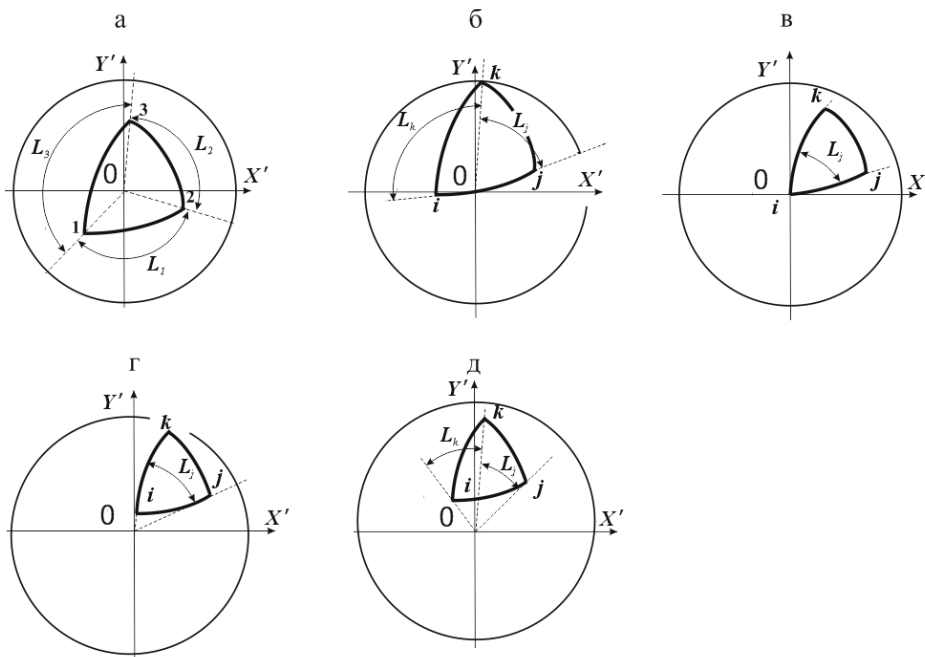


Рис. 4. Положение точки относительно тела: а) над телом; б) над телом в плоскости боковой грани; в) над телом на продолжении бокового ребра; г, д) за проекцией тела на поверхность Земли (в случае г точка принадлежит плоскости боковой грани тела). i, j, k – номера вершин

вблизи основания призмы, для обеспечения заданной точности расчетов может потребоваться большое количество узлов интерполяции.

Подинтегральная функция в (10) содержит слагаемые вида $r^2(\varphi', \lambda') \sin \varphi' / P$, где P – расстояние от точки M до точки поверхности основания призмы с координатами

$$r(\varphi', \lambda'), \varphi', \lambda';$$

$$P = \sqrt{r^2(\varphi', \lambda') + R^2 - 2 \cos \varphi' \cdot R \cdot r(\varphi', \lambda')};$$

$$r(\varphi', \lambda') = r^B(\varphi, \lambda); \quad \varphi = \varphi(\varphi', \lambda'); \quad \lambda = \lambda(\varphi', \lambda').$$

При $\varphi' \rightarrow 0$ величина $P \rightarrow 0$. Поскольку $\sin \varphi'$ и P имеют одинаковый порядок малости, особенность $r^2 \sin \varphi' / P$ является устранимой, однако, учитывая повышенные требования метода Гаусса–Лежандра к точности вычисления подинтегральных функций, а также к их гладкости, желательно исключить из расчетов точки, в которых соответствующие функции могут иметь особенности. Для этого удобно воспользоваться известным в вычислительной математике методом аддитивного выделения особенностей [10].

Пусть расчетная точка $M(R, \varphi_0, \lambda_0)$ находится вблизи поверхности $r^B(\varphi, \lambda)$ (рис. 5) или непосредственно на самой поверхности. Вычислим значения $r_2 = r^B(\varphi_0, \lambda_0)$, $r_1 = r^A(\varphi_0, \lambda_0)$ и построим сферический многогранник D' координаты вершин которого φ_i, λ_i ($i=1,2,3$) совпадают с соответствующими координатами призмы D , а радиальные координаты равны r_1 и r_2 соответственно.

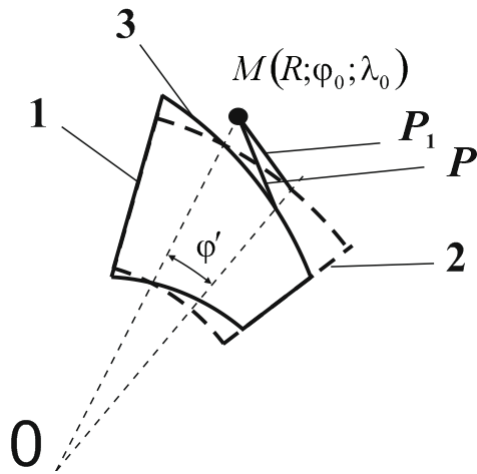


Рис. 5. 1) сферическая призма D ; 2) сферический многогранник D' ; 3) поверхность верхнего основания призмы

Преобразуем формулу (10) следующим образом:

$$V_r(R, \varphi_0, \lambda_0) =$$

$$= f \iint_S [F(\varphi', \lambda') - F'(\varphi', \lambda')] \sin \varphi' d\varphi' d\lambda' +$$

$$+ V_r'(R, \varphi_0, \lambda_0), \quad (15)$$

где $V_r'(R, \varphi_0, \lambda_0)$ – гравитационный эффект многогранника D' , вычисленный по формулам (1–6), а

$F'(\varphi', \lambda')$ вычисляются аналогично $F(\varphi', \lambda)$ по формулам (11), (12), в которых вместо $r^B(\varphi_0, \lambda_0)$ положено r_2 , а вместо $r^A(\varphi, \lambda) - r_1$. Расчет интеграла в (14) выполняем с помощью квадратурной формулы (14). Соответствующие слагаемые в подинтегральном выражении в (15) будут иметь вид $\sin \varphi' (r^2/P - r^2/P')$, где P – расстояние от расчетной точки M до точки с координатами $r(\varphi', \lambda)$, φ', λ' , лежащей на поверхности верхней грани сферической призмы D , а P' – расстояние от M до соответствующей точки, принадлежащей верхней грани сферического многогранника D' (рис. 5). При $\varphi' \rightarrow 0$, $r' \rightarrow r$, а $P' \rightarrow P$, таким образом, соответствующие слагаемые в подинтегральной функции в (15) при $\varphi' \rightarrow 0$ стремятся к нулю, что должно обеспечить хорошую сходимость метода квадратур.

Теперь рассмотрим алгоритм решения прямой задачи для случая, когда плотность тела может изменяться как по переменной r , так и по φ и λ , принимая заданные значения в вершинах призмы:

$$\rho(\varphi, \lambda, r) = \rho(\varphi, \lambda) - k(\varphi, \lambda) \cdot r, \quad (16)$$

где

$$\rho(\varphi, \lambda) = \rho_0 + \rho_1 \cdot \varphi + \rho_2 \cdot \lambda,$$

$$k(\varphi, \lambda) = k_0 + k_1 \cdot \varphi + k_2 \cdot \lambda, \quad (17)$$

$\rho_0, \rho_1, \rho_2, k_0, k_1, k_2$ вычисляются с помощью соответствующих интерполяционных формул [8].

В этом случае выражение радиальной составляющей гравитационного потенциала для призмы примет вид:

$$V_r(R, \varphi_0, \lambda_0) =$$

$$= f \iiint_D \rho(\varphi, \lambda, r) (R - r \cos \omega) P^{-3} r^2 \sin \varphi dr d\varphi d\lambda. \quad (18)$$

где $\rho(\varphi, \lambda, r)$ определяется соотношением (16).

Численный алгоритм решения задачи (18) для плотности (16, 17) аналогичен алгоритму решения задачи (9) для плотности (8). Выражение (11) для функции $F(\varphi', \lambda')$ здесь будет иметь вид:

$$F(\varphi', \lambda') = \rho(\varphi, \lambda) [R \cdot F_3^2 - \cos \varphi' \cdot F_3^3] -$$

$$- k(\varphi, \lambda) [R \cdot F_3^3 - \cos \varphi' \cdot F_3^4],$$

где зависимости $\varphi = \varphi(\varphi', \lambda')$, $\lambda = \lambda(\varphi', \lambda')$ определяются формулами (13).

В формуле (15) $V_r'(R, \varphi_0, \lambda_0)$ – гравитационный эффект сферического многогранника с плотностью, меняющейся вдоль радиального направления по линейному закону $\rho(r) = \rho(\varphi_0, \lambda_0) - k(\varphi_0, \lambda_0)r$.

Заключение

1. При моделировании региональных (континентально-планетарных) геологических структур расчеты проводятся в сферической системе координат, поэтому в качестве аппроксимирующих тел целесообразно использовать сферические тела.
2. Разработан алгоритм решения прямой задачи гравиметрии для аппроксимирующего тела в виде сферического многогранника с плотно-

стью, меняющейся в радиальном направлении по линейному закону.

3. Разработан алгоритм решения прямой задачи гравиметрии для аппроксимирующего тела в виде сферической треугольной призмы с произвольными верхним и нижним основаниями и плотностью, меняющейся вдоль параллелей и меридианов пропорционально длинам дуг на верхнем и нижнем основаниях, линейно

вдоль любого радиуса и принимающей заданные значения в вершинах призмы.

4. Алгоритмы решения задач реализуются с использованием численных методов: квадратурного метода Гаусса—Лежандра и (в прямой задаче для сферической призмы) метода аддитивно-выделения особенностей.

В следующей статье будут приведены результаты тестирования алгоритмов на квазиреальных моделях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старостенко В.И., Манукян А.Г. Решение прямой задачи гравиметрии на шарообразной Земле // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1983. – № 12. – С. 34–50.
2. Старостенко В.И., Манукян А.Г. Задачи гравиметрии для лучевых ускорений и изучение маскона Моря Нектара на Луне // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1988. – № 7. – С. 60–72.
3. Старостенко В.И., Манукян А.Г., Заворотько А.Н. Методика решения прямых задач гравиметрии и магнитометрии на шарообразных планетах – Киев: Наукова думка, 1986. – 112 с.
4. Старостенко В.И., Легостаева О.В. Прямая задача гравиметрии для неоднородной произвольно усеченной вертикальной прямоугольной призмы // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1998. – № 12. – С. 31–44.
5. Пятаков Ю.В., Исаев В.И. Методы решения прямых задач гравиметрии // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 105–110.
6. Кранц П. Сферическая тригонометрия – М: ЛКИ, 2007. – 98 с.
7. Страхов В.Н. Метод приближенного решения прямой трехмерной задачи гравиметрии // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1983. – № 9. – С. 52–62.
8. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М: БИНОМ, 2006. – 636 с.
9. Kosugin V.Yu., Pyatakov Yu.V., Krasikov V.N. Direct Gravity Problem for a Spherical Polyhedron // Geol. of Pac. Ocean. – 1997. – V. 13. – P. 857–868.
10. Пятаков Ю.В., Исаев В.И., Косыгин В.Ю. Методы теории потенциала при решении прямых задач гравиметрии и геодинамики трехмерных неоднородных сред // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 76–83.

Поступила 03.09.2012 г.

РЕШЕНИЕ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ ГРАВИМЕТРИИ ДЛЯ СФЕРИЧЕСКИХ АППРОКСИМИРУЮЩИХ ТЕЛ. ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ

В.И. Старостенко, Ю.В. Пятаков*, В.И. Исаев**

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, г. Киев

*Воронежский государственный университет инженерных технологий

** Томский политехнический университет

E-mail: pyatakovjv@mail.ru

На системе контрольных примеров выполнено тестирование алгоритмов численного решения прямой задачи гравиметрии для аппроксимирующего тела в виде сферической треугольной призмы с произвольными верхним и нижним основаниями на предмет их устойчивости, точности и быстродействия.

Ключевые слова:

Прямая задача гравиметрии, сферическая треугольная призма, тестирование алгоритмов.

Key words:

Direct gravity problem, spherical triangular prism, testing of algorithms.

Введение

В статье [1] рассмотрены вопросы построения алгоритмов численного решения прямых задач гравиметрии для аппроксимирующих тел, имеющих форму сферического многогранника и сферической треугольной призмы с произвольными верхним и нижним основаниями.

Практическое использование алгоритмов в задачах плотностного моделирования требует предварительного выполнения системы тестовых расчетов для выяснения вопросов, связанных с устойчивостью, точностью и быстродействием данных алгоритмов [2].

В настоящей статье приводятся результаты расчетов и их анализ, выполненные на типовых тестовых примерах, имитирующих работу алгоритмов в условиях их реальной эксплуатации.

Поскольку алгоритм решения прямой задачи гравиметрии для сферической треугольной призмы включает в себя в виде составного блока (см. формулы (11–15) работы [1]) алгоритм решения прямой задачи для сферического многогранника, в статье приводятся результаты тестовых испытаний только для алгоритма решения задачи для сферической призмы.

Тестирование алгоритма решения прямой задачи гравиметрии

Пример 1. В качестве тестового примера рассматривается сферическая призма, координаты которой по широте и долготе имеют вид: $\varphi_1=25^\circ$, $\varphi_2=25^\circ$, $\varphi_3=20^\circ$, $\lambda_1=87,5^\circ$, $\lambda_2=92,5^\circ$, $\lambda_3=92,5^\circ$ соответственно (рис. 1). Радиальные координаты вершин верхнего основания призмы (в км): $r_1^u=R+0,2$, $r_2^u=R+1,0$, $r_3^u=R+1,5$. Вершины нижнего основания имеют координаты $r_1^n=R-30,0$, $r_2^u=R-32,0$ и $r_3^u=R-35,0$; $R=6371$. Верхняя и нижняя грани описываются уравнениями (7) из работы [1] и опираются соответственно на вершины верхнего и нижнего оснований призмы. Плотность тела $\sigma=1,0$ г/см³. Расчетный профиль расположен по

параллели $\varphi_1=22,5^\circ$ на расстоянии 1 м от верхней сферической грани призмы: $r_{0i}=r^u(\varphi_0, \lambda_{0i})+0,001$.

В табл. 1 приведены результаты расчета гравитационного эффекта, полученные по квадратурным формулам (11–15) из работы [1], т. е. с использованием метода аддитивного выделения особенностей, и по формулам (10–14) — обычного квадратурного метода, т. е. без выделения особенностей. Точки 1, 2, 3 расположены над телом в непосредственной близости к поверхности его верхнего основания, точки 4, 5, 6 вынесены за проекцию тела на поверхность Земли.

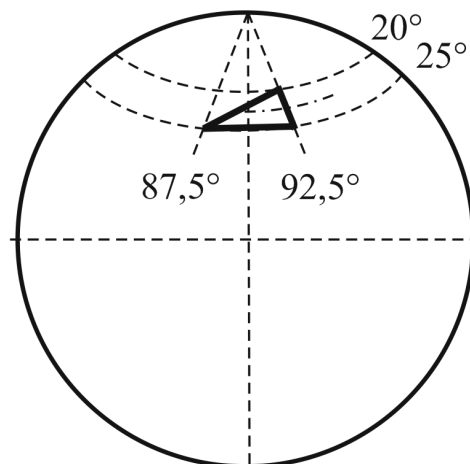


Рис. 1. Проекция сферической треугольной призмы на сферическую поверхность Земли, к тестовым расчетам на примере 1

Количество узлов интерполяции $n_1=n_2=n$, где n принимает значения 8, 12, 32, 64 и 96. Расчеты осуществлялись на ПК, оснащенный процессором AMD Phenom II X4 810 с тактовой частотой ядра 2,8 ГГц.

В точках 4, 5, 6, удаленных от тела, характер сходимости алгоритмов примерно одинаковый. В точках 1, 2, 3, расположенных в непосредственной близости к поверхности тела, как и предпола-

Таблица 1. Результаты расчета радиальной составляющей гравитационного потенциала для примера 1

| Расчет по формулам (11–15) из работы [1] | | | | | | |
|--|----------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| № точки | λ_{0i} | Количество узлов интерполяции | | | | |
| | | 8 | 12 | 32 | 64 | 96 |
| 1 | 90° | 9,49762188×10 ² | 9,49811659×10 ² | 9,49820474×10 ² | 9,49820481×10 ² | 9,49820502×10 ² |
| 2 | 91° | 1,16546764×10 ³ | 1,16547386×10 ³ | 1,16547386×10 ³ | 1,16547386×10 ³ | 1,16547386×10 ³ |
| 3 | 92° | 1,07016303×10 ³ | 1,07018492×10 ³ | 1,07018640×10 ³ | 1,07018640×10 ³ | 1,07018639×10 ³ |
| 4 | 93° | 2,27096899×10 ² | 2,27078625×10 ² | 2,27077060×10 ² | 2,27077060×10 ² | 2,27077060×10 ² |
| 5 | 94° | 7,41993108×10 ¹ | 7,41985079×10 ¹ | 7,41984995×10 ¹ | 7,41984995×10 ¹ | 7,41984995×10 ¹ |
| 6 | 95° | 3,70477905×10 ¹ | 3,70477365×10 ¹ | 3,70477363×10 ¹ | 3,70477363×10 ¹ | 3,70477363×10 ¹ |
| Время счета, с | | 2,0×10 ⁻³ | 4,3×10 ⁻³ | 2,9×10 ⁻² | 1,1×10 ⁻¹ | 2,5×10 ⁻¹ |
| Расчет по формулам (10–14) из работы [1] | | | | | | |
| № точки | λ_{0i} | Количество узлов интерполяции | | | | |
| | | 8 | 12 | 32 | 64 | 96 |
| 1 | 90° | 9,49723139×10 ² | 9,49852010×10 ² | 9,49860926×10 ² | 9,49857023×10 ² | 9,49851431×10 ² |
| 2 | 91° | 1,16542846×10 ³ | 1,16551425×10 ³ | 1,16551520×10 ³ | 1,16551377×10 ³ | 1,16551132×10 ³ |
| 3 | 92° | 1,07013341×10 ³ | 1,07022523×10 ³ | 1,07022742×10 ³ | 1,07022506×10 ³ | 1,07022123×10 ³ |
| 4 | 93° | 2,27083507×10 ² | 2,27077373×10 ² | 2,27077060×10 ² | 2,27077060×10 ² | 2,27077060×10 ² |
| 5 | 94° | 7,41986299×10 ¹ | 7,41985003×10 ¹ | 7,41984995×10 ¹ | 7,41984995×10 ¹ | 7,41984995×10 ¹ |
| 6 | 95° | 3,70477421×10 ¹ | 3,70477363×10 ¹ | 3,70477363×10 ¹ | 3,70477363×10 ¹ | 3,70477363×10 ¹ |
| Время счета, с | | 1,8×10 ⁻³ | 4,0×10 ⁻³ | 2,8×10 ⁻² | 1,1×10 ⁻¹ | 2,5×10 ⁻¹ |

Примечание. Здесь и далее подчеркнуты расхождения с результатами, выполненными по 96-ти точечной квадратурной вычислительной схеме, реализующей расчет по формулам (11–15) [1]; значения гравитационного поля даны в мгл.

гальс в работе [1], сходимость вычислительного алгоритма, реализуемого по формулам (10–14) из [1], очень сильно замедляется.

Проверку точности полученного решения выполним путем аппроксимации исходной призмы системой многогранников. Для этого через начало системы координат в плоскости боковых граней тела проведем прямые, образующие равные углы с прямыми, проходящими вдоль соответствующих боковых ребер призмы. Определим координаты точек пересечения прямых с верхней и нижней гранью исходной призмы и соединим их так, как это показано на рис. 2. Исходное тело разбито таким образом на четыре сферические призмы. Применяя описанную процедуру к каждому телу до тех пор, пока для всех элементов не будет выполнено условие: $|\varphi_i - \varphi_j| \leq \varepsilon$, $|\lambda_i - \lambda_j| \leq \varepsilon$, где $i, j = 1, 2, 3$, получим разбиение исходной призмы системой элементарных сферических тел.

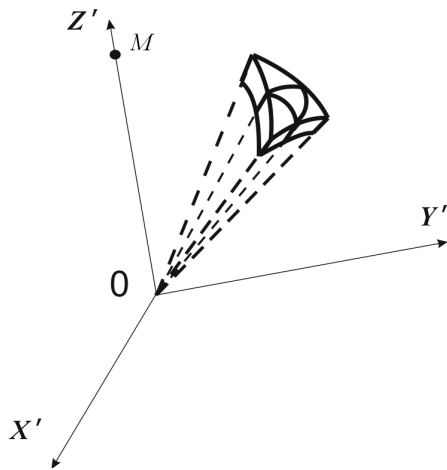


Рис. 2. Разбиение исходного тела системой элементарных сферических тел

Заменяв сферические поверхности элементарных призм плоскими гранями, проходящими через верхние и нижние вершины призм, получим аппроксимацию исходного сферического тела системой многогранников постоянной плотности, гравитационный эффект от которых определим с помощью аналитических формул из работ [3, 4]. Составляющая гравитационного потенциала от системы многогранников рассчитывается в проекции на ось OZ' , связанную с расчетной точкой M .

В табл. 2 приведены результаты расчетов и число аппроксимирующих многогранников для значений ε , равных 0,1; 0,01 и 0,001.

Сравнение результатов расчетов показывают, что использование метода выделения особенностей улучшает сходимость численного алгоритма, не приводя при этом к заметным потерям времени вычислений. Максимальное расхождение результатов расчетов в табл. 1 и 2 – в точке 1, близкой к плоскости боковой грани тела. При 96-и узлах интерполяции алгоритм (11–15) [1] в этой точке обеспечивает гарантировано точность в семь значащих цифр, в остальных точках точность значительно выше.

Пример 2. Координаты тела по долготе и широте, координаты точек расчетного профиля те же, что и в примере 1. Радиальные координаты вершин верхнего основания призмы: $r_1^* = R - 30,0$; $r_2^* = R - 32,0$; $r_3^* = R - 35,0$. Для нижнего основания $r_1^* = r_2^* = r_3^* = 420$ км. Плотность $\sigma = 1,0$ г/см³.

В табл. 3 приведены результаты расчетов, выполненных по алгоритмам (11–15) и (10–14) [1], соответственно.

Все расчетные точки в данном примере находятся на достаточном удалении от поверхности тела, следствием чего является хорошая сходимость решения, полученного как с помощью алгоритма (11–15), так и с помощью алгоритма (10–14). В табл. 4 приведены

Таблица 2. Результаты расчета гравитационного эффекта в примере 1, полученные путем аппроксимации тела системой многогранников

| № точки | λ_{0i} | Количество многогранников | | |
|----------------|----------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | 4096 | 867052 | 16777216 |
| 1 | 90° | $9,49796968 \times 10^2$ | $9,49820572 \times 10^2$ | $9,49820561 \times 10^2$ |
| 2 | 91° | $1,16545458 \times 10^3$ | $1,16547375 \times 10^3$ | $1,16547386 \times 10^3$ |
| 3 | 92° | $1,07018521 \times 10^3$ | $1,07018616 \times 10^3$ | $1,07018632 \times 10^3$ |
| 4 | 93° | $2,27088087 \times 10^2$ | $2,27077105 \times 10^2$ | $2,27077060 \times 10^2$ |
| 5 | 94° | $7,42026297 \times 10^1$ | $7,41985174 \times 10^1$ | $7,41984991 \times 10^1$ |
| 6 | 95° | $3,70497349 \times 10^1$ | $3,70477455 \times 10^1$ | $3,70477365 \times 10^1$ |
| Время счета, с | | $8,0 \times 10^{-1}$ | $6,6 \times 10^2$ | $5,1 \times 10^3$ |

Таблица 3. Результаты расчета радиальной составляющей гравитационного потенциала для примера 2

| Расчет по формулам (11–15) из работы [1] | | | | | | |
|--|----------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| № точки | λ_{0i} | Количество узлов интерполяции | | | | |
| | | 8 | 12 | 32 | 64 | 96 |
| 1 | 90° | $2,52184524 \times 10^3$ | $2,52906160 \times 10^3$ | $2,52987662 \times 10^3$ | $2,52987662 \times 10^3$ | $2,52987662 \times 10^3$ |
| 2 | 91° | $2,82394527 \times 10^3$ | $2,82402742 \times 10^3$ | $2,82402723 \times 10^3$ | $2,82402723 \times 10^3$ | $2,82402723 \times 10^3$ |
| 3 | 92° | $2,58088216 \times 10^3$ | $2,58286480 \times 10^3$ | $2,58292621 \times 10^3$ | $2,58292621 \times 10^3$ | $2,58292621 \times 10^3$ |
| 4 | 93° | $1,94959425 \times 10^3$ | $1,94760710 \times 10^3$ | $1,94754571 \times 10^3$ | $1,94754571 \times 10^3$ | $1,94754571 \times 10^3$ |
| 5 | 94° | $1,40645256 \times 10^3$ | $1,40644048 \times 10^3$ | $1,40644052 \times 10^3$ | $1,40644052 \times 10^3$ | $1,40644052 \times 10^3$ |
| 6 | 95° | $1,04413145 \times 10^1$ | $1,04413164 \times 10^3$ | $1,04413164 \times 10^3$ | $1,04413164 \times 10^3$ | $1,04413164 \times 10^3$ |
| Время счета, с | | $2,0 \times 10^{-3}$ | $4,3 \times 10^{-3}$ | $2,9 \times 10^{-2}$ | $1,1 \times 10^{-1}$ | $2,5 \times 10^{-1}$ |

| Расчет по формулам (10–14) из работы [1] | | | | | | |
|--|----------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| № точки | λ_{0i} | Количество узлов интерполяции | | | | |
| | | 8 | 12 | 32 | 64 | 96 |
| 1 | 90° | $2,52191288 \times 10^3$ | $2,52906012 \times 10^3$ | $2,52987662 \times 10^3$ | $2,52987662 \times 10^3$ | $2,52987662 \times 10^3$ |
| 2 | 91° | $2,82401298 \times 10^3$ | $2,82402603 \times 10^3$ | $2,82402723 \times 10^3$ | $2,82402723 \times 10^3$ | $2,82402723 \times 10^3$ |
| 3 | 92° | $2,58094034 \times 10^3$ | $2,58286344 \times 10^3$ | $2,58292621 \times 10^3$ | $2,58292621 \times 10^3$ | $2,58292621 \times 10^3$ |
| 4 | 93° | $1,94793039 \times 10^3$ | $1,94755133 \times 10^3$ | $1,94754571 \times 10^3$ | $1,94754571 \times 10^3$ | $1,94754571 \times 10^3$ |
| 5 | 94° | $1,40644093 \times 10^3$ | $1,40644052 \times 10^3$ | $1,40644052 \times 10^3$ | $1,40644052 \times 10^3$ | $1,40644052 \times 10^3$ |
| 6 | 95° | $1,04413160 \times 10^1$ | $1,04413164 \times 10^3$ | $1,04413164 \times 10^3$ | $1,04413164 \times 10^3$ | $1,04413164 \times 10^3$ |
| Время счета, с | | $1,8 \times 10^{-3}$ | $4,0 \times 10^{-3}$ | $2,8 \times 10^{-2}$ | $1,1 \times 10^{-1}$ | $2,5 \times 10^{-1}$ |

Таблица 4. Результаты расчета гравитационного эффекта в примере 2, полученные путем аппроксимации тела системой многогранников

| № точки | λ_{0i} | Количество многогранников | | |
|----------------|----------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | 4096 | 867052 | 16777216 |
| 1 | 90° | $2,52985442 \times 10^3$ | $2,52987653 \times 10^3$ | $2,52987662 \times 10^3$ |
| 2 | 91° | $2,82399787 \times 10^3$ | $2,82402712 \times 10^3$ | $2,82402723 \times 10^3$ |
| 3 | 92° | $2,58290150 \times 10^3$ | $2,58292612 \times 10^3$ | $2,58292621 \times 10^3$ |
| 4 | 93° | $1,94753610 \times 10^3$ | $1,94754567 \times 10^3$ | $1,94754571 \times 10^3$ |
| 5 | 94° | $1,40643781 \times 10^3$ | $1,40644051 \times 10^3$ | $1,40644052 \times 10^3$ |
| 6 | 95° | $1,04413098 \times 10^1$ | $1,04413163 \times 10^3$ | $1,04413164 \times 10^3$ |
| Время счета, с | | $8,0 \times 10^{-1}$ | $6,6 \times 10^2$ | $5,1 \times 10^3$ |

значения гравитационного поля, определенные с помощью аппроксимации сферического тела системой многогранников. Сопоставление результатов свидетельствует о высокой точности решения.

Пример 3. Известно, что одной из характерных особенностей плотностного строения Земли является градиентное изменение (увеличение) плотности, в зависимости от глубины [5, 6]. Поэтому в данном примере будем полагать плотность тела меняющейся в радиальном направлении. Координаты вершин тела и расчетных точек те же, что и в примере 2. Плотность в теле определим на основа-

нии линейного приближения распределения плотности верхней мантии Земли, полученного по РЕМ-моделям [7] и приведенного в работе [8] в виде соотношения:

$$\sigma(r) = 7,15855 - 3,8599 \cdot r / R \quad (1)$$

На глубине 35 км значение плотности, определяемое формулой (1), равно $3,32 \text{ г/см}^3$, на глубине 420 км значение плотности составляет $3,55 \text{ г/см}^3$.

В табл. 5 приведены рассчитанные значения гравитационного эффекта, полученные по алгоритмам (11–15) и (10–14) из работы [1], для тела

Таблица 5. Результаты расчета радиальной составляющей гравитационного потенциала для примера 3

| Расчет по формулам (11–15) из работы [1] | | | | | | |
|--|----------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| № точки | λ_{0i} | Количество узлов интерполяции | | | | |
| | | 8 | 12 | 32 | 64 | 96 |
| 1 | 90° | $8,54924051 \times 10^3$ | $8,57414809 \times 10^3$ | $8,57699222 \times 10^3$ | $8,57699220 \times 10^3$ | $8,57699220 \times 10^3$ |
| 2 | 91° | $9,56194819 \times 10^3$ | $9,56223849 \times 10^3$ | $9,56223779 \times 10^3$ | $9,56223779 \times 10^3$ | $9,56223779 \times 10^3$ |
| 3 | 92° | $8,74564683 \times 10^3$ | $8,75254888 \times 10^3$ | $8,75276503 \times 10^3$ | $8,75276503 \times 10^3$ | $8,75276503 \times 10^3$ |
| 4 | 93° | $6,62775163 \times 10^3$ | $6,62083436 \times 10^3$ | $6,62061830 \times 10^3$ | $6,62061830 \times 10^3$ | $6,62061830 \times 10^3$ |
| 5 | 94° | $4,79844910 \times 10^3$ | $4,79840637 \times 10^3$ | $4,79840651 \times 10^3$ | $4,79840651 \times 10^3$ | $4,79840651 \times 10^3$ |
| 6 | 95° | $3,57244562 \times 10^3$ | $3,57244628 \times 10^3$ | $3,57244628 \times 10^3$ | $3,57244628 \times 10^3$ | $3,57244628 \times 10^3$ |
| Время счета, с | | $2,6 \times 10^{-3}$ | $5,6 \times 10^{-3}$ | $3,8 \times 10^{-2}$ | $1,5 \times 10^{-1}$ | $3,3 \times 10^{-1}$ |
| Расчет по формулам (10–14) из работы [1] | | | | | | |
| № точки | λ_{0i} | Количество узлов интерполяции | | | | |
| | | 8 | 12 | 32 | 64 | 96 |
| 1 | 90° | $8,54946540 \times 10^3$ | $8,57414319 \times 10^3$ | $8,57699222 \times 10^3$ | $8,57699220 \times 10^3$ | $8,57699220 \times 10^3$ |
| 2 | 91° | $9,56217330 \times 10^3$ | $9,56223388 \times 10^3$ | $9,56223779 \times 10^3$ | $9,56223779 \times 10^3$ | $9,56223779 \times 10^3$ |
| 3 | 92° | $8,74584033 \times 10^3$ | $8,75254437 \times 10^3$ | $8,75276503 \times 10^3$ | $8,75276503 \times 10^3$ | $8,75276503 \times 10^3$ |
| 4 | 93° | $6,62196251 \times 10^3$ | $6,62063818 \times 10^3$ | $6,62061830 \times 10^3$ | $6,62061830 \times 10^3$ | $6,62061830 \times 10^3$ |
| 5 | 94° | $4,79840799 \times 10^3$ | $4,79840651 \times 10^3$ | $4,79840651 \times 10^3$ | $4,79840651 \times 10^3$ | $4,79840651 \times 10^3$ |
| 6 | 95° | $3,57244617 \times 10^3$ | $3,57244628 \times 10^3$ | $3,57244628 \times 10^3$ | $3,57244628 \times 10^3$ | $3,57244628 \times 10^3$ |
| Время счета, с | | $2,4 \times 10^{-3}$ | $5,1 \times 10^{-3}$ | $3,7 \times 10^{-2}$ | $1,5 \times 10^{-1}$ | $3,3 \times 10^{-1}$ |

Таблица 6. Сопоставление гравитационных эффектов для тела с линейной и постоянной плотностью

| | Координата λ | | | | | |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 90° | 91° | 92° | 93° | 94° | 95° |
| V_r' | $8,5769 \times 10^3$ | $9,5622 \times 10^3$ | $8,7527 \times 10^3$ | $6,6206 \times 10^3$ | $4,7984 \times 10^3$ | $3,5724 \times 10^3$ |
| V_r'' | $8,6900 \times 10^3$ | $9,7004 \times 10^3$ | $8,8722 \times 10^3$ | $6,6897 \times 10^3$ | $4,8310 \times 10^3$ | $3,5865 \times 10^3$ |
| ΔV_r | $-1,131 \times 10^2$ | $-1,382 \times 10^2$ | $-1,195 \times 10^2$ | $-6,91 \times 10^1$ | $-3,26 \times 10^1$ | $-1,41 \times 10^1$ |

с плотностью, меняющейся в радиальном направлении по линейному закону (1).

В табл. 6 приведены значения гравитационных эффектов V_r' и V_r'' соответственно для тела с линейной и постоянной плотностью, а также погрешность $\Delta V_r = V_r' - V_r''$. При расчете V_r'' плотность полагалась постоянной и равной среднему значению плотности (1) для интервала глубин залегания тела, т. е.

$$\sigma_{cp} = \sigma(r_{cp}) \approx 3,435 \text{ г/см}^3,$$

$$r_{cp} = R - (30 + 420) / 2 = 6146 \text{ км.}$$

По результатам, приведенным в табл. 1, 3, 5, определим среднее время расчета гравитационного эффекта в одной точке для одного тела. В случае постоянной плотности оно составляет соответственно для 96, 64, 32, 12 и 8-и точечной интерполяции, $4,2 \times 10^{-2}$, $1,8 \times 10^{-2}$, $4,8 \times 10^{-3}$, $7,1 \times 10^{-4}$ и $3,3 \times 10^{-4}$ с. Для тела с плотностью, меняющейся линейно в радиальном направлении, соответствующие значения времени в 1,3 раза больше. Как видно из результатов расчетов, минимальное количество интерполяционных узлов, необходимых для достижения заданной точности, зависит от расположения точки по отношению к телу (по мере удаления от тела число узлов уменьшается).

Пример 4. На рис. 3 приведен сферический треугольник с размерами $1^\circ \times 1^\circ$. Радиальные координаты точек тела те же, что и в примере 1, координаты по широте и долготе $\varphi_1 = \varphi_2 = 21^\circ$; $\varphi_3 = 20^\circ$; $\lambda_1 = 89,5^\circ$; $\lambda_2 = 90,5^\circ$; $\lambda_3 = 90,0^\circ$. Верхняя и нижняя грани призмы

описываются уравнениями (7) из работы [1] и описываются соответственно на вершины верхнего и нижнего оснований. Плотность тела $\sigma = 1,0 \text{ г/см}^3$. Расчетные точки расположены на разных удалениях от тела, так как это показано на рис. 3. Все точки находятся на расстоянии одного метра от поверхности верхней грани призмы, т. е. $r_{0i} = r^*(\varphi_0, \lambda_{0i}) + 0,001$.

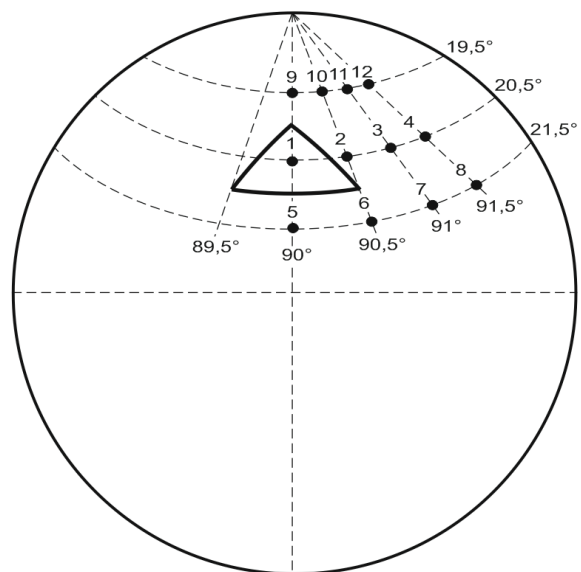


Рис. 3. Проекция призмы и расчетных точек на сферическую поверхность Земли в примере 4

Таблица 7. Результаты расчета радиальной составляющей гравитационного потенциала для примера 4

| № точки | Количество узлов интерполяции | | | | |
|----------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 8 | 12 | 32 | 64 | 96 |
| 1 | $5,67089975 \times 10^2$ | $5,67087331 \times 10^2$ | $5,67087373 \times 10^2$ | $5,67087376 \times 10^2$ | $5,67087363 \times 10^2$ |
| 2 | $1,80880724 \times 10^2$ | $1,80882432 \times 10^2$ | $1,80882403 \times 10^2$ | $1,80882403 \times 10^2$ | $1,80882403 \times 10^2$ |
| 3 | $6,34505817 \times 10^1$ | $6,34505795 \times 10^1$ | $6,34505795 \times 10^1$ | $6,34505795 \times 10^1$ | $6,34505795 \times 10^1$ |
| Время счета, с | $1,0 \times 10^{-3}$ | $2,1 \times 10^{-3}$ | $1,4 \times 10^{-2}$ | $0,5 \times 10^{-1}$ | $1,2 \times 10^{-1}$ |
| № точки | Количество узлов интерполяции | | | | |
| | 4 | 6 | 8 | 12 | 32 |
| 4 | $2,81702998 \times 10^1$ | $2,81702578 \times 10^1$ | $2,81702550 \times 10^1$ | $2,81702550 \times 10^1$ | $2,81702550 \times 10^1$ |
| 5 | $2,80579960 \times 10^0$ | $2,80580152 \times 10^0$ | $2,80580152 \times 10^0$ | $2,80580152 \times 10^0$ | $2,80580152 \times 10^0$ |
| 6 | $2,78660749 \times 10^0$ | $2,78660929 \times 10^0$ | $2,78660930 \times 10^0$ | $2,78660930 \times 10^0$ | $2,78660930 \times 10^0$ |
| 7 | $2,58938055 \times 10^0$ | $2,58938152 \times 10^0$ | $2,58938152 \times 10^0$ | $2,58938152 \times 10^0$ | $2,58938152 \times 10^0$ |
| 8 | $2,1298899 \times 10^0$ | $2,12989033 \times 10^0$ | $2,12989033 \times 10^0$ | $2,12989033 \times 10^0$ | $2,12989033 \times 10^0$ |
| 9 | $5,60378376 \times 10^0$ | $5,60376221 \times 10^0$ | $5,60376209 \times 10^0$ | $5,60376209 \times 10^0$ | $5,60376209 \times 10^0$ |
| 10 | $5,43614749 \times 10^0$ | $5,43612937 \times 10^0$ | $5,43612928 \times 10^0$ | $5,43612928 \times 10^0$ | $5,43612928 \times 10^0$ |
| 11 | $4,84659990 \times 10^0$ | $4,84658458 \times 10^0$ | $4,84658452 \times 10^0$ | $4,84658452 \times 10^0$ | $4,84658452 \times 10^0$ |
| 12 | $4,09333253 \times 10^0$ | $4,09332388 \times 10^0$ | $4,09332386 \times 10^0$ | $4,09332386 \times 10^0$ | $4,09332386 \times 10^0$ |
| Время счета, с | $3,1 \times 10^{-3}$ | $6,4 \times 10^{-3}$ | $4,3 \times 10^{-2}$ | $1,6 \times 10^{-1}$ | $3,6 \times 10^{-1}$ |

Результаты расчетов данного примера, приведенные в табл. 7, позволяют определить степень зависимости минимального необходимого числа узлов интерполяции, обеспечивающих заданную точность, от положения точки по отношению к телу.

Из табл. 7 видно, что только для точек 1, 2 и 3, расположенных в непосредственной близости к телу, потребовалось более 8-и узлов интерполяции. Для остальных точек шесть и восемь узлов обеспечивают достаточно высокую точность (относительные погрешности составляют величины порядка 10^{-6} и 10^{-8} , соответственно).

При моделировании объектов, представленных большим количеством аппроксимирующих элементов (несколько сотен и более) основной объем вычислений будет приходиться на расчет поля в точках, удаленных от соответствующих тел. Поэтому при оценке времени вычислений представляется возможным ориентироваться на среднее время вычислений, выполненных по 8-и точечной схеме интерполяции. Например, расчет гравитационного поля модели слоя из 1000 аппроксимирующих тел в

3000 точках должен потребовать не более 17 мин. процессорного времени для указанного выше ПК.

Выводы

1. Разработанные алгоритмы решения прямых задач гравиметрии для принятых сферических тел обеспечивают высокую точность результата не зависимо от места расположения точки расчета по отношению к аномалиеобразующему объекту.
2. Использование метода аддитивного выделения особенностей при расчетах, осуществляемых в непосредственной близости точки расчета к поверхности тела, существенно повышает точность результатов по сравнению с обычным квадратурным методом.
3. Для точек расчета, удаленных от аппроксимирующего элемента, количество интерполяционных узлов, обеспечивающих заданную точность, закономерно уменьшается. Достижима высокая скорость расчетов при обработке данных реальных сложнопостроенных структур (с использованием тысяч аппроксимирующих элементов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старостенко В.И., Пятаков Ю.В. Решение прямой задачи гравиметрии для сферических аппроксимирующих тел. Алгоритмы // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 28–34.
2. Пятаков Ю.В., Исаев В.И. Методы решения прямых задач гравиметрии // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 105–110.
3. 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.
4. Страхов В.Н., Лапина М.Н. Прямые задачи гравиметрии и магнитометрии для однородных многогранников // Геофизический журнал. – 1986. – Т. 8. – № 6. – С. 20–31.
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. Исаев В.И., Косыгин В.Ю., Лобова Г.А., Пятаков Ю.В. Интерпретация данных высокоточной гравиразведки. Вертикальный градиент плотности // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 319. – № 1. – С. 83–90.
7. Жарков В.Н., Трубицин В.П. Физика планетных недр. – М: Наука, 1980. – 448 с.
8. Хачай Ю.В. Исследования конвекции сжимаемой гравитирующей жидкости в плоском слое применительно к условиям верхней мантии Земли // Методы интерпретации и моделирования геофизических полей. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. – С. 82–89.

Поступила 03.09.2012 г.

УДК 550.83;553.98;551.73;551.76(571.16)

СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ЗОНЫ КОНТАКТА ПАЛЕОЗОЙСКИХ И МЕЗОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ МЕЖОВСКОГО СВОДА (НОВОСИБИРСКАЯ ОБЛАСТЬ)

О.О. Абросимова, А.В. Губа*

ОАО «Сибнефтегеофизика», г. Новосибирск

*ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН», г. Новосибирск

E-mail: abrosimova@sbngf.ru

На основе сопоставления характера сейсмической записи с геологическими данными выделены шесть основных сейсмофаций, отображающих наиболее характерные типы пород доюрского комплекса юго-западной части Новосибирской области. Сейсмо-геологическая модель строения доюрских отложений позволяет оконтурить предполагаемые зоны распространения различных пород доюрского комплекса. Полученные результаты на качественном уровне можно использовать при оценке выделения зон коллекторов и соответственно перспектив нефтеносности данного стратиграфического уровня.

Ключевые слова:

Нефтегазоносность зоны контакта, сейсмическая запись, временной разрез, динамический анализ, месторождение, Межовский свод, Новосибирская область.

Key words:

Petroleum potential of reservoirs at the Paleozoic-Mesozoic boundary, seismic record, seismic cross section, dynamic analysis, oil and gas field, Mezhovka arch, Novosibirsk region.

В начале 60-х гг. прошлого века в юго-западной части Новосибирской области разведочными скважинами под осадочным мезо-кайнозойским чехлом был вскрыт крупный гранитоидный массив батолитового типа, который образует крупную положительную структуру площадью около 5 тыс. км² и амплитудой по поверхности доюрского комплекса порядка 600 м. С севера свод ограничен Нюрольской впадиной, с юго-востока — Михайловским прогибом и с запада — Кыштовской впадиной. В его пределах пробурено более 30 скважин, которыми выявлен ряд небольших месторождений углеводородов. Нефтегазоносность связана с меловыми и юрскими отложениями, а также корой выветривания гранитов. В связи с этим рассматриваемая территория неоднократно привлекала внимание различных исследователей.

На данный момент на Межовском своде проведена гравиметрическая съемка масштаба 1:200 000. На результирующей карте он представляет собой интенсивный единый минимум напряженности гравитационного поля. В аномальном магнитном поле (съемка масштаба 1:50 000) свод не имеет четкого отображения и в целом характеризуется различными по значениям и морфологии аномалиям. Сопоставление потенциальных полей позволяет очертить границы батолита в плане. Также для уточнения границ массива были использованы данные сейсморазведочных работ, проведенных в пределах района исследования с 1990 по 2009 гг.

Для изучения геологического строения разреза используется большое количество методологических подходов. Одним из них является сейсмофациальный анализ. Цель процедуры — выделение сейсмофаций на основе анализа изменения волновой картины. Сейсмическая фациальная единица (сейсмофация) объединяет группу отражений, ха-

рактеризующихся схожим набором параметров, таких как конфигурация, непрерывность, амплитуда, частота и т. д. Каждый параметр несет определенную информацию о геологическом строении изучаемого интервала. Целью сейсмофациального анализа является прогноз литофаций по данным сейсморазведки. Прямой корреляции между определенным типом рисунка волновой картины и литологическим составом пород не существует. Однако анализ изменяющихся характеристик отражений в комплексе с априорной геологической информацией позволяет получить приемлемые оценки литологии [1].

Литологические заключения, полученные при изучении ядра, позволяют выделить шесть основных типов пород доюрского комплекса, которые развиты в рассматриваемом районе. На основе сопоставления характера сейсмической записи с геологическими данными были выделены шесть основных сейсмофаций.

Сейсмофация I характеризуется хаотичным расположением непротяженных осей синфазности различной интенсивности. Энергетическая составляющая такого рисунка волнового поля наиболее низкая. Соответствует гранитам. Данные образования вскрыты скважинами на Межовской, Восточно-Межовской и Веселовской площадях (рис. 1, А).

Сейсмофация II представлена прерывисто-слоистыми, динамически выраженными отражениями с частотой от 20 до 50 Гц. Предположительно, данная сейсмофация связана с карбонатными отложениями девонского возраста, зафиксированными в скважинах: Дедовские-1,2,3, Восточно-Межовской-102 и Оптимистичной-1 (рис. 1, Б).

Сейсмофация III по геометрии волнового поля близка с сейсмофацией II, но отличается более энергетически и динамически выраженными отра-

жениями и связана с глинисто-карбонатными породами девонского возраста. Данные отложения выявлены в скважинах Пахомовские-1, 2 (рис. 1, Б).

Сейсмофация IV представлена непротяженными, переменными-амплитудными волнистыми отражениями, часто низкочастотными. Регулярность и энергия записи с увеличением времени быстро затухает. Данный тип сейсмической записи связан с протерозойскими метаморфическими сланцами. Подобные образования вскрыты скважиной Верх-Чековской-1 (рис. 1, В).

Сейсмофация V по геометрии волнового поля похожа на сейсмофазию I, хаотичные чуть более упорядоченные и протяженные фрагменты осей синфазности. Данная сейсмофазия связана с эффузивами кислого состава (скважины Бочкаревская 1 и Чековская 1) (рис. 1, Г).

Сейсмофация VI представлена интенсивными, динамически выраженными, низкочастотными отражениями (частота варьирует от 15 до 40 Гц). Иногда отражения волнистые, переменными-амплитудные. Данный тип сейсмической записи связан с терригенно-вулканогенными отложениями ранне-среднего палеозоя (скважины Рифтовая-1 и Узаская-1) (рис. 1, Г).

В результате комплексного анализа сейсмической информации, данных аэромагнитной и гра-

витационной съемок и геологической информации была построена сейсмогеологическая модель строения доюрских отложений (рис. 2). Данная модель более детально позволяет оконтурить предполагаемые зоны распространения различных пород доюрского комплекса и, в целом, полученные результаты на качественном уровне позволяют использовать полученную информацию при оценке выделения зон коллекторов и соответственно перспектив нефтеносности данного стратиграфического уровня.

Перспективы поисков углеводородов в пределах подобных объектов могут рассматриваться по следующим направлениям: нефтегазоносность гидротермально измененных собственно магматических пород, кор их выветривания.

Нефтегазоносность гидротермально измененных магматических пород

В последнее время в связи с открытием крупных месторождений углеводородов в интрузивных комплексах фундамента повысился интерес к районам, имеющим сходное геологическое строение [2–4]. Одной из главных теоретических проблем поисков и разведки подобных месторождений является возможность формирования резервуаров в интрузивных породах. Коллекторы могут

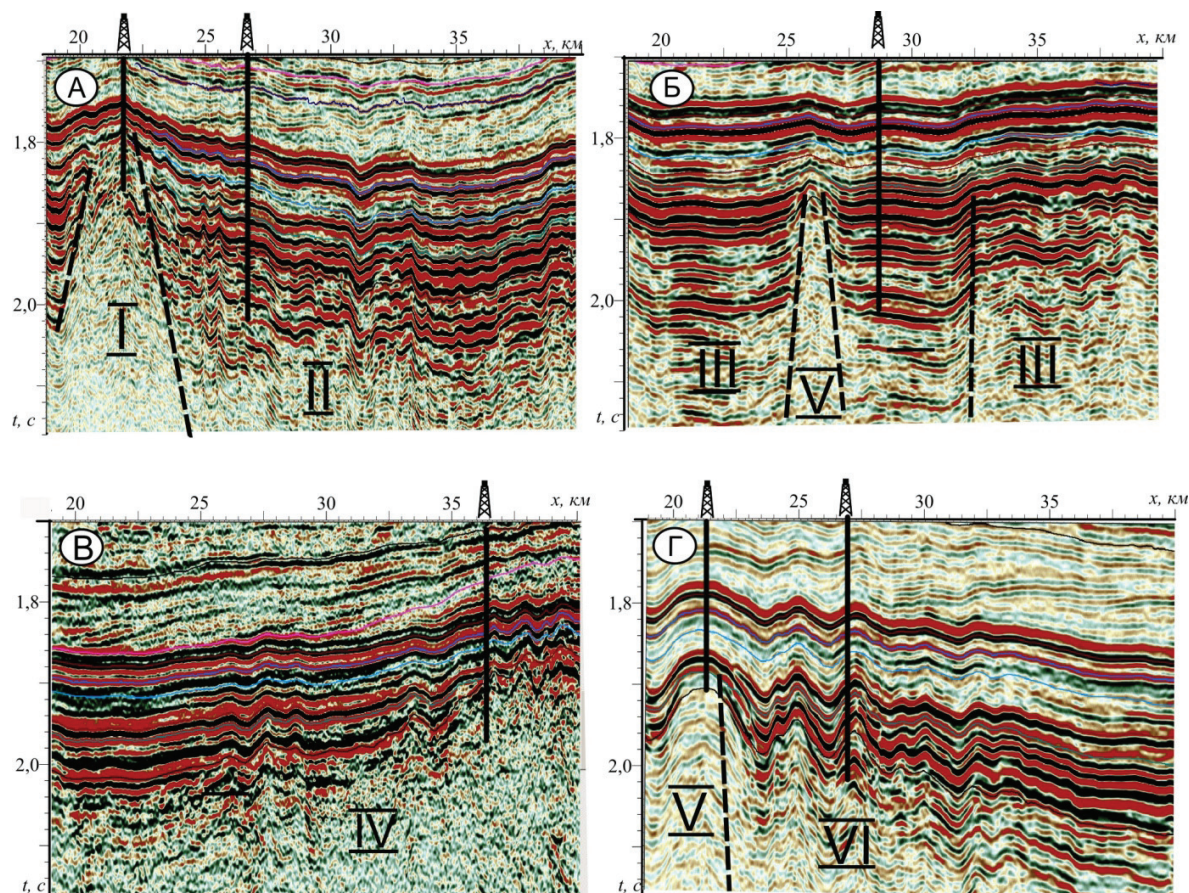


Рис. 1. Фрагменты временных разрезов, отображающие типы сейсмической записи, в интервале доюрских образований (I–VI сейсмофазии)

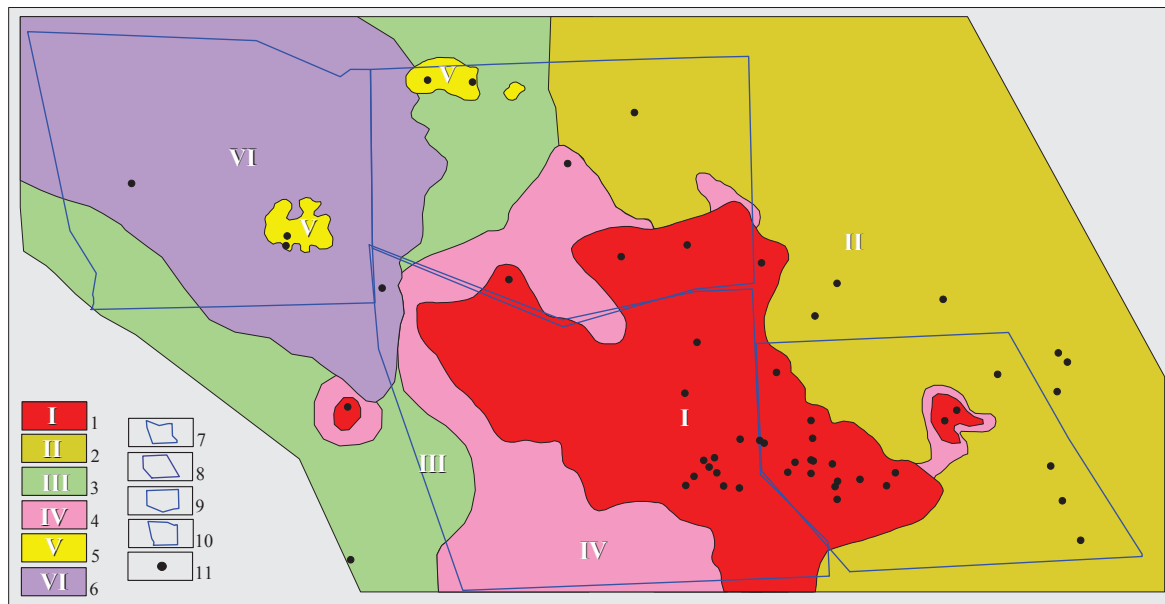


Рис. 2. Схема сейсмофациального районирования доюрского комплекса Межовского свода и прилегающих территорий. Прогнозные литологические разности доюрских отложений, выделенные по типам сейсмофаций (I–VI): 1) интрузивные породы, преимущественно граниты; 2) карбонатные породы, 3) глинисто-карбонатные породы, переслаивающиеся туфами, туффитами, порфиритами; 4) протерозойские сланцы; 5) эффузивы кислого состава; 6) вулканогенно-терригенные породы, эффузивы основного состава. Границы лицензионных участков: 7–10; 11) скважины

образовываться в результате целого комплекса процессов, таких как автометасоматоз, контрактонная усадка, а также постагмагматических и тектонических процессов. Общее уменьшение объема гранитной магмы при остывании составляет в среднем 8...9 %, причем некоторая часть реализуется в виде различных пустот внутри интрузива [5, 6]. Экранами для залежей могут служить не только перекрывающие их терригенные породы, но и непроницаемые разности разреза гранитоидного массива.

Минералого-петрографическими исследованиями керна установлено, что формирование пород Межовского массива происходило, по крайней мере, в четыре фазы [7]. Наиболее ранними (первая фаза) являются биотитовые граниты, они составляют большую часть массива. Биотитовые граниты вскрыты на Межовской, Восточно-Межовской, Еласской, Буйновской, Веселовской площадях. Вторая фаза представлена микроклиновыми гранитами (Ургульская площадь). В третью фазу формировались граниты аляскитового типа. В завершающую, четвертую, фазу возникли аплитовые граниты. Результаты определений абсолютного возраста пород показали очень большой разброс значений от 106 до 937 млн л [8], что тоже является подтверждением многофазности массива.

Теоретически можно предполагать, что разновозрастные интрузивные комплексы, «пересекаясь» друг с другом по зонам тектонических нарушений, образовывали зоны дробления и метасоматического контактного изменения пород. Также такие разломы могли неоднократно активизироваться в последующие геологические эпохи. В резуль-

тате на глубине возникли зоны разуплотнения. В настоящее время делаются только первые шаги в интерпретации геофизических материалов с целью выделения таких дезинтегрированных, разуплотненных зон в теле гранитного массива. В приповерхностной части массива по трещиноватым зонам могут развиваться зоны коры выветривания повышенной мощности. Подобные зоны могут иметь неплохие коллекторские свойства.

Нефтегазоносность кор выветривания

В пределах свода детальной сейсмозазведкой выявлены около десятка локальных поднятий, которые к настоящему времени практически все разбурены хотя бы одной скважиной. В ряде разрезов скважин выделяются образования коры выветривания. Так, Межовская скважина 4 под породами баженовской свиты на отметке 2232 м вскрыла каменный структурный элювий гранитов мощностью 8 м. Северо-Межовская скв. 7 вскрыла кору выветривания гранитов – зону глинистого структурного элювия (2300...2324 м), и вышележащие (интервал 2290...2300 м) переотложенные продукты коры выветривания [9]. Значительную мощность коры выветривания (38 м) вскрыла скважина Тартасская 3 в интервале 2544...2582 м. При испытаниях интервала 2513...2592 м был получен приток хлоркальциевой воды дебитом 285 м³/сут. Количество определений коллекторских свойств измененных гранитов незначительно. Можно привести в пример только данные по керну скважины Межовская 5, где была определена открытая пористость по пяти образцам из интервала 2312,7...2330,8 м, которая колеблется в пределах от 2 до 6,5 %. Нефтега-

зональность коры выветривания интрузивных пород была доказана на Межовском своде на одном месторождении [10].

Поступление углеводородов юрского происхождения в кровельную часть доюрского комплекса в любой модели формирования в ней коллекторов возможно за счет примыкания нефтематеринских или продуктивных отложений юрского возраста и нисходящей миграции по разломам. В связи с тем, что в пределах Межовского свода повсеместно развита нефтематеринская баженовская свита, в качестве главного критерия нефтегазоносности рассматривалось распределение зон развития коры выветривания, как потенциального коллектора.

Помимо опубликованных обобщений различных геолого-геофизических и геохимических материалов, полученных при изучении нефтегазоносности доюрского комплекса, данной проблеме посвящены и теоретические разработки. Математическое моделирование движения флюида в разделенном разломами на блоки фундаменте и перекрывающем его осадочном чехле детально рассмотрено в исследованиях [11, 12]. В указанных работах отмечается, что восходящая ветвь конвективной ячейки, совпадающая с дизъюнктивной в комплексе основания, должна характеризоваться положительной тепловой аномалией, а нисходящая ветвь приурочена к другому разлому того же ранга – отрицательной. На основе промысловых данных в пределах хорошо изученного Талинского месторождения было подтверждено наличие конвективного теплопереноса [13]. Рассматриваемая территория характеризуется значительно меньшей буровой изученностью (по отношению к Талинскому месторождению), поэтому были использованы также данные по скважинам, пробуренным в непосредственной от нее близости. Использованы результаты термометрии пород доюрского комплекса по 153 скважинам. Было отмечено, что в кровле доюрского комплекса (глубинах порядка 2700...3200 м) значения могут различаться на 40 °С.

Температуры, измеренные в более глубоких горизонтах, закономерно увеличиваются (рис. 3).

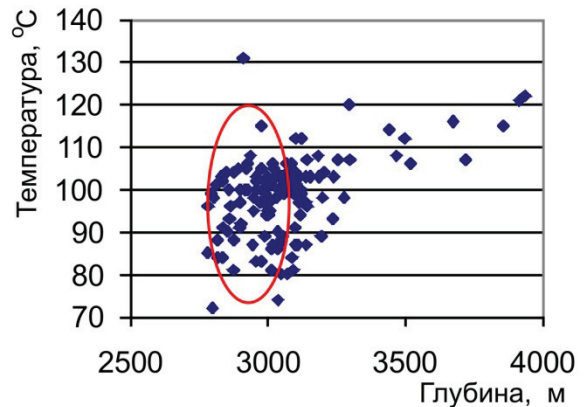


Рис. 3. Распределение температур пород доюрского комплекса в зависимости от глубины замеров

По результатам бурения в пределах Межовского свода было выявлено, что в одних из них (характеризующихся отсутствием притоков или неопробованных в связи с данными интерпретации ГИС) зафиксированы повышенные температуры (86...95 °С), а в других (с притоками углеводородов) – пониженные температуры (70...75 °С) (рис. 5).

Выполнено сопоставление тепловых аномалий с распределением тектонических нарушений и возможным наличием коллектора (коры выветривания). На фрагментах временных разрезов (рис. 4) видно осложнение сейсмической записи в зонах, отождествляемых с развитием коры выветривания. Изменение сейсмической записи позволяет картировать зоны развития кор выветривания.

Картирование зон коры выветривания было выполнено с использованием динамических параметров сейсмической записи. На рис. 5 представлена карта энергии сейсмической записи. В точках скважин, вскрывших кору выветривания, значения энергии сейсмической записи от 10 услов-

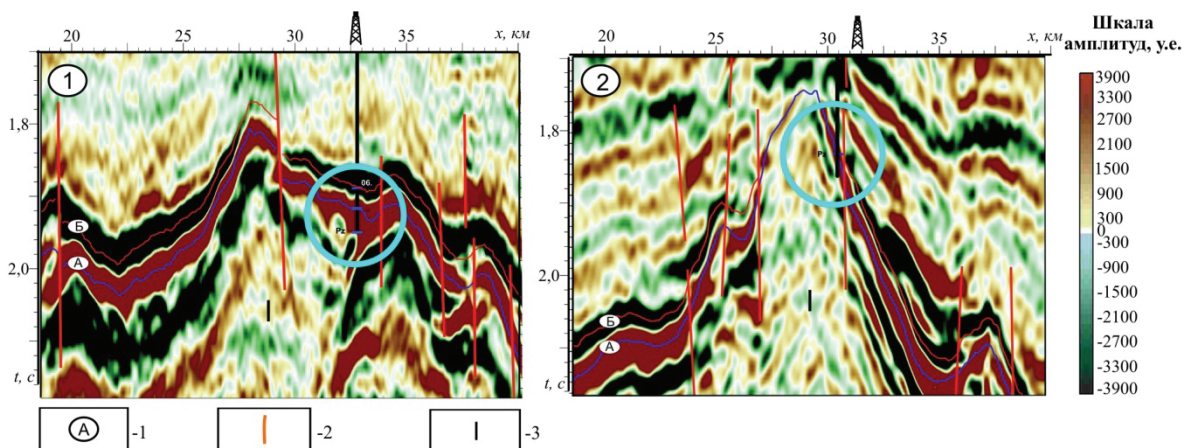


Рис. 4. Фрагменты временных разрезов через скважины, вскрывшие: 1) кору выветривания гранитов; 2) неизменные граниты. Условные обозначения: 1 – положение основных отражающих горизонтов: А – кровля доюрского комплекса, Б – кровля баженовской свиты; 2 – тектонические нарушения; 3 – сейсмофация

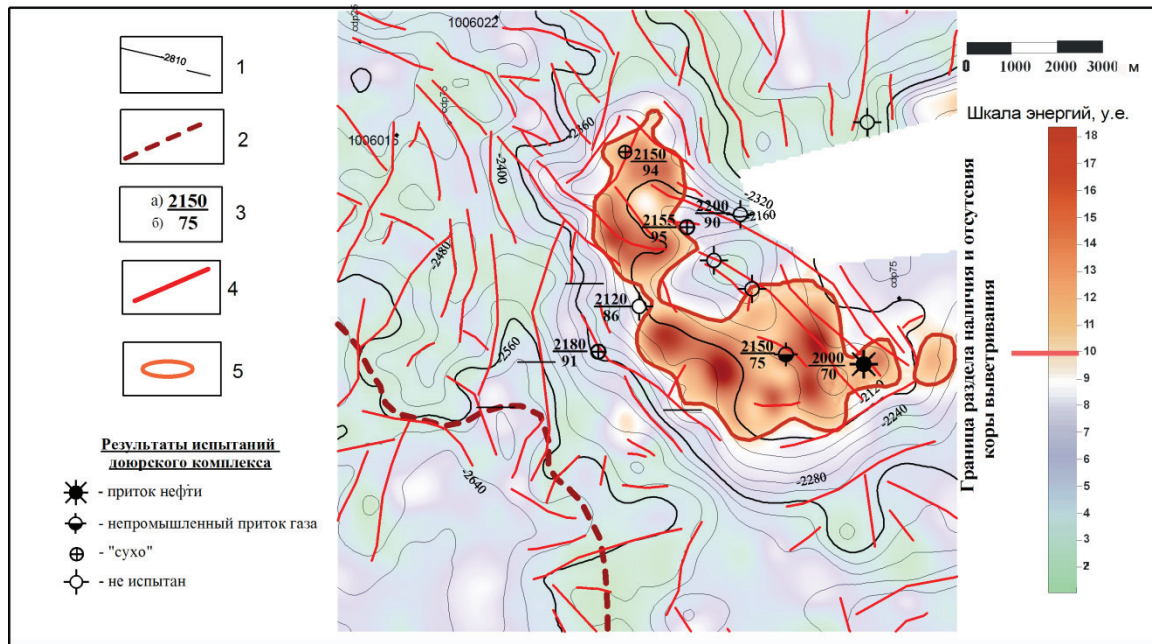


Рис. 5. Схема прогноза развития коры выветривания: 1) изогипсы отражающего горизонта А (кровля доюрского комплекса); 2) граница гранитоидного массива по данным сейсмофациального анализа; 3) а) глубина замера температуры, м; б) температура, °С; 4) тектонические нарушения; 5) граница зоны развития коры выветривания

ных единиц и более. В связи с этим в качестве граничного было принято значение, равное 10 у.е. Это позволило оконтурить зоны развития коры выветривания.

Анализ схемы позволяет отметить следующие моменты:

1. В пределах развития кор выветривания скважинами вскрыты как проницаемые, так и непроницаемые разрезы. Фильтрационно-емкостные свойства кор выветривания за счет вторичных изменений и уплотнения за время формирования осадочного чехла уменьшились, о чем свидетельствует наличие непроницаемых разрезов.
2. Во время апт-сеноманского развития Западно-Сибирской плиты произошло подновление старых и возникновение новых тектонических нарушений с формированием зон трещиноватости, о чем свидетельствуют проницаемые разрезы.
3. Отложения баженовской нефтематеринской свиты в этом районе залегают непосредственно на образованиях доюрского комплекса. Вероятно, заполнение части коллекторов в кровле гранитоидного массива происходило при нисходящей миграции по зонам разломов мелового возраста.

4. Наиболее перспективным в отношении нефтегазоносности является западный участок развития коры выветривания в зоне, где отмечаются пониженные температурные значения в кровле доюрского комплекса.

Выводы

Районирование юго-восточной части Новосибирской области по вещественному составу доюрского комплекса, реализованное с использованием сейсмофациального анализа, позволило уточнить границы Межовского гранитоидного массива. В качестве главного критерия нефтегазоносности (наличия коллектора) рассматривалось распределение коры выветривания, которое был закартировано на основе динамических параметров сейсмической записи. В кровле доюрского комплекса в пределах свода отмечаются положительные и отрицательные температурные аномалии. Наиболее вероятным механизмом поступления углеводородов в кровельную часть доюрского комплекса помимо примыкания нефтематеринских или продуктивных отложений юрского возраста является миграция по разломам, которые представляют собой нисходящую ветвь конвективной ячейки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальярова Т.Н., Иванова Н.А. Современные методы сейсмофациального анализа на реальных примерах // Геомодель 2006: Матер. VIII Междунар. научно-практ. конф. – Геленджик, 17–22 сентября 2006. – М.: МГУ, 2006. – С. 136–137.
2. Арешев Е.Г., Донг Ч.Л., Киреев Ф.А. Нефтегазоносность гранитоидов фундамента на примере месторождения Белый Тигр // Нефтяное хозяйство. – 1996. – № 8. – С. 50–58.
3. Шнип О.А. Образование коллекторов в фундаменте нефтегазоносных территорий // Геология нефти и газа. – 1995. – № 6. – С. 35–37.
4. Шустер В.Л. Нефтегазоносность кристаллического фундамента // Геология нефти и газа. – 1997. – № 8. – С. 17–19.
5. Жабрев И.П. Глубинные углеводороды биогенного генезиса // Геология нефти и газа. – 1994. – № 9. – С. 27–28.
6. Осипов М.А. Процесс остывания интрузива и размещение рудных тел // Советская геология. – 1973. – № 3. – С. 21–27.
7. Проблема нефтегазоносности палеозоя на юго-востоке Западно-Сибирской низменности / ред. А.А. Трофимука, В.С. Вышемирского. – Новосибирск: Наука, 1976. – 237 с.
8. Елкин Е.А., Краснов В.И., Бахарев Н.К. и др. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Палеозой Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001. – 163 с.
9. Коры выветривания Сибири. Формации кор выветривания Западно-Сибирской плиты и Алтае-Саянской области / под ред. В.П. Казаринова. – М.: Недра, 1979. – 220 с.
10. Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К. Геология нефти и газа Западной Сибири. – М.: Недра, 1975. – 678 с.
11. Кормильцев В.В., Нургалиев Д.К., Писецкий В.Б., Ратушняк А.Н. Моделирование флюидодинамических систем, охватывающих осадочный бассейн и фундамент // Георесурсы. – 2001. – № 2. – С. 35–37.
12. Кормильцев В.В., Ратушняк А.Н. Моделирование температурных аномалий, связанных с течением флюида при объемной деформации геоблоков // Дегазация Земли: геодинамика, флюиды, нефть и газ. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 156–158.
13. Федоров Ю.Н., Князева И.В., Иванов К.С., Кормильцев В.В., Печеркин М.Ф., Свечников Л.И., Криночкин В.Г., Федоров М.Ю. К методике прогноза залежей углеводородов в доюрском основании Западной Сибири // Горные ведомости. – 2004. – № 10. – С. 38–53.

Поступила 11.05.2012 г.

УДК 553.98:553.041:552.578:550.8.05

ВЛИЯНИЕ ПАЛЕОКЛИМАТА НА ГЕОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И НЕФТЕГЕНЕРАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ (НА ШИРОТАХ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ)

Г.А. Лобова, Е.Н. Осипова, К.А. Криницына, Ю.Г. Останкова

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

Проведено многовариантное палеотемпературное моделирование осадочных разрезов шести глубоких скважин Томской области. Определено существенное влияние векового хода температур на поверхности Земли (палеоклимат) на термическую историю и реализацию нефтегенерационного потенциала отложениями баженовской свиты для различных тектонических структур, расположенных на разных широтах Томской области. В качестве критериев адекватности модели геотермического режима приняты «реперные» геотемпературы из отражательной способности витринита и нефтегазоносность верхнеюрских отложений.

Ключевые слова:

Палеотемпературное моделирование, палеоклимат, баженовская свита, отражательная способность витринита, нефтегенерационный потенциал, Томская область.

Key words:

Paleotemperature modeling, paleoclimate, Bazhenov formation, vitrinite reflectance, oil generation potential, Tomsk region.

Постановка задачи

Современные оценки ресурсов углеводородов (УВ) выполняются объемно-генетическим методом, на основе реконструкции геотемпературного режима нефтематеринских отложений [1, 2 и др.].

Одним из факторов, определяющих температурный режим осадочного разреза, является влияние палеоклимата. Поэтому ряд исследователей [3–5] рекомендуют при палеотемпературном моделировании учитывать вековой ход температур на поверхности Земли, в том числе и резкое похолодание в позднечетвертичное время. Существует также мнение [6], что при реконструкции палеотемпературного режима нефтематеринских отложений учитывать вековой ход температур на по-

верхности Земли нет необходимости, так как дно бассейна осадконакопления всегда имеет температуру, близкую к нулевой. Наряду с этим, при палеотемпературном моделировании в пределах Нюрольской мегавпадины [7] влияние резкого похолодания в плейстоцен-голоцене на геотермический режим материнских пород было оценено как маловероятное.

Цель наших исследований – оценить влияние векового хода температур поверхности Земли (палеоклимата) на геотермический режим, и, следовательно, на степень реализации генерационного потенциала баженовской свиты для различных тектонических структур на разных географических широтах Томской области.

Оценки выполняются при допущениях: 1) палеоклимат не следует учитывать; 2) палеоклимат следует учитывать, но учет позднечетвертичного похолодания не обязателен; 3) следует учитывать все детали хода среднегодовой температуры на поверхности Земли. Критерием предпочтительности из 3-х оценок выступает лучшая согласованность максимума расчетных температур геотермического режима с температурами «максимального палеотермометра» [8] – с температурами, определенными по отражательной способности витринита (ОСВ). Важно сопоставить наличие и время работы очагов интенсивной генерации УВ, выделяемых по геотемпературному критерию [9], с установленной нефтегазоносностью недр.

Характеристика объекта исследований

Территория исследований расположена (рис. 1) между 57°20' и 60°20' северной широты, что соответствует пограничной зоне кромки самаровского ледника и Мансийского приледникового озера моря [10]. По оценкам, приведенным в [11], среднегодовые температуры в плейстоцен-голоцене на этих широтах были ниже современных на 9...10 °С.

Основным источником формирования залежей углеводородов в ловушках горизонта Ю₁ (J₃vs) и всего мелового комплекса в западных районах Томской области являются потенциально нефтематеринские отложения баженовской свиты (J₃bg).

Моделирование геотермического режима баженовских отложений выполнено для осадочных разрезов шести глубоких скважин: на Нижневарттовском своде – Малореченская 121, на Среднеवासюганском мегавале – Пуглалымская 86 и Лугинецкая 183, в пределах южной части Нюрольской мегавпадины – Таловая 1 и Айсазская 1 и на Лавровском мезовыступе – Кулгинская 141. В табл. 1 приведена характеристика разрезов этих скважин.

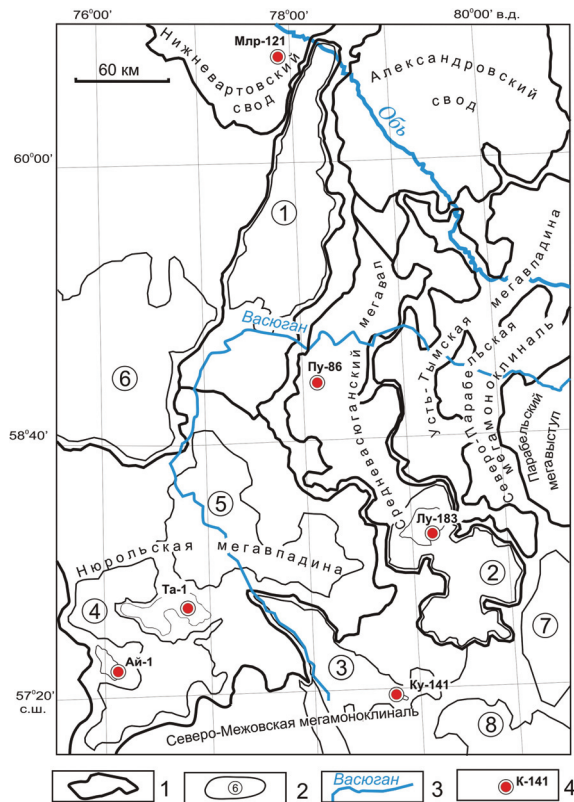


Рис. 1. Обзорная схема территории исследований (на основе [12]): 1) структуры I порядка; 2) структуры II порядка: 1 – Колтогорский мезопрогиб, 2 – Пудинское мезоподняtie, 3 – Лавровский мезовыступ, 4 – Южно-Нюрольская мезовпадина, 5 – Центральная нюрольская мезовпадина, 6 – Нововасюганский мезовал, 7 – Горелоярское мезоподняtie, 8 – Калгачский мезовыступ; 3) реки; 4) исследуемые скважины: Ай-1 – Айсазская 1, Та-1 – Таловая 1, Ку-141 – Кулгинская 141, Лу-183 – Лугинецкая 183, Пу-86 – Пуглалымская 86, Млр-121 – Малореченская 121

Таблица 1. Характеристика разрезов глубоких скважин

| Характеристики | Кулгинская 141 | Айсазская 1 | Таловая 1 | Лугинецкая 183 | Пуглалымская 86 | Малореченская 121 |
|---|---|---|---|--|--------------------------|----------------------------|
| Забой, м | 3185 | 3204 | 2909 | 2500 | 2703 | 2683 |
| Отложения на забое (свита) | Палеозой | Палеозой | Тюменская | Тюменская | Палеозой | Кора выветривания |
| Кровля баженовской свиты, м | 2597 | 2700 | 2757 | 2313 | 2439 | 2430 |
| Мощность баженовской свиты, м | 15 | 35 | 24 | 16 | 10 | 15 |
| Мощность палеогеновых отложений, м | 290 | 490 | 518 | 356 | 442 | 450 |
| Мощность неогеновых отложений, м | 0 | 45 | 18 | 48 | 0 | 0 |
| Мощность четвертичных отложений, м | 28 | 18 | 8 | 50 | 45 | 40 |
| Измеренные пластовые температуры (свита; глубина замера; пластовая температура) | Васюганская; 2661 м; 82 °С. Тюменская; 2745 м; 82 °С. Тюменская; 2758 м; 84 °С. Тюменская; 2793 м; 86 °С | Покурская; 862 м; 31 °С. Киялинская; 2156 м; 67 °С | Васюганская; 2784 м; 88 °С. Васюганская; 2802 м; 88 °С | Куломзинская; 2200 м; 77 °С. Тюменская; 2350 м; 84 °С | Тюменская; 2630 м; 90 °С | Васюганская; 2452 м; 90 °С |

На Лавровском мезовыступе скважиной Кулгинская 141 при забое 3185 м пройдено по породам фундамента 107 м. Толщина баженовской свиты составляет 15 м, температура пластовых флюидов в васюганской свите достигает 82 °С, в тюменских отложениях колеблется от 82 до 86 °С. В отложениях верхней юры открыто Кулгинское нефтяное месторождение.

Скважина Айсазская 1 вскрыла 27 м палеозойских отложений и 19 м пород коры выветривания. Мощность баженовских отложений составляет 37 м, геотемпература флюидов в пластах киялинской свиты равна 67 °С, покурской – 31 °С.

Скважина Таловая 1 отложений фундамента не вскрыла. Мощность баженовских отложений – 24 м. Промышленные притоки нефти получены в интервалах песчаных пластов васюганской свиты. Измеренные пластовые температуры флюида достигают в них 88 °С.

На Лугинецком нефтегазоконденсатном месторождении залежи УВ связаны в основном с верхнеюрскими коллекторами. В скважине 183 баженовская свита имеет мощность 16 м, замеренные пластовые температуры в киялинской свите – 77 °С, в тюменской – 84 °С.

Бурением скважины 86 на Пуглалымском месторождении открыта залежь в верхнеюрском нефтегазоносном комплексе. Скважиной вскрыта кора выветривания мощностью 16 м, и 13 м пройдено по породам фундамента. Мощность баженовской свиты составляет 10 м. Замеренная пластовая температура в тюменской свите – 90 °С.

Залежь нефти разведана на Малореченской складке. Промышленные притоки нефти получены из песчаных пластов васюганской свиты оксфордского возраста. Пластовые температуры флюида составили 90 °С. Скважина вскрыла породы коры выветривания на 19 м. Мощность баженовской свиты 15 м.

Методика исследований

Восстановление термической истории отложений баженовской свиты выполнено на основе палеотектонических реконструкций и палеотемпературного моделирования. В настоящей работе **применен метод палеотемпературного моделирования** [13], наиболее полно учитывающий изменения во времени параметров геотермополя, в том числе влияния палеоклимата.

В модели процесс распространения тепла в слоистой осадочной толще описывается начально-краевой задачей для уравнения

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

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

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

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

где $\varepsilon = \varepsilon(t)$ – верхняя граница осадочной толщи (дневная поверхность); q – тепловой поток.

Осадочная толща описывается (рис. 2) мощностями стратиграфических комплексов h_i , для каждого из которых заданы теплопроводность λ_i , температуропроводность a_i , плотность тепловыделения радиоактивных источников f_i и скорость осадконакопления v_i . Скорость осадконакопления может быть отрицательной, что означает денудацию слоя. Для решения одномерной начально-краевой задачи (1)–(3) применен метод конечных элементов.

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

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

Решение обратной задачи строится с учётом того, что функция $U(Z_i, t, q)$, являющаяся решением прямой задачи (1) с краевыми условиями (2) и (3), для рассматриваемого случая линейно зависит от q .

Краевое условие (2) определяет температуру поверхности осадконакопления и задается в виде кусочно-линейной функции $U(t)$ векового хода температур поверхности Земли. Краевое условие (3) может задаваться в виде кусочно-линейной функции $q(t)$ изменения значения глубинного теплового потока. T_i – измеренное распределение температур.

Палеотемпературное моделирование выполнялось в предположении постоянства значения плотности теплового потока из основания, начиная с юрского времени [7, 14]. Так, согласно [14], величина коэффициента изменений теплового потока в этот период варьирует в пределах 1,03...1,15. Динамика приповерхностной палеотемпературы (2) для осадочного разреза принята с учетом работ [4, 14].

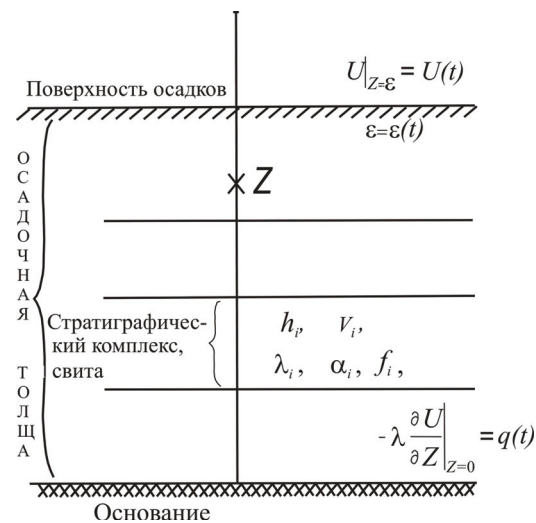


Рис. 2. Схематическое параметрическое описание слоистой осадочной толщи при палеотемпературном моделировании. Условные обозначения и пояснения приведены в тексте

Схема расчета палеотемператур состоит из двух этапов. На первом этапе по распределению температур T_i в скважине рассчитывается тепловой поток q через поверхность подстилающего основания, т. е. решается обратная задача геотермии. На втором этапе с известным значением q решается прямая задача геотермии – непосредственно рассчитываются температуры U в заданных точках осадочной толщи Z в заданные моменты геологического времени t .

Решение прямых задач выполнено на 31-м ключевом моменте геологического времени, для 3-х допущений: 1) без учета палеоклимата; 2) с учетом палеоклимата, но без позднечетвертичного похолодания; 3) с учетом позднечетвертичного похолодания.

По геотемпературному критерию выделены очаги интенсивной генерации баженовских нефтей. Пороговая температура очагов генерации нефти баженовской свитой приняты 85 °С, так как рассеянное органическое вещество (РОВ) в этих отложениях сапропелевого типа.

Определение максимальных палеотемператур по ОСВ ($R_{вт}^o$), являющихся природным «максимальным палеотермометром», позволяет использовать их в качестве опорных, «реперных» [4, 8]. Для перехода от $R_{вт}^o$ к соответствующей температуре использована диаграмма «Линии значений отражательной способности витринита, нанесенные на измененную схему Коннона». На диаграмме фиксированы линия соответствия $R_{вт}^o=0,5\%$ и температуры 80 °С, линия соответствия $R_{вт}^o=0,8\%$ и 120 °С. При определениях температуры для промежуточных значений $R_{вт}^o$ выполнялась линейная интерполяция между указанными крайними значениями [15].

Результаты исследований

Результаты моделирования геотемператур баженовской свиты для разрезов 6-ти глубоких поисково-разведочных скважин представлены в табл. 2.

По значениям пластовых температур в скважинах (табл. 1) решением обратной задачи геотермии

Таблица 2. Геотемпературы баженовской свиты в разрезе глубоких скважин

| Время, млн л. назад | Вековой ход температур на поверхности Земли, °С | Температуры*, полученные при разных вариантах допущений, °С | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|------|------|-----------------|------|------|---------------|------|------|--------------------|------|------|---------------------|------|------|-----------------------|------|------|
| | | Кулгинская 141 | | | Айсазская 1, °С | | | Таловая 1, °С | | | Лугинецкая 183, °С | | | Пуглалымская 86, °С | | | Малореченская 121, °С | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 0 | 80 | 80 | 80 | 78 | 78 | 78 | 87 | 87 | 87 | 82 | 82 | 82 | 84 | 84 | 84 | 90 | 90 | 90 |
| 0,03 | -4 (0) | 80 | 80 | 79 | 78 | 78 | 78 | 87 | 87 | 86 | 82 | 82 | 80 | 84 | 84 | 83 | 90 | 90 | 88 |
| 0,07 | -4 (0) | 80 | 80 | 79 | 78 | 79 | 78 | 87 | 87 | 86 | 82 | 82 | 81 | 84 | 84 | 83 | 89 | 90 | 88 |
| 0,11 | -4 (0) | 80 | 80 | 80 | 78 | 79 | 78 | 87 | 88 | 87 | 82 | 82 | 81 | 84 | 84 | 84 | 89 | 90 | 89 |
| 0,19 | -8 (0) | 80 | 80 | 80 | 78 | 79 | 79 | 87 | 88 | 87 | 82 | 82 | 81 | 84 | 85 | 84 | 89 | 90 | 89 |
| 0,235 | -10 (0) | 80 | 81 | 81 | 78 | 79 | 80 | 87 | 88 | 88 | 82 | 83 | 82 | 84 | 85 | 85 | 89 | 90 | 90 |
| 0,245 | 0 | 80 | 81 | 82 | 78 | 79 | 81 | 87 | 88 | 90 | 82 | 83 | 84 | 84 | 85 | 86 | 89 | 90 | 92 |
| 0,5 | 2 | 80 | 81 | 83 | 78 | 80 | 82 | 87 | 89 | 91 | 82 | 84 | 85 | 84 | 86 | 87 | 89 | 91 | 93 |
| 1,64 | 3 | 79 | 81 | 83 | 78 | 81 | 82 | 87 | 89 | 91 | 82 | 84 | 85 | 83 | 85 | 87 | 89 | 92 | 94 |
| 3 | 3 | 79 | 82 | 84 | 78 | 81 | 83 | 87 | 90 | 92 | 81 | 84 | 86 | 83 | 86 | 87 | 89 | 92 | 94 |
| 5 | 4 | 79 | 83 | 85 | 78 | 80 | 84 | 87 | 91 | 93 | 81 | 85 | 87 | 83 | 87 | 88 | 89 | 93 | 95 |
| 10 | 7 | 79 | 86 | 87 | 78 | 85 | 87 | 87 | 94 | 95 | 81 | 88 | 89 | 83 | 89 | 91 | 89 | 95 | 97 |
| 15 | 10 | 79 | 88 | 90 | 78 | 87 | 89 | 87 | 96 | 98 | 81 | 90 | 92 | 83 | 92 | 93 | 88 | 98 | 99 |
| 20 | 7 | 79 | 86 | 87 | 78 | 85 | 86 | 87 | 94 | 95 | 81 | 88 | 89 | 83 | 89 | 91 | 88 | 95 | 96 |
| 24,0 | 4 | 79 | 83 | 85 | 78 | 82 | 84 | 87 | 91 | 93 | 81 | 85 | 87 | 82 | 87 | 88 | 88 | 92 | 94 |
| 30 | 8 | 76 | 84 | 86 | 73 | 81 | 82 | 81 | 89 | 91 | 78 | 87 | 88 | 80 | 88 | 89 | 80 | 88 | 90 |
| 35 | 13 | 75 | 88 | 89 | 70 | 83 | 84 | 78 | 91 | 92 | 77 | 90 | 91 | 77 | 90 | 92 | 76 | 89 | 90 |
| 37,6 | 20 | 74 | 93 | 95 | 69 | 88 | 89 | 77 | 96 | 97 | 76 | 95 | 97 | 76 | 95 | 97 | 75 | 94 | 95 |
| 40 | 20 | 74 | 93 | 95 | 68 | 87 | 89 | 76 | 96 | 97 | 75 | 95 | 97 | 75 | 95 | 96 | 74 | 94 | 95 |
| 45 | 21 | 72 | 93 | 94 | 65 | 86 | 87 | 74 | 94 | 95 | 74 | 95 | 96 | 73 | 93 | 94 | 71 | 91 | 93 |
| 50 | 21 | 71 | 92 | 93 | 63 | 84 | 88 | 71 | 92 | 93 | 73 | 94 | 96 | 70 | 91 | 92 | 69 | 89 | 90 |
| 54,8 | 20 | 70 | 91 | 92 | 61 | 82 | 83 | 69 | 90 | 91 | 72 | 93 | 94 | 67 | 88 | 89 | 66 | 86 | 87 |
| 61,7 | 20 | 68 | 87 | 89 | 60 | 80 | 81 | 69 | 88 | 89 | 70 | 89 | 91 | 65 | 85 | 86 | 63 | 83 | 84 |
| 73,2 | 20 | 63 | 82 | 83 | 55 | 74 | 75 | 62 | 81 | 82 | 65 | 84 | 85 | 61 | 78 | 81 | 56 | 76 | 76 |
| 89,8 | 20 | 56 | 76 | 77 | 52 | 71 | 72 | 58 | 77 | 78 | 57 | 77 | 78 | 56 | 75 | 76 | 51 | 71 | 72 |
| 91,6 | 20 | 53 | 73 | 74 | 49 | 69 | 70 | 55 | 75 | 76 | 55 | 75 | 76 | 53 | 73 | 74 | 49 | 69 | 70 |
| 98,2 | 21 | 45 | 66 | 67 | 42 | 64 | 64 | 47 | 69 | 69 | 47 | 68 | 68 | 46 | 67 | 68 | 42 | 63 | 64 |
| 114,1 | 21 | 27 | 48 | 49 | 27 | 48 | 48 | 30 | 51 | 51 | 28 | 49 | 50 | 28 | 49 | 50 | 26 | 47 | 47 |
| 116,3 | 20 | 27 | 48 | 49 | 25 | 46 | 47 | 29 | 50 | 51 | 28 | 49 | 50 | 27 | 48 | 49 | 25 | 46 | 46 |
| 120,2 | 20 | 27 | 48 | 48 | 25 | 46 | 46 | 29 | 50 | 50 | 28 | 49 | 49 | 26 | 47 | 48 | 23 | 44 | 44 |
| 142,2 | 22 | 3 | 25 | 25 | 3 | 25 | 25 | 4 | 26 | 26 | 3 | 25 | 25 | 3 | 25 | 26 | 4 | 26 | 26 |
| Расчетный тепловой поток из основания, мВт/м² | | 43,7 | 43,6 | 44,4 | 40,6 | 40,4 | 41,4 | 45,0 | 44,9 | 45,7 | 51,2 | 51,1 | 52,2 | 49,5 | 49,4 | 50,4 | 52,2 | 52,0 | 53,0 |

*Варианты: 1) без учета палеоклимата; 2) с учетом палеоклимата без позднечетвертичного похолодания; 3) с учетом палеоклимата. Коричневой заливкой обозначены времена палеотемпературных максимумов в баженовской свите, синей заливкой – температуры главной зоны нефтеобразования (преимущественно сапропелевый тип РОВ).

расчитан тепловой поток из основания ($\pm 0,5$ мВт/м²) для трех разных допущений моделирования. Без учета палеоклимата его расчетные значения варьируют от 40,6 мВт/м² в Айсазской 1 до 52,2 мВт/м² для Малореченской 121. В моделях, рассчитанных с учетом палеоклимата, но без плейстоцен-голоценового похолодания, тепловой поток во всех разрезах снижается, но весьма незначительно (на 0,1...0,2 мВт/м²). Для последнего варианта моделирования, проведенного с учетом позднечетвертичного похолодания, величина теплового потока увеличивается, но также незначительно, от 0,7 мВт/м² на Кулгинской 141 и Таловой 1 до 1,0 мВт/м² на Лугинецкой 183.

На втором этапе исследований рассчитаны геотемпературы баженовских отложений.

Анализируя полученные расчетные геотемпературы, установлено, что в разрезе Кулгинской 141, без учета палеоклимата, геотермические условия для интенсивной генерации нефти из РОВ баженовской свиты не наступили. Во втором варианте расчета максимальная палеотемпература достигает 88 °С и в течение 10 млн л (в миоцене) существуют геотемпературные условия для генерации нефти. При расчетах в 3-м варианте максимальная температура достигает 95 °С, а очаг существует со времени формирования талицкой свиты (61,7 млн л назад) до начала миоцена (5 млн л назад). Таким образом, длительное существование палеоочага генерации в модели с учетом векового хода температур хорошо объясняет наличие залежи в верхнеюрских отложениях.

Иная картина наблюдается в разрезе скважины Айсазской 1. В первом варианте расчета очаг не присутствует. Во втором и третьем вариантах образуется разнесенный по времени очаг с небольшими интервалами действия и незначительными геотемпературами. С хаттского по рюпельское время разрез охлаждается и на 15 млн л выходит из главной зоны нефтеобразования.

По моделированию, проведенному в разрезах скважин Лугинецкая 183 и Пуглалымская 86 без учета палеоклимата, условий для интенсивной генерации УВ не наступает. При расчетах, с учетом палеоклимата, очаг зарождается на рубеже позднего мела и палеогена и существует в течение 72,7 млн л в разрезе Лугинецкой 183 и 61,5 млн л в разрезе Пуглалымской 86. Максимальный прогрев баженовской свиты в моделях с учетом векового хода температур приходится на время 37,6 млн л назад и достигает 97 °С. В современном разрезе очаги интенсивной генерации нефти не фиксируются при всех 3-х допущениях. Существование палеоочагов генерации нефти в моделях с учетом векового хода температур хорошо объясняет наличие залежей в верхнеюрских отложениях.

В моделях скважин Таловая 1 и Малореченская 121, без учета палеоклимата, условия существования очага наступают в хаттско-рюпельское время, при максимальных геотемпературах 87...90 °С. При построении модели с учетом векового хода темпе-

ратур (как с учетом похолодания, так и без учета похолодания) время существования очагов в разрезах этих скважин существенно увеличивается. Максимальный прогрев в разрезе Таловая 1 достигает 98 °С, а в разрезе скважины Малореченская 121 – 99 °С.

Обсуждение результатов

Сопоставление «реперных» палеотемператур (по ОСВ) и расчетных максимальных палеотемператур для разрезов исследуемых скважин приведено в табл. 3.

В моделях, построенных без учета палеоклимата, расхождение между «реперными» и расчетными максимальными геотемпературами для разрезов практически всех скважин имеет очень высокое значение и достигает 28 °С. Причем все расчетные геотемпературы занижены по отношению к «реперным».

При моделировании геотемпературного режима с учетом изменения палеоклимата за всю историю формирования осадочного разреза сходимостью максимальных расчетных геотемператур и «реперных» находится, в основном, в пределах допустимых значений (± 5 °С) или близких к ним. Причем в третьем варианте расчетов, с учетом резкого похолодания в квартере, сходимость улучшается, хотя и незначительно.

Для разрезов скважин Пуглалымская 86 и Кулгинская 141 (для геотемператур тюменской свиты), хотя изменения и заметны по сравнению с геотемпературами в модели без учета палеоклимата, но расхождение с «реперными» приемлемых значений не достигает. Здесь, по-видимому, может влиять такой неучтенный, но вероятный фактор, как значительное сокращение мощности палеоразреза в результате размыва какой-то его части. И действительно, положительные структуры Среднеасюганский мегавал и Лавровский мезовыступ, где расположены эти скважины, испытывали тенденцию к «росту» во все времена их развития, а стратиграфические границы формирующихся свит в мел-кайнозойское время имеют несогласное залегания [12].

Результаты моделирования с учетом палеоклимата, по временным и температурным характеристикам выделяемых очагов интенсивной генерации нефти (табл. 2), лучшим образом согласуются с установленной нефтегазоносностью недр. Так, мощные очаги генерации баженовских нефтей в разрезах скважин Таловая 1 и Малореченская 121 объясняют генезис одноименных месторождений. Выявляемые палеоочаги генерации баженовских нефтей в разрезах скважин Кулгинская 141, Лугинецкая 183 и Пуглалымская 86 объясняют вскрытые здесь залежи. Незначительный, прерывистый очаг в разрезе скважины Айсазская 1 объясняет встреченные в разрезе газопрооявления.

Важно заметить, что учет палеоклимата при палеорекострукциях термического режима материнских отложений существенно улучшает вре-

Таблица 3. Сопоставление «реперных» температур по ОСВ и расчетных максимальных палеотемператур

| Скважина | Свита; интервал в современном разрезе, м | «Реперные» значения по ОСВ | | Расчетные максимальные палеотемпературы, °С | | | | | | Тектоническая приуроченность | Географическое положение |
|-------------------|--|----------------------------|-----------------|---|---------------|--------------------|---------------|-------------------|---------------|--|--------------------------|
| | | R _{вр.} , % | Температура, °С | Без учета палеоклимата | | Учет палеоклимата* | | Учет палеоклимата | | | |
| | | | | Значение | Разница с ОСВ | Значение | Разница с ОСВ | Значение | Разница с ОСВ | | |
| Кулгинская 141 | Васюганская; 2661...2676 | 0,67 | 103 | 81 | -22 | 95 | -8 | 96 | -7 | Юго-восточная часть Лавровского мезовыступа | 57°20' с.ш. |
| | Тюменская; 2894 | 0,77 | 115 | 87 | -28 | 101 | -14 | 102 | -13 | | |
| Айсазская 1 | Баженовская; 2700 | 0,62 | 96 | 78 | -18 | 88 | -8 | 89 | -7 | Сочленение Тамянского и Осевого прогибов | 57°21' с.ш. |
| | Тюменская; 3150 | 0,76 | 101 | 89 | -12 | 99 | -3 | 100 | -1 | | |
| Таловая 1 | Баженовская; 2760 | 0,59 | 92 | 87 | -5 | 96 | +4 | 97 | +5 | Игольско-Таловое куполовидное поднятие | 57°29' с.ш. |
| Лугинецкая 183 | Васюганская; 2345 | 0,63 | 98 | 83 | -15 | 96 | -2 | 98 | 0 | Северо-восточная часть Пудинского мезоподнятия | 57°31' с.ш. |
| Пуглалымская 86 | Тюменская; 2673 | 0,76 | 115 | 91 | -24 | 102 | -13 | 104 | -11 | Васюганский мезовал | 58°45' с.ш. |
| Малореченская 121 | Васюганская; 2470 | 0,67 | 103 | 91 | -12 | 99 | -4 | 100 | -3 | Юго-восточная часть Нижневартовского свода | 60°20' с.ш. |
| | Тюменская; 2620 | 0,70 | 106 | 95 | -11 | 104 | -2 | 105 | -1 | | |

*Без позднечетвертичного похолодания.

менные и температурные характеристики очагов интенсивной генерации нефти, что в конечном итоге увеличивает прогнозные ресурсы УВ при их оценке объемно-генетическим методом.

Вопрос влияния резкого похолодания на поверхности земли в позднечетвертичное время на геотермический режим материнских отложений не является актуальным для баженовской свиты, т. к. это влияние установлено как весьма незначительное (табл. 2 и 3).

Следует отметить, что степень влияние палеоклимата на результаты моделирования геотермического режима баженовских отложений не зависит от территориального положения в пределах широт Томской области (табл. 3).

Заключение

1. Привлечение геотемператур, определенных по отражательной способности витринита, в качестве «реперных» позволило определить

наиболее адекватный ход термической истории нефтематеринских баженовских отложений на широтах Томской области.

2. Вековой ход температур земной поверхности (палеоклимат) оказал существенное влияние на термический режим и интенсивность генерации нефти рассеянным органическим веществом баженовской свиты.
3. Максимальное влияние на формирование палеотемператур баженовской свиты оказало изменение климатических условий в олигоцен-раннечетвертичное время (37...0,5 млн л назад).
4. При оценках ресурсов углеводородов объемно-генетическим методом необходимо учитывать влияние палеоклимата, как одного из основных факторов.

Авторы выражают благодарность доктору геол.-минерал. наук А.Н. Фомину (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск), любезно предоставившему данные по отражательной способности витринита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов С.А., Исаев В.И. Моделирование нафтидогенеза Южного Ямала // Геофизический журнал. – 2011. – Т. 33. – № 2. – С. 80–114
2. Сафронов П.И., Ершов С.В., Ким Н.С., Фомин А.Н. Моделирование процессов генерации, миграции и аккумуляции углеводородов в юрских и меловых комплексах Енисей-Ханганского бассейна // Геология нефти и газа. – 2011. – № 5. – С. 48–55.
3. Галушкин Ю.И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазосности. – М.: Научный Мир, 2007. – 456 с.
4. Курчиков А.Р., Ставицкий Б.П. Геотермия нефтегазоносных областей Западной Сибири. – М.: Недра, 1987. – 134 с.

5. Ерофеев Л.Я., Завидий Т.Ю. Определение поправки за палеоклиматический фактор для коррекции результатов геотермических исследований // Геофизика. – 2010. – № 5. – С. 48–52.
6. Грещкая Е.В. Прогноз состава флюидов в бассейнах Охотского региона // Геодинамические процессы и природные катастрофы в Дальневосточном регионе: Тезисы докладов науч. конф., посвящ. 65-летию ИМГиГ ДВО РАН. – Южно-Сахалинск, 26–30 сентября 2011. / отв. ред. Б.В. Левин. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2011. – С. 24–25.
7. Исаев В.И., Фомин А.Н. Очаги генерации нефтей баженовского и тогурского типов в южной части Нюрольской мегавпадины // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 6. – С. 734–745.

8. Фомин А.Н. Углетрографические исследования в нефтяной геологии. – Новосибирск: Ин-т геологии и геофизики СО АН СССР, 1987. – 166 с.
9. Бурштейн Л.М., Жидкова Л.В., Конторович А.Э., Меленевский В.Н. Модель катагенеза органического вещества (на примере баженовской свиты) // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
10. Волкова В.С. Стратиграфия и история развития растительности Западной Сибири в позднем кайнозое. – М.: Недра, 1977. – 240 с.
11. Евсеева Н.С. География Томской области. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2001. – 223 с.
12. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
13. Исаев В.И., Коржов Ю.В., Лобова Г.А., Попов С.А. Нефтегазоносность Дальнего Востока и Западной Сибири по данным гравиметрии, геотермии и геохимии. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 384 с.
14. Ермаков В.И., Скоробогатов В.А. Тепловое поле и нефтегазоносность молодых плит СССР. – М.: Недра, 1986. – 222 с.
15. Исаев В.И. Интерпретация данных гравиметрии и геотермии при прогнозировании и поисках нефти и газа. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 172 с.

Поступила 30.05.2012 г.

УДК 552.578.2.061.4:550.836(571.16)

ГЕОТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ И НЕФТЕПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЗОНЫ МЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ (НЮРОЛЬСКАЯ МЕГАВПАДИНА)

Е.Н. Осипова, Г.А. Лобова

Томский политехнический университет
E-mail: osipovaen@list.ru

По замерам пластовых температур верхнеюрских отложений построена карта распределения геотемператур баженовской свиты Нюрольской мегавпадины и структур ее обрамления. По геотемпературному критерию выделены очаги интенсивной генерации баженовских нефтей. Местоположения эпицентров очагов рекомендованы в качестве первоочередных зон для выявления объектов в меловом нефтегазоносном комплексе.

Ключевые слова:

Геотемпературы, баженовские нефти, меловой нефтегазоносный комплекс, Нюрольская мегавпадина.

Key words:

Geotemperature, Bazhenov oil, cretaceous oil-and-gas complex, Nyurotsky megahollow.

Введение

Основным нефтегазоносным комплексом (НГК) промысловых районов Томской области (Левобережье Оби) является верхнеюрский – пласты горизонта Ю₁ васюганской свиты. Высокая степень освоения юрских НГК предопределяет актуальность оценки перспектив и освоение новых земель или новых объектов.

Когда-то объекты в меловом НГК были малопривлекательными (трудновывяемыми), по сравнению с объектами в юрских НГК, из-за сложного типа ловушек в меловых клиноформах и низкоомности меловых продуктивных пластов.

На сегодняшний день возможности высокоразрешающей поисковой сейсморазведки и новые методики интерпретации данных ГИС снимают указанные трудности [1, 2]. И на повестку дня ставится вопрос: какие земли (зоны) в пределах нефтепромыслов Томской области являются наиболее перспективными (первоочередными) для изучения и освоения мелового НГК? Попытка ответить на этот вопрос – цель настоящего сообщения.

Постановка задачи

Основным источником формирования залежей углеводородов (УВ) в ловушках горизонта Ю₁(vs, J₂b–J₃o) и мелового НГК Левобережья является рассеянное органическое вещество (РОВ) отложений баженовской свиты (bg, J₃tt). При катагенезе РОВ решающим фактором интенсивности генерации УВ являются геотемпературы. Балансовая модель процессов нефтегазообразования в баженовской свите [3] позволяет по геотемпературному критерию прогнозировать начало интенсивного образования УВ из РОВ: с 50 °С – верхняя зона газообразования (ВЗГ); с 85...95 °С (МК₁¹–МК₁²) – вхождение материнских пород в главную зону нефтеобразования (ГЗН).

Нефтепромыслы Левобережья Томской области сосредоточены в Нюрольской мегавпадине и на структурах ее обрамления (рис. 1).

В пределах мегавпадины выделены 5 отрицательных и 2 положительные структуры III порядка. Структуры III порядка осложнены локальными структурами, с которыми связаны месторождения

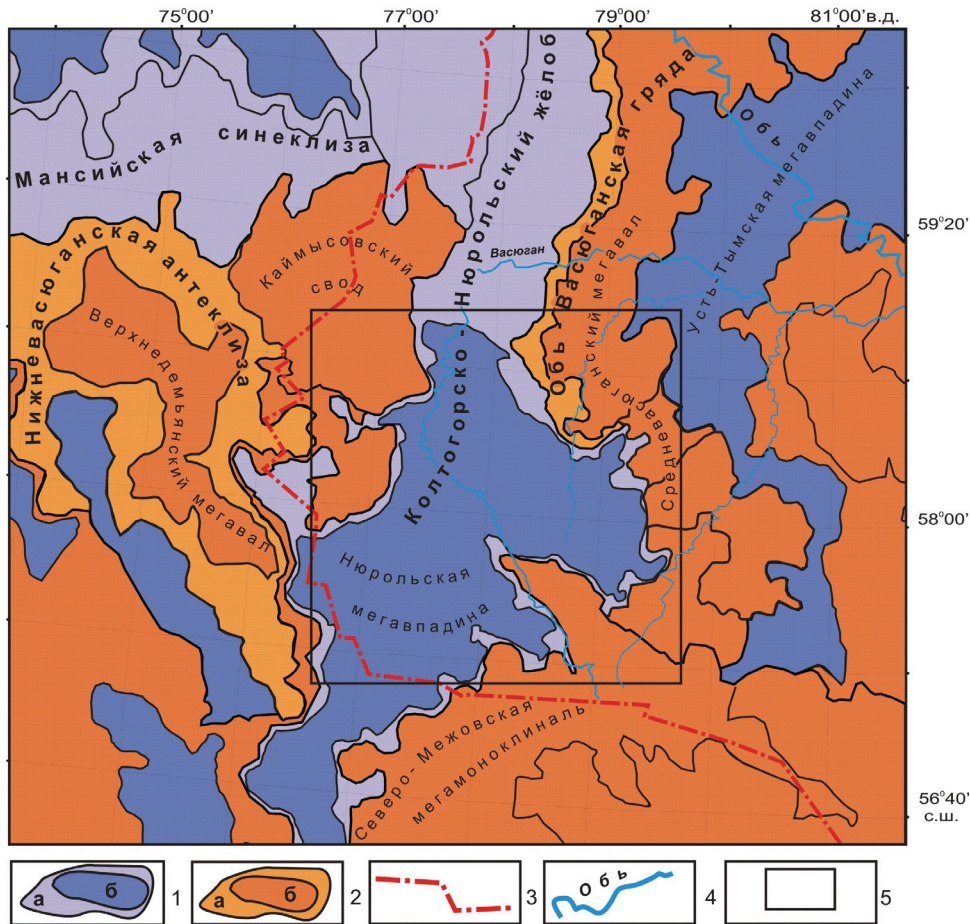


Рис. 1. Обзорная схема территории исследований (на основе тектонической карты юрского структурного яруса [4]): 1 – отрицательные тектонические элементы надпорядковые (а), 1 порядка (б); 2 – положительные тектонические элементы надпорядковые (а), 1 порядка (б); 3 – юго-западная граница Томской области; 4 – основные реки; 5 – контур территории прогнозирования

УВ (рис. 2). В табл. 1 приведена характеристика месторождений.

Материнские отложения баженовской свиты распространены повсеместно. Высокий генерационный потенциал пород свиты определен содержанием $S_{орг}$ 5...12 % и сапропелевым типом РОВ [4].

В табл. 2 приведены данные испытаний 42 представительных глубоких скважин. Из испытанных объектов в таблице представлены объекты, отвечающие следующим условиям: 1) наличие измеренной температуры; 2) интервал близок к положению баженовских отложений в разрезе; 3) при гидродинамическом исследовании получен хороший приток флюида, что позволяет считать измеренную температуру близкой к пластовой.

Задача и алгоритм наших исследований формулируются следующим образом. Используя замеры пластовых температур верхнеюрских отложений и относя их к температурам баженовской свиты, построить карту распределения геотемператур на территории нефтепромыслов Томской области. Далее, по геотемпературному критерию выделить ГЗН – очаги интенсивной генерации баженовской

нефти. Сопоставить положение очагов с размещением залежей в верхнеюрских и меловых отложениях. В случае положительной корреляции местоположение очагов рекомендовать в качестве первоочередных зон для выявления новых объектов в меловом НГК.

Такая постановка задачи не совсем корректная. Мы определяем современное положение очагов интенсивной генерации баженовских нефтей, не учитывается пространственная и термическая динамика очагов в геологическом времени. Однако опыт показывает [5], что пространственное положение эпицентров очагов существенно не меняется.

Результаты исследований

По значениям геотемператур верхнеюрских отложений в 42 скважинах методом интерполяции построена схематическая карта изотерм территории исследований и прогноза положения очагов интенсивной генерации баженовских нефтей (рис. 3). Пороговые температуры, определяющие границы очагов интенсивной генерации нефти баженовской свитой, приняты 85 °С.

Анализируя геотермический режим современного верхнеюрского разреза, можно отметить, что

Таблица 1. Характеристика месторождений

| Месторождение | Условный номер (рис. 2) | НГК | Фазовое состояние | Горизонт (пласты) |
|----------------------|-------------------------|-------------------|----------------------|--|
| Лонтынь-Яхское | 1 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Южно-Черемшанское | 2 | Меловой | Нефть | А ₄ , А ₇ , Б ₅₋₈ , Б ₁₃ |
| Поселковское | 3 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ ¹ |
| Карасевское | 4 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Западно-Карасёвское | 5 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ ² |
| | | Среднеюрский | Нефть | Ю ₂ |
| Двуреченское | 6 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Моисеевское | 7 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Западно-Моисеевское | 8 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Крапивинское | 9 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Западно-Крапивинское | 10 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Тагайское | 11 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Южно-Пионерское | 12 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Чворовое | 13 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Глуховское | 14 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₀ -Ю ₁ |
| Поньжевое | 15 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Налимье | 16 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ ¹ |
| Тамратское | 17 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ ¹ |
| Федюшкинское | 18 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Западно-Карайское | 19 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| | | Среднеюрский | Нефть | Ю _{4,6} |
| Карайское | 20 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₀ |
| Игольско-Таловое | 21 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Фестивальное | 22 | Кора выветривания | Нефть | НГТЗК |
| Речное | 23 | Палеозойский | Газоконденсат | М ₁ |
| Ключевское | 24 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Пуглалымское | 25 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Средненюрольское | 26 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Колотушное | 27 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Мыльджинское | 28 | Меловой | Газоконденсат | Б ₀₋₁₂ |
| | | Верхнеюрский | Газ, нефть | Ю ₁ |
| Южно-Мыльджинское | 29 | Меловой | Нефть | Б ₄₋₆ |
| | | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| | | Среднеюрский | Нефть | Ю ₂ |
| Верхнесалатское | 30 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Шингинское | 31 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ ¹ |
| Западно-Лугинецкое | 32 | Верхнеюрский | Нефть, газоконденсат | Ю ₁ |
| Майское | 33 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ ³⁻⁴ |
| | | Нижнеюрский | Нефть+газ | Ю ₁₂₋₁₃ |
| Южно-Майское | 34 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ |
| Еллейское | 35 | Верхнеюрский | Нефть | Ю ₁ ⁰ |
| Водораздельное | 36 | Среднеюрский | Газ, конденсат | Ю ₇ |
| Кулгинское | 37 | Верхнеюрский | Нефть, газконденсат | Ю ₁ ¹⁻² |
| Нижнетабаганское | 38 | Верхнеюрский | Газоконденсат | Ю ₁ |
| | | Среднеюрский | Нефть | Ю ₃ |
| | | | Газ | Ю ₅ |
| Палеозойский | Нефть | М, М1 | | |
| Смоляное | 39 | Среднеюрский | Нефть | Ю ₄ |
| Тамбаевское | 40 | Среднеюрский | Нефть, газ | Ю ₆₋₇ |
| | | Палеозойский | Нефть | PZ |
| Южно-Тамбаевское | 41 | Палеозойский | Нефть | М |
| Широтное | 42 | Нижнеюрский | Нефть | Ю ₁ ³ |
| Южно-Табаганское | 43 | Палеозойский | Нефть | М |
| Арчинское | 44 | Палеозойский | Нефть, газоконденсат | М ₁₋₁₀ |
| Урманское | 45 | Палеозойский | Нефтегазконденсат | М, М ₁ |

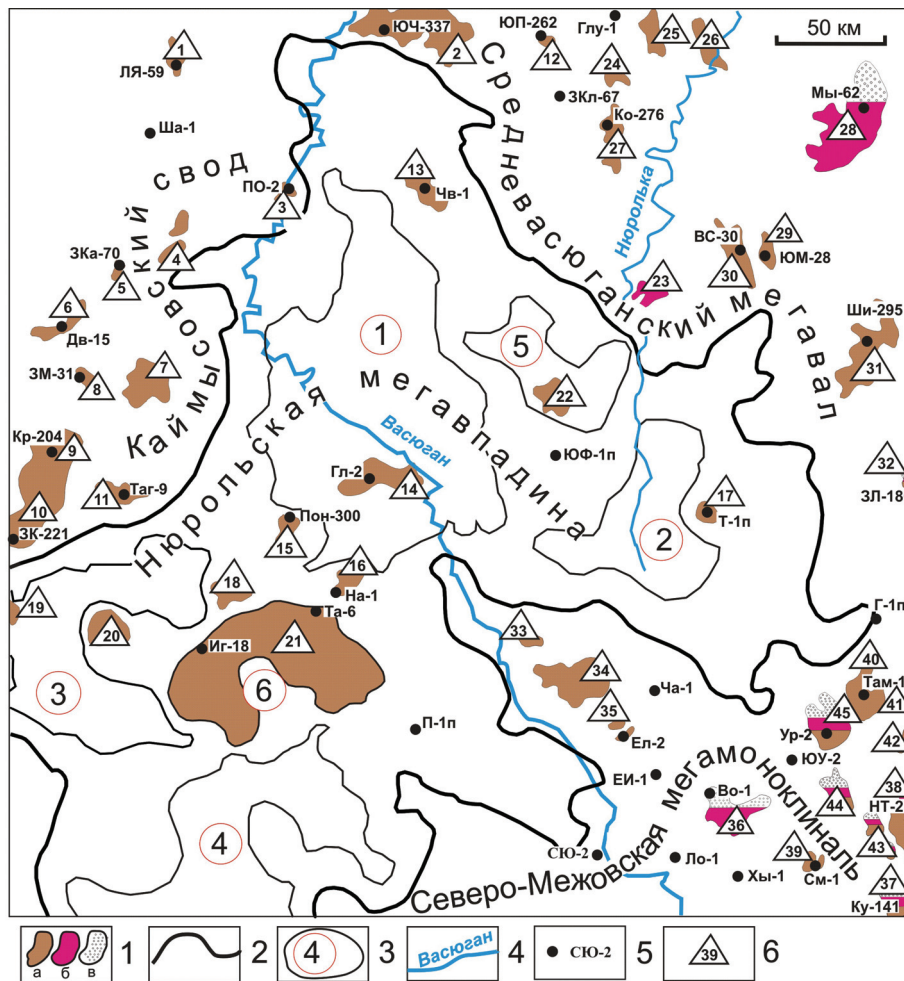


Рис. 2. Схема нефтегазоносности Нюрольской мегавпадины и структур ее обрамления (на основе [4]): 1 – месторождения: а) нефтяное; б) конденсатное; в) газовое; 2 – граница Нюрольской мегавпадины; 3 – структура III порядка и ее номер; 4 – речная сеть; 5 – скважина и ее условный индекс (см. табл. 2); 6 – условный номер месторождения (см. табл. 1). Структуры III порядка: 1 – Кулан-Игайская впадина; 2 – Тамрадская впадина; 3 – Осевой прогиб; 4 – Тамянский прогиб; 5 – Фестивальный вал; 6 – Игольско-Таловое куполовидное поднятие

материнская баженовская свита большей части Нюрольской мегавпадины располагается в ГЗН. Максимальные геотемпературы, достигающие 105°C , приурочены к центральной и западной частям Кулан-Игайской впадины, восточной части Тамрадской впадины и протягиваются в пределы Шингинской мезоседловины. В юго-восточной и северо-восточной части территории геотемпературы снижаются до 75°C , имея значения температур ВЗГ.

Плановое положение верхнеюрских и меловых залежей нефти хорошо согласуется с положением очагов генерации баженовских нефтей – практически все месторождения этих залежей попадают в контур изолинии в 85°C .

Фазовое состояние газовых и газоконденсатных залежей УВ на Кулгинском и Мыльджинском месторождениях объясняется нахождением этих месторождений в пограничной области между ГЗН и ВЗГ баженовских отложений. Верхнеюрская залежь газоконденсата Нижнетабаганского месторож-

дения располагается в пределах ВЗГ баженовских отложений.

На участках отсутствия очагов генерации баженовских нефтей практически нет залежей в верхнеюрском и меловом НГК. Все залежи месторождений Пудинского мезоподнятия (Средневазюганский мегавал), Лавровского мезовыступа и Чузикско-Чижапской мезоседловины (Северо-Межовская мегамоноклиналь), находящиеся (по латерали) за пределами очагов генерации баженовских нефтей, принадлежат палеозойскому и нижнеюрскому НГК. Здесь источником УВ палеозойского и нижнеюрского НГК является РОВ нижнеюрских отложений материнской тогурской пачки (tg, J_1t) [6].

Выводы

1. Построена карта распределения геотемператур верхнеюрских отложений Нюрольской мегавпадины (Томская область) и структур ее обрамления. По геотемпературному критерию вы-

Таблица 2. Пластовые температуры по результатам гидродинамических исследований

| Название площади, номер скважины | Условный индекс скважины (рис. 2) | Интервал испытания, м | Свита | Горизонт (пласт) | $T_{пл}$, °С |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------|---------------|
| Лонтынь-Яхская 59 | ЛЯ-59 | 2468...2483 | Васюганская | $Ю_1^{0-1}$ | 93 |
| Шахматная 1 | Ша-1 | 2450...2468 | Васюганская | $Ю_1$ | 87 |
| Поселковая 2 | По-2 | 2666...2674 | Васюганская | $Ю_1^1$ | 100 |
| Западно-Карасёвская 70 | ЗКа-70 | 2655...2660 | Васюганская | $Ю_1^2$ | 86 |
| Западно-Моисеевская 31 | ЗМ-31 | 2713...2718 | Васюганская | $Ю_1^{3-4}$ | 85 |
| Двуреченская 15 | Дв-15 | 2682...2683 | Васюганская | $Ю_1^2$ | 89 |
| Крапивинская 204 | Кр-204 | 2697...2701 | Васюганская | $Ю_1^1$ | 94 |
| Западно-Крапивинская 221 | ЗК-221 | 2770...2773 | Васюганская | $Ю_1^{3-4}$ | 98 |
| Тагайская 9 | Таг-9 | 2812...2815 | Васюганская | $Ю_1^1$ | 97 |
| Южно-Пионерская 262 | ЮП-262 | 2742...2754 | Васюганская | $Ю_1^{1-2}$ | 80 |
| Южно-Черемшанская 337 | ЮЧ-337 | 2686...2707 | Баженовская-васюганская | $Ю_0-Ю_1^1$ | 98 |
| Западно-Ключевская 67 | ЗКл-67 | 2611...2619 | Васюганская | $Ю_1^4$ | 89 |
| Глуховская 2 | Гл-2 | 2962...2967 | Васюганская | $Ю_1^0$ | 107 |
| Игольская 18 | Иг-18 | 2810...2813 | Васюганская | $Ю_1^0$ | 98 |
| Таловая 6 | Та-6 | 2803...2808 | Васюганская | $Ю_1^0$ | 93 |
| Поньжевая 300 | Пон-300 | 2910...2922 | Васюганская | $Ю_1^{3-4}$ | 103 |
| Пешеходная 1 (параметрическая) | П-1п | 2682...2710 | Баженовская-васюганская | $Ю_0-Ю_1^1$ | 89 |
| Налимья 1 | На-1 | 2875...2887 | Наунакская | $Ю_1^1$ | 95 |
| Южно-Фестивальная 1 (параметрическая) | ЮФ-1п | 2790...2820 | Баженовская | $Ю_0$ | 90 |
| Тамратская 1 (параметрическая) | Т-1п | 2853...2860 | Васюганская | $Ю_1^1$ | 107 |
| Чворовая 1 | Чв-1 | 2765...2772 | Васюганская | $Ю_1^1$ | 97 |
| Мыльджинская 62 | Мы-62 | 2368...2380 | Васюганская | $Ю_1^3$ | 84 |
| Южно-Мыльджинская 28 | ЮМ-28 | 2414...2420 | Васюганская | $Ю_1^1$ | 85 |
| Верхнесалатская 30 | ВС-30 | 2462...2469 | Васюганская | $Ю_1^{3-4}$ | 87 |
| Глухарина 1 | Глу-1 | 2569...2574 | Васюганская | $Ю_1^{3-4}$ | 100 |
| Колотушная 276 | Ко-276 | 2637...2643 | Васюганская | $Ю_1^1$ | 90 |
| Гордеевская 1 (параметрическая) | Г-1п | 2680...2735 | Васюганская | $Ю_1^1$ | 75 |
| Западно-Лугинецкая 180 | ЗЛ-180 | 2445...2454 | Васюганская | $Ю_1^4$ | 84 |
| Шингинская 295 | Ши-295 | 2616...2636 | Васюганская | $Ю_1$ | 103 |
| Тамбаевская 1 | Там-1 | 2593...2597 | Васюганская | $Ю_1$ | 84 |
| Урманская 2 | Ур-2 | 2628...2636 | Васюганская | $Ю_1$ | 82 |
| Южно-Урманская 2 | ЮУ-2 | 2665...2681 | Васюганская | $Ю_1^0$ | 70 |
| Чагвинская 1 | Ча-1 | 2641...2647 | Васюганская | $Ю_1^2$ | 88 |
| Еллейская 2 | Ел-2 | 2632...2640 | Васюганская | $Ю_1^1$ | 84 |
| Еллей-Игайская 1 | ЕИ-1 | 2604...2614 | Васюганская | $Ю_1^{1-2}$ | 79 |
| Водораздельная 1 | Во-1 | 2650...2660 | Васюганская | $Ю_1^{3-4}$ | 80 |
| Хылькинская 1 | Хы-1 | 2644...2649 | Васюганская | $Ю_1^1$ | 89 |
| Смоляная 1 | См-1 | 2642...2647 | Васюганская | $Ю_1^1$ | 84 |
| Лосинская 1 | Ло-1 | 2630...2636 | Васюганская | $Ю_1^{0-1}$ | 80 |
| Северо-Юлжавская 2 | СЮ-2 | 2674...2707 | Васюганская | $Ю_1$ | 78 |
| Кулгинская 142 | Ку-142 | 2650...2652 | Васюганская | $Ю_1^{1-2}$ | 87 |
| Нижнетабаганская 23 | НТ-23 | 2595...2632 | Васюганская | $Ю_1^{0-1}$ | 80 |

Примечание: данные гидродинамических исследований изучены и сведены из первичных «Дел скважин» (фондовые материалы Томского филиала ФГУ «ТФИ по СФО»).

- делены и закартированы очаги интенсивной генерации баженовских нефтей.
- Показана корреляция положения очагов генерации баженовских нефтей с размещением залежей месторождений углеводородов в верхнеюрском и меловом нефтегазоносных комплексах.
- Наиболее нефтеперспективными зонами для изучения и освоения мелового нефтегазоносного комплекса являются центральная и западная части Кулан-Игайской впадины, восточная часть Тамрадской впадины и Шингинская мезоседловина.

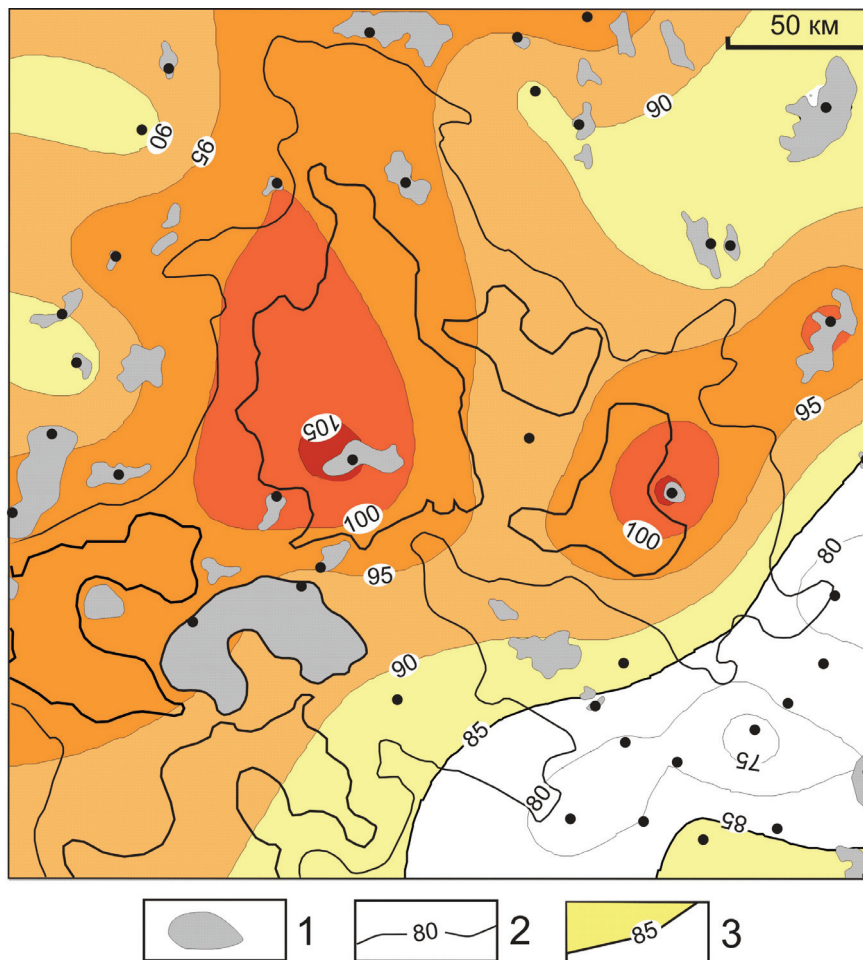


Рис. 3. Схематическая карта распределения геотемператур верхнеюрских отложений и положения очагов интенсивной генерации баженских нефтей: 1 – месторождения в верхнеюрском и меловом НГК; 2 – геоизотермы верхнеюрских отложений, °С; 3 – контур очага интенсивной генерации баженских нефтей. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимова О.О., Кулагин С.И. Выявление ловушек углеводородов неантиклинального типа в верхне-среднеюрских отложениях (юго-восточная часть Томской области) // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 51–53.
2. Мельник И.А. Методика выявления нефтегазоносных объектов в эпигенетически преобразованных коллекторах Западной Сибири // Геофизика. – 2012. – № 1. – С. 31–35.
3. Бурштейн Л.М., Жидкова Л.В., Конторович А.Э., Меленевский В.Н. Модель катагенеза органического вещества (на примере баженской свиты) // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 6. – С. 1070–1078.
4. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 253 с.
5. Исаев В.И., Коржов Ю.В., Лобова Г.А., Попов С.А. Нефтегазоносность Дальнего Востока и Западной Сибири по данным гравиметрии, геотермии и геохимии. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 384 с.
6. Гончаров И.В., Носова С.В., Самойленко В.В. Генетические типы нефтей Томской области // Химия нефти и газа: Матер. V Междунар. конф. – Томск: СО РАН, 2003. – С. 10–14.

Поступила 10.09.2012 г.

ГЛУБИННАЯ ТЕКТОНИКА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ

А.М. Пашевин, А.Е. Лаврентьева, Н.К. Иванов

ФГУНПП «Иркутскгеофизика», г. Иркутск
E-mail: amp@gic.irk.ru

Комплексные геофизические исследования краевой части Сибирской платформы в предгорной области Ачитканского хребта Патомского нагорья, выполненные на современной аппаратуре, позволяют оценить глубинную тектонику региона. Наиболее вероятным представляется, что динамические нагрузки на земную кору, имеющие коллизионную природу, привели к возникновению ряда наклонных разломных зон, субпараллельных контуру горного обрамления, а непосредственный контакт протерозойских отложений с отложениями осадочного чехла платформы проходит по наклонному грабенообразному надвигу.

Ключевые слова:*Геофизика, электромагнитные зондирования, глубинная тектоника, Сибирская платформа.***Key words:***Geophysics, electromagnetic sounding, deep tectonics, Siberian platform.*

Анализ публикаций свидетельствует о том, что внутренней структуре земной коры и проявлениям особенностей этой структуры в осадочном чехле платформ уделяется мало внимания. Отметить можно лишь отдельные публикации [1–5]. Вместе с тем представленные в журнале работы позволяют констатировать, что глубинная тектоника консолидированной части земной коры, а также особенности взаимодействия геосфер на границе кора–мантия в определённой степени контролируют распределение месторождений полезных ископаемых. При этом ключевая роль в процессе генерации и переноса рудного вещества отводится флюидным потокам, а пути миграции и зоны концентрации определяются характером проявления разломной тектоники. Все эти исследования позволяют наметить критерии поисков месторождений полезных ископаемых. Однако достоверность прогноза по таким критериям может быть оценена лишь после детального исследования глубинной структуры конкретного региона комплексом геофизических методов. В настоящей статье рассматриваются результаты таких исследований на примере одного из районов Сибирской платформы, которые могут быть использованы в качестве фактической основы, позволяющей оценить эффективность намеченных критериев как при поисках рудных месторождений, так и месторождений углеводородного сырья.

Зона сопряжения Байкало-Патомского нагорья и Приленского плато является одной из наиболее дискуссионных в геологическом плане территорий Восточной Сибири. Между тем унаследованность развития региона в формировании как древних, так и современных структур мало у кого вызывает сомнение. Соответственно, и современный структурно-тектонический облик региона, который сформировался в результате длительной эволюции, предопределяется глубинной тектоникой, и прежде всего положением и активностью разломных зон древнего заложения.

Однако серьёзным препятствием в исследовании тектоники региона является весьма скромный

объём выполненных здесь ранее геофизических работ. Определённые усилия, позволяющие уточнить глубинную структуру краевой части платформы в пределах правобережья реки Киренга и нижнего течения реки Витим предприняты в последние годы. На территории выполнены комплексные геолого-геофизические исследования сейсморазведкой методом общей глубинной точки (МОГТ), электроразведкой магнитотеллурическими зондированиями (МТЗ), зондированиями становления поля (ЗСП), частотными зондированиями вызванной поляризации (ЧЗ-ВП), а также съёмка магнитного, гравитационного полей и геохимия. Кроме того, подвергнуты переобработке и переинтерпретации материалы геофизических исследований прошлых лет, в частности точечных сейсмических зондирований (ТСЗ).

Предпатомский район Сибирской платформы в пределах Прибайкалья представляет собой область сопряжения Ангаро-Ленского жёсткого блока и подвижного Байкало-Патомского нагорья. Переходная область включает Лено-Киренскую зону перикратонных опусканий и верхнепротерозойский Предпатомский (Прибайкальский) краевой прогиб. Интенсивность тектонической переработки последних, по мере приближения к окраине платформы, заметно возрастает, поскольку область сопряжения Сибирской платформы и Саяно-Байкальского складчатого пояса испытывает интенсивные тектонические напряжения, которые вызывают структурно-тектоническую перестройку региона. Современные деформационные преобразования, которым подвергается южная окраина платформы, несомненно, обязаны тектоническим напряжениям со стороны Саяно-Байкальского подвижного пояса. Последнее подтверждается сравнением пространственно-временных распределений платформенных землетрясений с картиной сейсмической жизни расположенного южнее горного обрамления.

Соответствие локализации в пространстве и времени сейсмических событий краевой части и южного обрамления платформы не оставляет сомнения

в том, что современные деформационные процессы, связанные с тектоническим развитием Саяно-Байкальского подвижного пояса, проникают далеко вглубь платформы [2, 6]. Однако, вне всякого сомнения, максимальная разрядка тектонических напряжений, а соответственно и максимальные структурообразующие преобразования осадочного чехла платформы (и фундамента) происходят в пределах наиболее близкой к горному обрамлению территории. Это выражается в сложной морфологии поверхности фундамента, в высокой интенсивности неотектонических движений, аномально интенсивном смятии осадочного чехла (вплоть до сдвигания отдельных интервалов разреза), в опрокинутом залегании складок, а также в многочисленных разрывных нарушениях, в выщелачивании солей, в интенсивном постседиментационном преобразовании карбонатных разностей и т. п.

Отметим, что коллизионная природа тектонического напряжения недр северо-восточного Прибайкалья в последнее время становится особенно популярной, поскольку за прошедшие два десятилетия революционно изменились взгляды на способность горных масс перемещаться в субгоризон-

тальном направлении [7]. Таким образом, источником тектонических сил структурно-вещественных преобразований горных пород, выполняющих геологический разрез района, с высокой степенью вероятности, является коллизия платформы и горно-складчатого обрамления. Свидетельством существования значительных субгоризонтальных сжимающих напряжений в районе Предпатовского прогиба является его морфология в плане. Формирование крупной предгорной структуры протяженностью несколько сотен километров и шириной порядка 60...100 км, которая характеризуется мелкой продольной складчатостью, по краю которой наблюдаются зоны расщепления, раздавливания пород, признаки надвигов, несомненно, происходило в условиях сжатия. Вместе с тем горно-складчатые образования, непосредственно соседствующие с платформенным разрезом, характеризуются интенсивной деструкцией, разбиты на блоки, отдельные из которых в плане представляются смещенными во внутренние области платформы. В частности таковым является Могольский выступ, расположенный в пределах бассейна реки Моголь (правый приток Киренги).

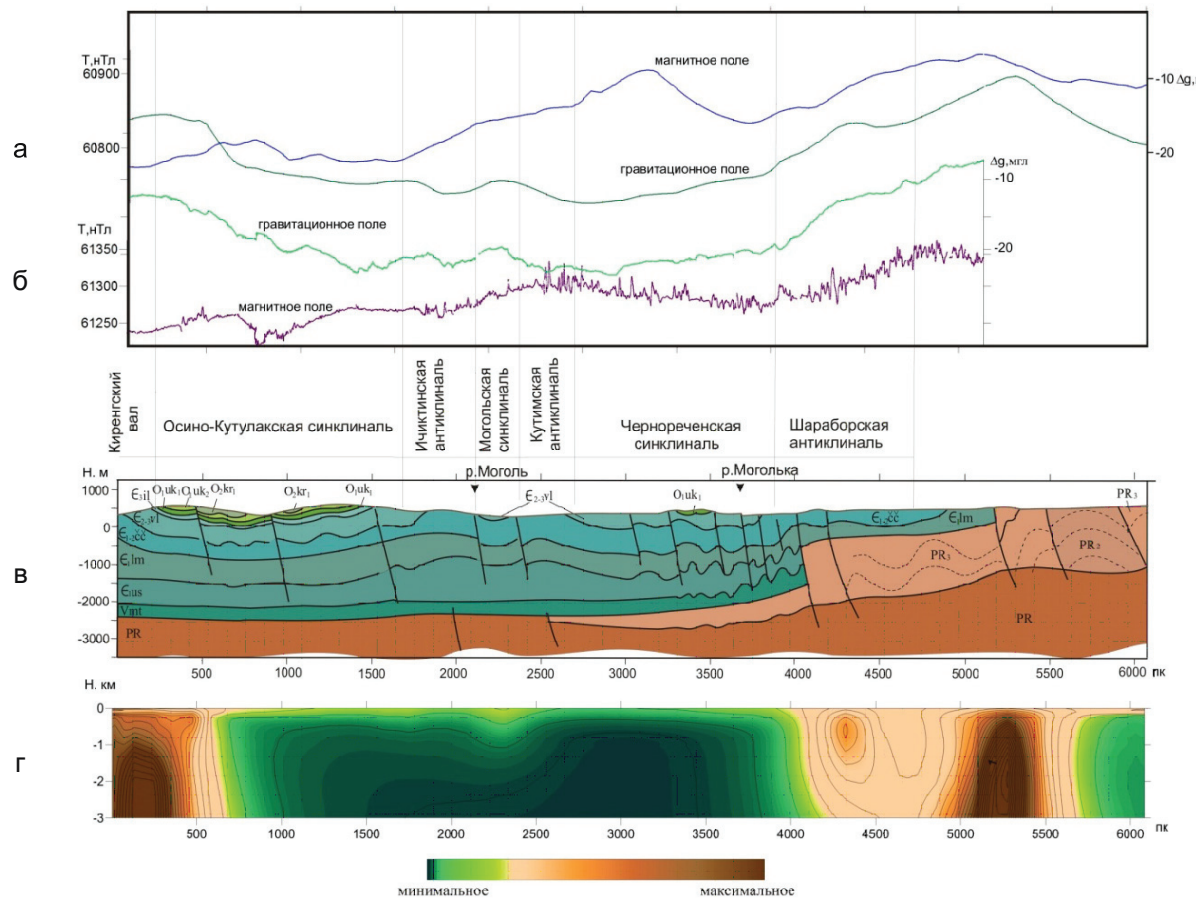


Рис. 1. Петрофизический разрез по профилю: а) графики магнитного и гравитационного полей (региональная съёмка); б) графики магнитного и гравитационного полей (детальная съёмка 2008 г.); в) геологический разрез; г) разрез эффективной плотности

Анализ поля силы тяжести свидетельствует о том, что Могольская глыба сложена плотными разностями пород и, соответственно, отражается в поле силы тяжести положительной аномалией. Аномалия не ограничивается только горной областью выступа, а частично охватывает и платформенную часть, что с учётом морфологии поля в переходной зоне позволяет прогнозировать сложные структурно-тектонические условия сопряжения платформы и горно-складчатого обрамления, обусловленные блоковыми подвижками фундамента. По всей ви-

димости, выступ фундамента имеет свое продолжение и под осадочным покровом. Последнее находит подтверждение на модельных петроплотностных разрезах (рис. 1).

Сложное строение исследуемого региона ещё более контрастно отражается в результатах электромагнитных исследований. Характерный геоэлектрический разрез зоны сопряжения Сибирской платформы и Патамского нагорья (в пределах Могольского выступа) приведён на рис. 2. Резкая смена геоэлектрических параметров разреза обус-

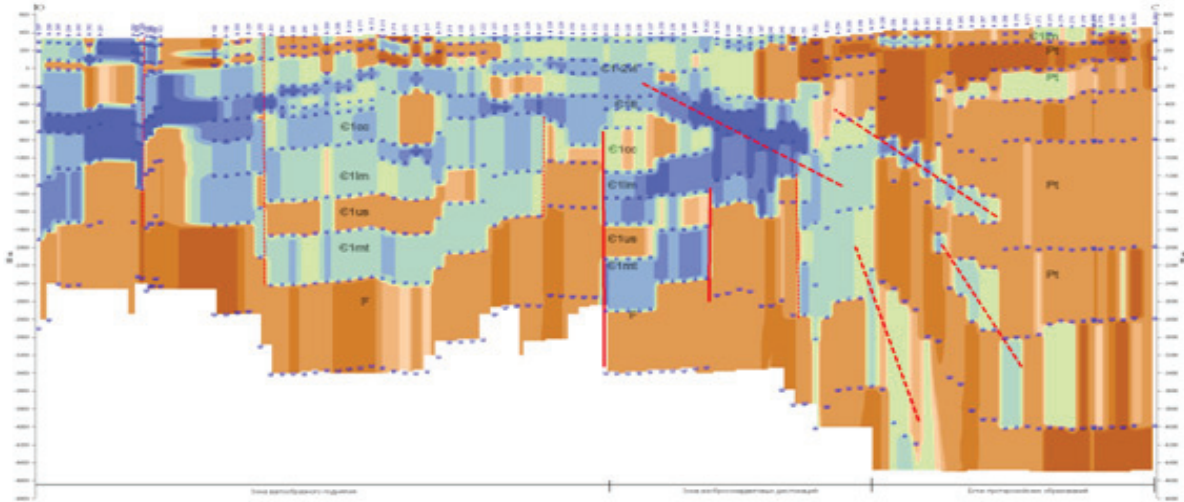


Рис. 2. Геоэлектрический разрез зоны сопряжения Сибирской платформы и Патамского нагорья по данным ЗСБ (профиль 19)

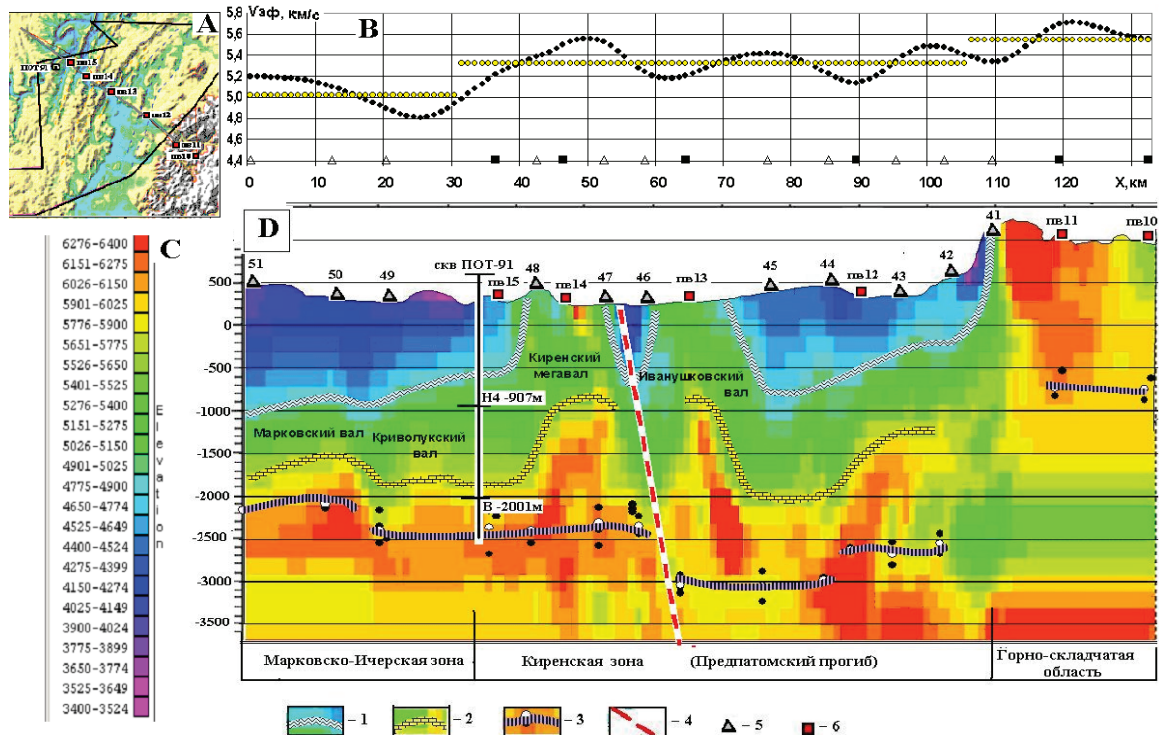


Рис. 3. Сейсмогеологический разрез по ПР 3: 1 – изолиния градиента скорости; 2 – граница «Ф»; 3 – граница «Ф»; 4 – зона тектонических нарушений; 5 и 6 – пункты наблюдения и взрыва соответственно; А – схема расположения профиля ПР3 (основа – цифровая карта рельефа); В – график эффективной скорости до границы «Ф»; С – цветовая шкала скоростного разреза; D – сейсмогеологический разрез

влена многочисленными тектоническими нарушениями. При этом, вероятно, полого-наклонные тонкие проводники генетически представляют собой косые разломы (плоскости скольжения), образовавшиеся в результате надвига пород со стороны Байкало-Патомской горной области. В целом центральный участок профиля интерпретируется как зона взбросонадвиговых дислокаций.

Предгорный участок профиля контрастно отличается от платформенной части разреза. Глубина исследования в блоке достигает 4000 м. Выделяется семь крупных геоэлектрических горизонтов, дифференцирующихся по сопротивлению, в пределах от 400 до 2000 Ом·м. Значительные перепады сопротивления связываются с тектоническими нарушениями в целом высокоомных пород. Верхняя

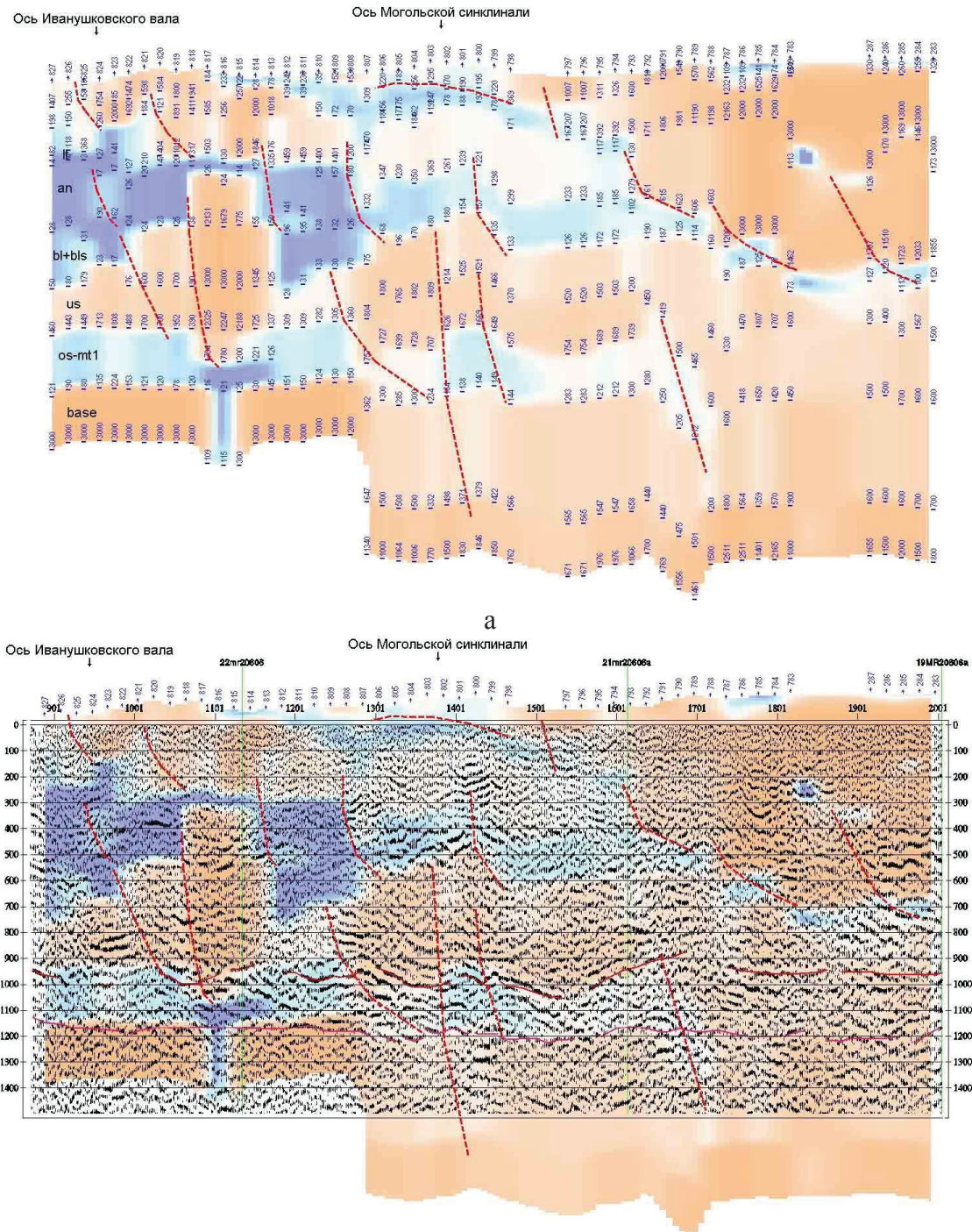


Рис. 4. Геоэлектрический (а) и сейсмогеоэлектрический (б) разрезы по ПР

часть разреза, по данным геологической съемки, представлена карбонатными породами лимпейской свиты. По геоэлектрическим параметрам ЗСБ она фиксируется сопротивлением 250...350 Ом·м. Предельно высокое сопротивление подстилающих свиту отложений, начиная с глубины порядка сто метров, и в целом разреза указывает на протерозойский возраст горных пород блока.

В 1986–1989 гг. зона Предпатомского прогиба была исследована региональной сетью ТСЗ. Анализ архивного материала ТСЗ, с позиций современных подходов к обработке и интерпретации (пакеты «FOCUS» Paradigm Geophysical и FATHOM TOMOGRAPHY Green Mountain Geophysics, Inc), позволяет значительно повысить геологическую информативность геофизического комплекса в целом.

В результате переобработки данных ТСЗ получены уникальные данные по глубинно-скоростной модели среды в предгорной области.

Информативным представляется сопоставление результатов, полученных методом ТСЗ, и электромагнитных зондирований в ближней зоне (ЗСБ), выполненных по субширотным профилям (рис. 3, 4). По данным ЗСБ Иванушковский вал ограничивается субвертикальными проводящими зонами, проявившимися в фундаменте вследствие неотектонических процессов. Глубина заложения их превышает 4000 м. Разломы имеют линейную северо-восточную направленность, соответствующую в плане прогибам. Вероятно, складчатость

в подсолевых толщах обязана своим происхождением подвижкам блоков фундамента, а также неравноностям его рельефа.

Комплексное рассмотрение аномалий ЗСБ и временных разрезов МОГТ позволяет говорить о наличии в нижнем этаже разреза структур взбросового типа в виде чешуйчатых вееров и надвигов (рис. 5), сформированных под влиянием тектонических процессов. Влияние разломов на формирование складок очевидно не только в пределах Иванушковского вала, но и в прогибах. При этом наиболее контрастные зоны деструкции приурочены к восточному склону Иванушковского и Киренгского вала. Последнее находит отражение и в асимметрии складок осадочных отложений. Между тем по данным ЗСБ разломные зоны проявляются цепочками контрастных аномалий повышенной проводимости, что позволяет изучить морфологию зон деструкции фундамента и проследить их отражение в осадочном чехле и распространение по площади. Зоны повышенной проводимости, зафиксированные в фундаменте, имеют юго-восточное падение. Они находят своё продолжение и в осадочном чехле, как в подсолевых отложениях, так и выше в галогенно-карбонатной толще, где, вероятно, связаны с зонами интенсивного выщелачивания солей и аккумуляцией рассолов в трещиноватых карбонатных породах. При этом вверх по разрезу аномалии проводимости смещаются в северо-западном направлении, и, соответственно, сохраняется падение зон деструкции в сторону горного обрамления.

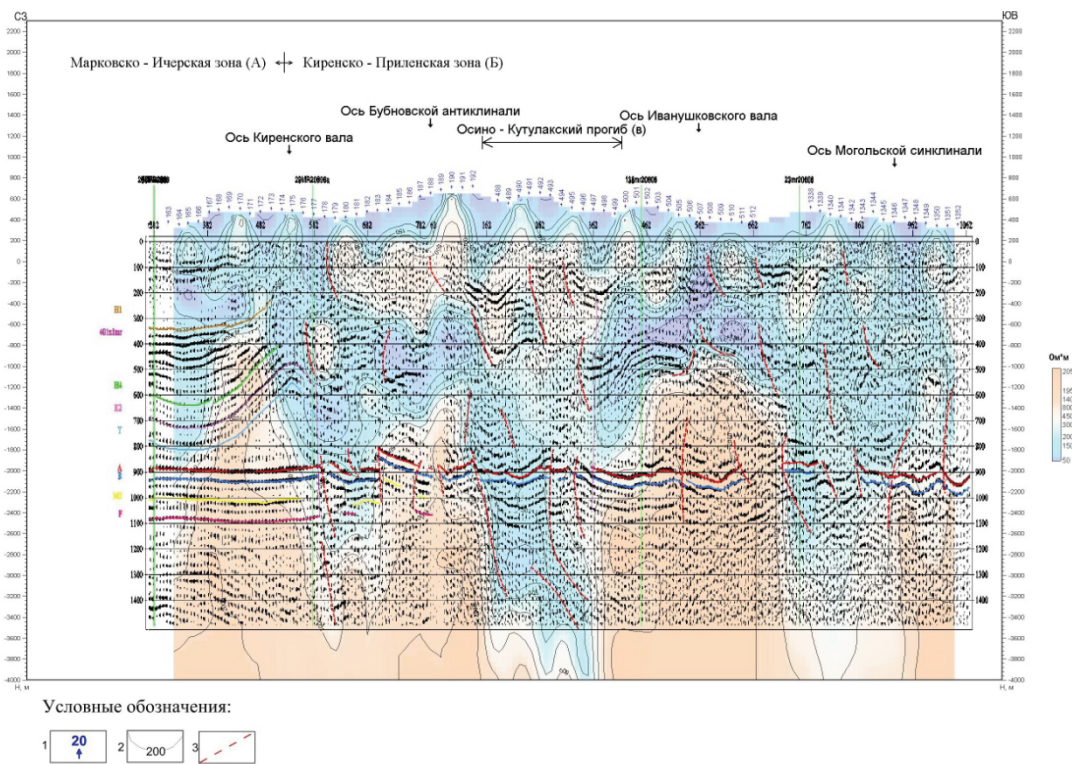


Рис. 5. Сейсмогеоэлектрический разрез по профилю 25MR20606. Условные обозначения: 1 – Пункты ЗСБ; 2 – изолинии дифференциальных сопротивлений dh/ds ; 3 – тектонические нарушения

Следует отметить, что на участке работ по результатам съёмки потенциальных полей на территории выделена система разломов (линеаментов) северо-западного простирания. При этом линейность этой системы разломов нарушается в местах пересечения их с зонами деструкции фундамента, выделенными по материалам электромагнитных зондирований. Характер их смещения свидетельствует о том, что взаимное перемещение блоков фундамента кроме вертикальной составляющей имеет ещё и левостороннюю горизонтальную составляющую. Между тем сейсмическими исследованиями МОГТ выявлено, что базальные горизонты осадочного чехла, в пределах отдельных блоков, слабо нарушены. На временных разрезах фиксиру-

ются группы отражений, характерные для подсолевой части разреза. Это обстоятельство ограничивает возможный масштаб развития покровных отложений.

Выводы

Наиболее вероятным представляется, что динамические нагрузки на земную кору, имеющие коллизийную природу, привели в пределах Предплатформского прогиба к возникновению ряда наклонных разломных зон, субпараллельных контуру горного обрамления, а непосредственный контакт протерозойских отложений с отложениями осадочного чехла платформы проходит по наклонному грабенообразному надвигу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинова Т.С. Нарушенность земной коры и ее роль в прогнозе геодинамики неустойчивых зон для Западно-Уральского региона // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 4. – С. 44–50.
2. Гладков А.С. Надвиги Прибайкалья (тектонофизический анализ): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Иркутск, 1995. – 19 с.
3. Коржнев В.Н. Условия формирования рифей-палеозойских вулканогенно-осадочных формаций Горного Алтая // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 3. – С. 29–31.
4. Коробейников А.Ф. Условия образования крупных и гигантских золоторудных месторождений // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 2. – С. 14–22.
5. Коробейников А.Ф., Гусев А.И. Факторы мантийно-корового взаимодействия в магматогенных флюидах рудогенерирующих систем // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 11–18.
6. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Чермных А.В., Радзиминович Я.Б., Бобров А.А. Особенности проявления активных разломов на юге Сибирской платформы // в кн.: Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Вып. 5. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2006. – С. 63–74.
7. Пейве А.В. Горизонтальные движения земной коры и принцип унаследованности // Геотектоника. – 1965. – № 1. – С. 30–37.

Поступила 22.08.2011 г.

ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И МОРФОПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ РЕГИОНАЛЬНОМ ПРОГНОЗЕ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ

В.Н. Устинова, И.Г. Устинова, В.Г. Устинов, Н.Н. Стариков

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

Привлечение результатов региональных исследований к прогнозу нефтегазоносности позволило установить критерии выявления скоплений залежей углеводородов на платформах, их приуроченность к линейным троиным сочленениям в рифтовых бассейнах, к бассейнам устойчивого прогибания и унаследованного развития: от древних рифт-авлакогенов до рифтовых структур перми и триаса. Построение цифровых моделей поверхности мантии и магнитного поля Западно-Сибирской плиты стало основой для выявления приуроченности осадочных комплексов с максимальной нефтегазоносностью в осадках чехла платформы к участкам аномальной кривизны поверхности мантии и максимальной вариативности магнитного поля – на фрагментах отрицательных аномалий интенсивности поля, соответствующих выступам фундамента. Вероятностно-статистический анализ информативности прогнозных критериев позволил оценить вероятность наличия перспективных объектов.

Ключевые слова:

Рифтовые структуры, авлакогены, поверхность мантии, пространственные цифровые модели, магнитное поле, тройное сочленение.

Key words:

Rift structures, aulacogen, mantle surface, digital spatial models, magnetic field, triple junction.

Прогноз нефтегазоносности, изучение особенностей строения чехла, фундамента и более глубоких частей земной коры на территории Западно-Сибирской плиты (ЗСП) выполняется в основном по данным сейсморазведки и геофизических исследований в скважинах (ГИС). В региональных исследованиях эти работы выполняются с привлечением данных магнитно- и гравитразведки [1]. В настоящее время накоплен значительный материал, позволяющий установить особенности зональной приуроченности нефтегазоносности, связь высокоёмких коллекторов с глубинным строением земной коры, фундамента и чехла. Построение трёхмерной модели геолого-геофизического строения осадочного чехла и фундамента ЗСП является важной практической задачей, позволяет получить представление о вертикальной и латеральной зональности нефтегазоносных комплексов, установить критерии максимального нефтегазонакопления.

Трёхмерное геолого-геофизическое моделирование предполагает систематизацию представлений о разновозрастных отложениях, начиная с самых древних. С учётом установления закономерностей пространственной и возрастной приуроченности продуктивных коллекторов, геолого-тектонических и физико-геологических условий формирования нефтегазоносных отложений авторами оценивается математическая модель наиболее вероятного расположения высокоёмких залежей углеводородов (УВ). Для определения (индикации) наличия перспективных объектов с заданными характеристиками в ЗСП воспользуемся законом распределения Бернулли:

$$M(X) = 0 \cdot q + 1 \cdot p = p.$$

Индикаторная случайная величина принимает значения: 1 – «успех» или 0 – «неудача» с вероят-

ностями p и соответственно $q=1-p$, а M – математическое ожидание случайной величины X . Определим вероятность наличия перспективных объектов.

ЗСП представляет собой крупнейшую в мире молодую плиту с мезозойско-кайнозойским чехлом. Ее южная и западная части лежат в пределах Урало-Монгольского пояса, а восточная и северная – в пределах смежных с ним метаплатформенных областей. С запада и северо-запада ЗСП обрамляют герциниды Урала и древне-киммерийская складчатая зона Пай-Хоя – Новой Земли, с юга – каледониды, герциниды и салаириды Казахского нагорья и Алтае-Саянской области, с востока – Сибирская платформа и выступ основания Таймыро-Североземельской метаплатформенной области. В районе Кустанайской седловины, в низовьях Енисея и средней части Карского моря мезозойско-кайнозойский чехол ЗСП непосредственно смыкается с плитными комплексами Северо-Туранской плиты и Таймыро-Североземельской области.

В структурном плане мезозойско-кайнозойский плитный комплекс чехла ЗСП представляет собой мегасинеклизу с широкими пологомоноклинальными западными, южными и восточными крыльями. Мощность комплекса в крыльевых частях составляет от 0 до 3 км, платформенные терригенные отложения постепенно выклиниваются к краям плиты, более погруженными (от 3 до 6...8 км) являются внутренние части плиты – в центре и на севере. На западе и юге продуктивный по УВ юрско-кайнозойский комплекс ложится (в основном несогласно) на доюрский – вендско-триасовый промежуточный структурный этаж. Сведения о глубинном строении плиты изложены в трудах Э.Э. Фотиади, В.С. Суркова, О.Г. Жеро и др., позволяют получить общее представление о

структуре докембрийских комплексов, особенностях их формирования, выявить причины перераспределения УВ в продуктивных горизонтах. В восточной части ЗСП вендско-триасовый комплекс выполняет несколько пологих прогибов, в которых его мощность достигает 4...7 км, а его подошва опускается до 6...9 км. Предполагается существование в северной части плиты обширного докембрийского массива, здесь также присутствует промежуточный, слабodeформированный палеозойско-триасовый комплекс, мощность которого возрастает к северу, а подошва опускается от 4...5 до 10 км. Он распространяется и в бассейне Карского моря.

В геологической истории ЗСП различают три главных мегаэтапа. Первый – от архея до начала рифея – предшествовал заложению Урало-Монгольского подвижного пояса. Второй мегаэтап начался с заложения подвижного пояса в рифее и охватывает длительный период терригенно-вулканогенного осадконакопления, где преимущественно рифтовый режим как минимум трижды сменялся орогенным, завершившийся в северной части плиты – в конце палеозоя. Третий мезозойско-кайнозойский мегаэтап отвечает платформенному развитию этого региона. В раннем триасе, в начале посторогенного мегаэтапа развития, субширотное сжатие сменилось растяжением и раздроблением континентальной коры, приведших к наземным извержениям базальтов, реже липаритов и формированию многочисленных субмеридиональных грабенов. В позднем триасе в грабенах накапливались лимнические угленосные отложения, подстилаемые нижнетриасовыми базальтами траппового типа. Исследования зональной приуроченности высокоёмких резервуаров в пределах осадочных бассейнов показывают их пространственную приуроченность к зонам тройного сочленения рифтовых структур соответствующей фазы рифтогенеза. Приуроченность бассейна осадконакопления к пострифтовым бассейнам является важным критерием для положительного решения относительно возможности обнаружения залежей УВ в перекрывающих комплексах с вероятностью порядка 0,85.

Устанавливается также связь максимальной нефтегазонасыщенности ордовикских, девонских или юрско-меловых осадочных комплексов с рифейскими авлакогенами. Основание рифт-авлакогенов (рифейд), зачастую, представлено сиалическими раннеархейскими комплексами [2, 3]. Сиалические образования часто перекрыты базальтоидами. Мощность рифейских образований (Δh) в авлакогенах значительна, на отдельных участках достигает 10...11 (до 14...16) км. Зональное увеличение мощности (Δh) связывается с формированием рифейских образований в условиях активной континентальной окраины [2–4]. Отложения в рифт-авлакогенах подверглись предпалеозойской складчатости, зеленосланцевому метаморфизму, орогенная фаза завершилась гранитоидным магматизмом – в позднем венде [5]. Наличие и мощность

рифейских подстилающих комплексов является одним из критериев положительного решения относительно возможности обнаружения залежей УВ как в палеозойских, так и юрско-меловых комплексах с вероятностью порядка 0,95.

В дорифейском комплексе предположительно преобладают карелиды [3]. Дорифейские блоки являются фрагментами древних кратонов. Рифейский тафрогенный режим осадконакопления завершился формированием коллизионных и аккреционных орогенов [3]. Картирование дорифейских комплексов позволяет установить участки их максимальной мощности и задать третий значимый критерий (наличие и мощность дорифейских отложений) с надёжностью 0,8. Рифейские слюдяные сланцы, гнейсы вскрыты скважинами на северо-западе в центральной и восточной частях плиты. Этим участкам модели соответствуют критерии прогноза со значимостью 0,85. На рифейские отложения дискордантно наложены байкальские и каледонско-герцинские складчатые системы. Мощность рифейских отложений в бортовых частях ЗСП составляет от 3 до 14 км. Рифейские комплексы зачастую имеют значительное погружение (до 16 км). Например, синклинии фундамента Приуральской зоны соответствуют древним рифейским депрессиям. Наиболее продуктивные отложения чехла пространственно связаны с участками повышенных мощностей Δh рифейских отложений и высоких градиентов $\Delta H(x,y)$ прогибания (в краевых частях рифейских впадин). Оценить пространственное положение рифейских комплексов и величины оптимальных градиентов (с приращением порядка 2 м/м – со значимостью 0,95) в структурах обрамления позволяют профили глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) или региональные профили [6], которые дают представления об изменчивости мощности рифейских и др. комплексов.

Рифейские авлакогены, формировавшиеся как внутриплитные депрессии, состоят из множества мелких трогов, объединяющихся в достаточно протяжённый пояс. Отложения рифея претерпели изменения в условиях раннекембрийского и кембрий-ордовикского орогенеза, наложенных destructively на рифей-вендские комплексы, и последующие изменения во время каледонско-герцинского осадконакопления и орогенеза. При наличии сведений об их структуре в прогнозную схему вносится дополнительный критерий – коэффициент автокорреляции (со значимостью 0,82) по геологическому или геофизическому изображению (сочетание слоёв для продуктивного комплекса с $r_0=0,975$ – для нефтяного разреза, и со значением $r_0=0,862$ – для газового).

Палеорельеф предъюрской поверхности ЗСП характеризуется большим числом положительных морфоструктур (выступов, поднятий, гряд, валов), обусловленных процессами коллизии вулканических дуг, террейнов, реликтов древней океанической коры, зажатых между палеоконтинентами

Сибири, Евроамерики и Казахстана [1], а также процессами изостазии, приведшими к блоковому расчленению территории и пенеппенизации. Постколлизийный рифтогенез в триасовое время на территории юго-востока ЗСП проявился в заложении Колтогорского, Аганского, Усть-Тымского, Чузикского рифтов [6]. Эти рифты пересекают палеозойские плитотектонические элементы: Межовский, Усть-Тымский микроконтиненты – типа террейнов [1], палеоостроводужные системы (Нижневартовскую, Колпашевскую, Кемеровскую), а также Нюрольский и Сургутский реликты погребённой под палеозойским чехлом субокеанической коры.

Проявленность структур фундамента и рифтовых структур в магнитном и гравитационном полях позволяет выполнить прогноз нефтегазонасности, оконтурить перспективные в нефтегазонасности отношении участки территорий, слабоизученные сейсморазведкой и ГИС [6–8]. Так как отложения чехла ЗСП практически не магнитны, особенности строения фундамента, его приповерхностной части проявляются в магнитном поле. Современные компьютерные технологии дают возможность создать модели геофизических полей, в которых отражаются наиболее интересные для изучения геоявления. Компьютерная модель магнитного поля юго-востока ЗСП (рис. 1) наглядно представляет рифтовые структуры в центральной и западной части модели. Колтогорско-Уренгойский, Усть-Тымский, Чузикский рифты – отмечаются в ней контрастными положительными аномалиями интенсивностью до 5 миллиэрстед (мЭ).

Облик магнитного поля в пределах плиты изменчив. Контрастность аномалий магнитного поля увеличивается при сокращении мощности отложений чехла, зависит от состава близповерхностных

(поверхность палеозойского фундамента) отложений. Интенсивные линейные положительные аномалии, в том числе скелетного облика аномалии (по С.В. Аплонову [1]), характерны для рифтовых структур пермско-триасового возраста. Эти аномалии как индикаторы рифтовых структур позволяют выявить перспективные в нефтегазонасности отношении зоны, тяготеющие к бортовым частям пострифтовых впадин [8]. В пределах положительных структур фундамента (отрицательные аномалии магнитного поля на рис. 2) выполнены оценки вариативности поля (δZ_a). Авторы при расчёте величин отклонений магнитного поля для локальных структур применили методику, предложенную в [9], формула (1).

$$\delta Z_a = \left[1 + \frac{Z_a}{Z_0 \left(1 + \frac{I_r}{Z_0} \right)} \right] \delta Z_0, \quad (1)$$

где Z_a – аномальные значения поля, а Z_0 – средние интервальные величины Z в пределах локальных поднятий, I_r – величина намагниченности пород в аномальных зонах.

Крупные залежи УВ проявляются в магнитном поле. По результатам расчётов максимальные величины приращений аномального поля T обнаружены над Мыльджинским, Крапивинским, Первомайским месторождениями. Эта методика позволяет ранжировать локальные структуры по величине приращений аномалий полного вектора напряжённости магнитного поля T или его вертикальной компоненты Z и разработать методы оптимальной фильтрации для выявления нефтеперспективных территорий. Эти результаты стали основанием для включения в прогноз критерия, оцени-

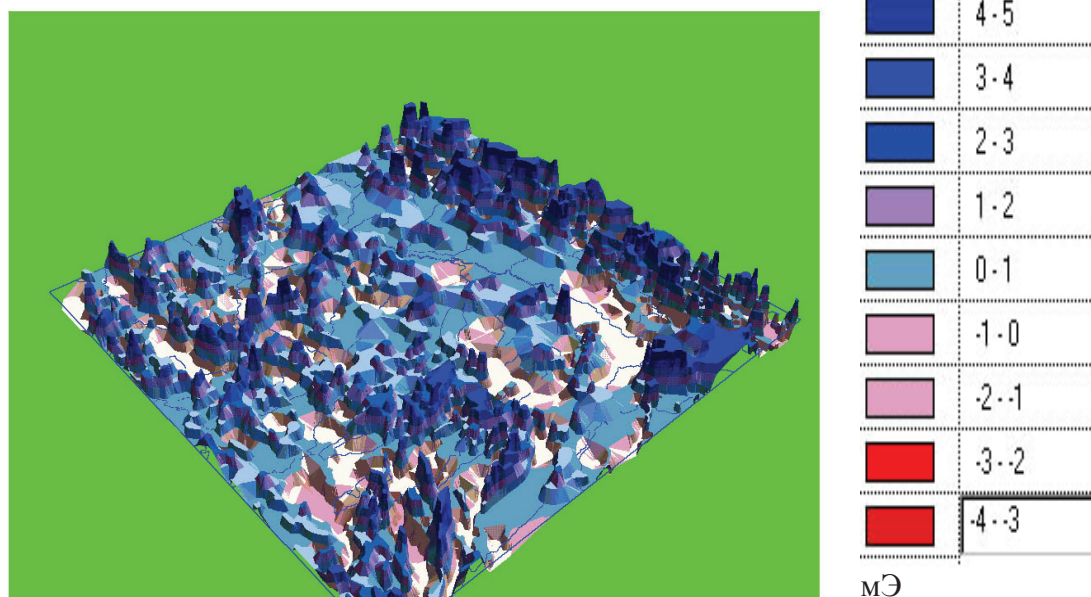


Рис. 1. 3D-модель вектора T магнитного поля в среднем течении реки Оби: построения выполнены с использованием карты под ред. П.А. Кукина, масштаба 1:1500000, в 1 см линейного масштаба модели 50 км

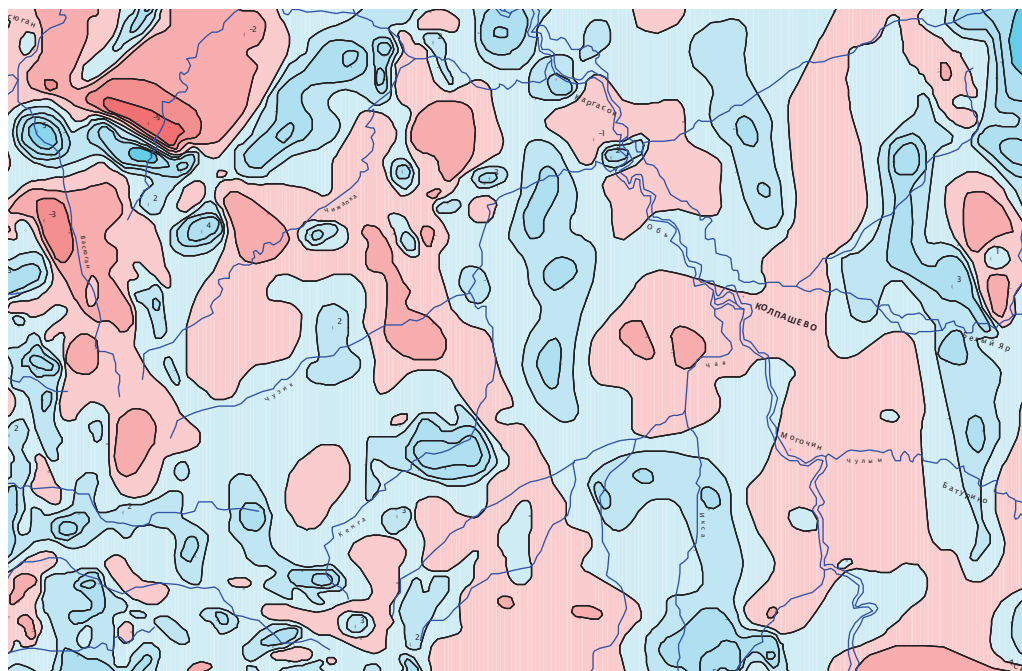


Рис. 2. Модель магнитного поля юго-востока ЗСП. Изодинамы поля T по карте под ред. П.А. Кукина, шкала интенсивностей T на рис. 1, в 1 см линейного масштаба модели 20 км

ваемого по магнитному полю, по величине его дисперсии (со значимостью 0,8).

Разные по возрасту и по составу осадков приповерхностные (для фундамента) комплексы по-разному проявляются в магнитном поле. Отложения триаса и верхнего палеозоя сосредоточены преимущественно в западных, центральных частях юго-востока ЗСП. Значительное увеличение мощности отложений карбона, перми наблюдается во впадинах по периферии Казахстанской плиты, мощность осадков этого комплекса увеличивается здесь от 1...2 до 4...6 км. В крайнем южном и западном участках территории это проявляется в ослаблении интенсивности поля T .

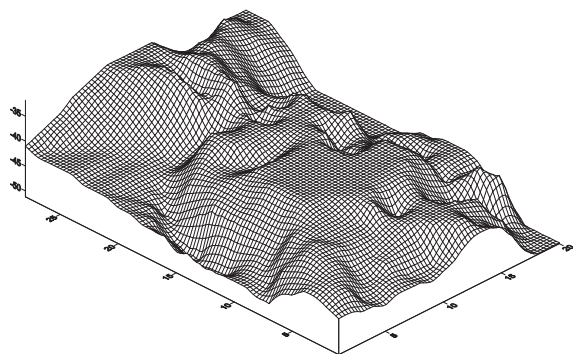


Рис. 3. Модель поверхности мантии ЗСП по данным ГСЗ, карта глубин по [10], вертикальный масштаб, в км, в единице горизонтального масштаба 100 км

Увеличение мощностей осадков перми, триаса обнаружено в Колтогорско-Уренгойском прогибе (и в его северной половине). В юго-восточных районах плиты наблюдается уменьшение интенсивности

аномального магнитного поля, что связано с повышенными мощностями осадков среднего и верхнего девона, максимальные приращения величин мощностей которых обнаруживаются в восточных и крайних северных территориях [10] — в Касской, Баихинской, Маковской, Усть-Енисейской и др. впадинах. На восточной периферии мощность осадков в прогибах увеличена за счёт вулканогенно-осадочных отложений ордовика, силура и кембрия. Углеводородонакопление на всех нефтегазоносных территориях связывается с бассейнами устойчивого прогибания [11]. Оценочный критерий, как признак устойчивого прогибания бассейна, предлагается определять по величине приращения региональной компоненты магнитного поля (приращение вектора T порядка 200 $\gamma/\text{км}$ в бортовых частях впадин является признаком нефтегазоносности, со значимостью 0,76). Юго-восточная периферия плиты характеризуется режимом длительного и устойчивого прогибания, но для её территорий характерен переменный знак движений и большая тектоническая активность.

На юго-востоке ЗСП (западная часть модели на рис. 1) при анализе особенностей строения поверхности мантии [8] основная нефтегазоносность картируется в краевых частях мантийного купола (рис. 3) на участках его локальных осложнений. Менее перспективны для нефтегазообразования Киселёвская, Тегульдетская впадины, Касский прогиб, обладающие колоссальной мощностью осадочных комплексов, но они расположены вдали от градиентных поверхностей мантийного выступа. В центральной части ЗСП и на её северной периферии поверхность мантии характеризуется по-

вышенной аномальностью. Вариативность приращений рельефа поверхности мантии, оценённая по формуле (1), где за Z взяты величины глубин до поверхности мантии, а вместо I_r – величины скорости по поверхности мантии по данным ГСЗ [10], в центральных районах превысила её значения в юго-восточных территориях ЗСП – в 2...3 раза, а на севере плиты – в 3...4 раза. Результаты оценок говорят о высоком нефтегазовом потенциале центральной части ЗСП и её северных территорий, интенсивно исследуемых в настоящее время. Величина приращения глубин до поверхности мантии порядка 300 м/км признана прогнозным критерием с вероятностью 0,76. На цифровых моделях по поверхности мантии (рис. 3) области максимального нефтегазонакопления в осадках чехла (в юрских отложениях и мелу) расположены вблизи градиентных участков центрального поднятия (мантийного диапира) поверхности мантии. Нефтегазоносные области расположены вблизи зон врезов, отмечающих положение пересечений региональных разломов меридионального, широтного и диагонального простирания [12, 13].

В геолого-тектоническом развитии ЗСП наблюдается определённая закономерность в последовательности движений, проявляющаяся в смене направлений прогибания: с преимущественно восточного – в кембрии, ордовике, на западное – в ордовике, силуре, раннем девоне и субцентральное – в девоне, карбоне [10, 11]. На представленном фрагменте магнитного поля (рис. 1, 2) прослеживаются две зоны: центральная и восточная, отличающиеся по составу осадков и по структуре магнитного поля. Максимум установленного нефтегазонакопления отмечается в центральной части плиты, которая до настоящего времени характеризуется интенсивным тепловым потоком и перераспределением глубинных флюидов, и приурочен к области

«тройного сочленения» линеаментов. Трёхзональность проявляется в строении (сочетании) систем рифтов, древних (рифейских рифт-авлакогенов) и сравнительно молодых (пермско-триасовых), в наложенных впадинах выявляется в трёхзональном сочетании макрокомпонентов (Колтогорско-Уренгойский, Аганский рифт) и в сегментах мезоуровня (Колтогорский, Усть-Тымский), выявляется в сочетании контрастно проявляющихся в желобах систем тектонических трещин [12, 13]. Статистическая параметризация моделей рифтовых систем показывает проявление особенностей их строения в типе функции автокорреляции (АКФ). Тройное сочленение рифтовых структур отмечается тройной зональностью в изображении АКФ на радиальной диаграмме. Форма АКФ определена как прогнозный критерий с доверительной вероятностью 0,86.

Нефтегазоносность в чехле ЗСП определяется многими факторами регионального плана, она тесно связана с распределением песчаных фаций коллекторов, нефтематеринских толщ, покрышек [8–10]. При выборе региональных критериев нефтегазоносности информативен морфоструктурный анализ сейсмоповерхностей [11–13]. Для регионального прогноза важные нефтегазопрогностические параметры можно получить, исследуя вариативные и стресс-модели поверхности фундамента, поверхности мантии. По вещественно-структурным характеристикам чехла эти нефтегазопрогностические элементы моделей (высокодисперсные, повышенных величин стресс-параметров) зачастую коррелируют с повышенной мощностью песчаных фаций [11]. Карты повышенных мощностей песчаных фаций и мощностей терригенных отложений являются картами перспектив нефтегазоносности с прогнозной вероятностью 0,9. Повышенные мощности осадочных комплексов (песчаных фаций) также указывают на мобильность, по-

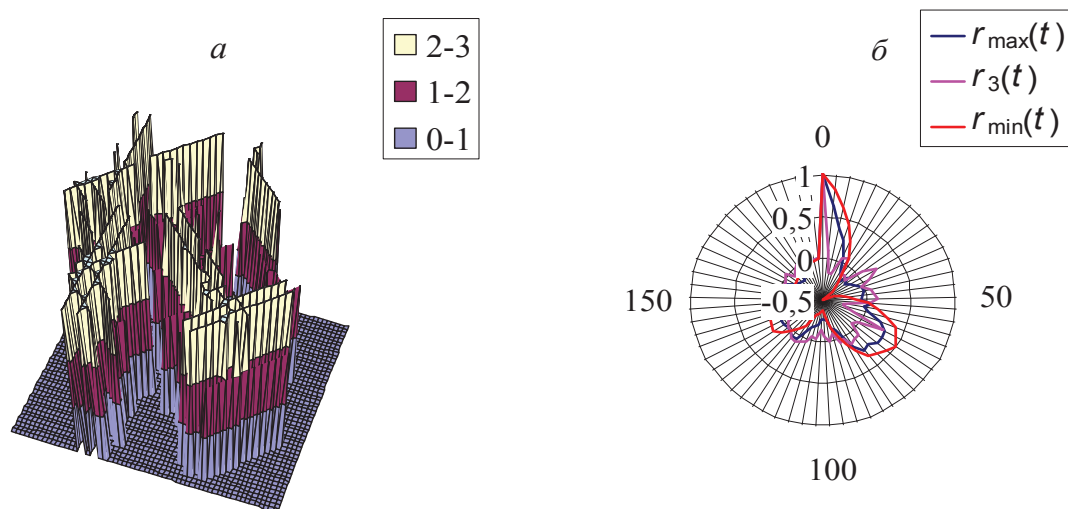


Рис 4. Модель линеаментов рифтовых структур по поверхности верхнеюрских отложений в пределах пострифтовых впадин (а); АКФ фрагментов модели (б) для трёх расчётных схем: $r_{\min}=0,1R$, $r_{\max}=0,3R$, $r_3=0,2R$, где R – размеры территории: в единицах вертикального масштаба (а) – глубины до поверхности по сейсмическому горизонту II_3 . Модель линеаментов для западного фрагмента карты – на рис 1.

движность этих областей в процессе осадконакопления. Изучение структурных карт по поверхности мантии, по поверхности фундамента ЗСП показывает, что такие области (максимального осадконакопления) являются унаследованными по отношению к мобильным (напряжённым) участкам поверхности мантии и поверхности фундамента.

При оценке «успеха» прогноза по вышеперечисленным критериям для ряда месторождений юго-востока ЗСП (Мыльджинское, Крапивинское, Двуреченское, Калиновое, Лонтынь-Яхское и др.) расчётная надёжность по вышеуказанным критериям составила 0,89. Проведены расчёты вероятности для сводов ЗСП. Выявлены 6 перспективных площадей с величиной $p > 0,75$ в склоновых частях Каймысовского, Сургутского, Нижневартовского сводов.

Вероятностно-статистический анализ трёхмерной модели ЗСП на предмет наличия перспектив обнаружения крупных месторождений нефти и газа по заданным критериям значимости: мощность рифейских комплексов, наличие фрагментов дорифейских выступов в авлакогенах, градиент склоновой части близрасположенных к сводам первого порядка рифтовых впадин, мощность дорифейских

отложений, градиент поверхности мантии, рисунок сочетания слоёв продуктивных отложений или мощности песчаных отложений, структура магнитного поля – позволил с расчётной достоверностью 0,7–0,9 обнаружить на территории юго-востока ЗСП ряд перспективных объектов.

Выводы

Обширный геолого-геофизический материал по региональным и крупномасштабным исследованиям, которые проведены на территории Западно-Сибирской плиты, в связи с исследованием её нефтегазоносности, позволил авторам определить ряд критериев нефтегазоносности, которые являются основой для установления высокоперспективных участков с привлечением цифровых моделей магнитного поля, структурных карт по поверхностям отражений в фундаменте и по поверхности мантии. Оценки вариативности аномальных осложнений полей и морфоповерхностей предоставили новую информацию о структуре геологических формаций и стали основанием для разработки формализованного подхода в подборе региональных критериев прогноза нефтегазоносности и выявлении нефтеперспективных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аплонев С.В. Палеообский океан и его роль в нефтегазоносности Западной Сибири // Рифтогенез и нефтегазоносность. – М.: Наука, 1993. – С. 85–90.
2. Берзин Р.Г., Аккуратова Л.Л., Керимова И.К. Предварительные результаты анализа геолого-геофизических данных по международному геотраверсу «Уралсейс-95» // Геофизика. – 2000. – № 6. – С. 25–29.
3. Маслов А.В. Осадочные комплексы в разрезах рифтогенных структур. – Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН, 1994. – 163 с.
4. Нечеухин В.М. Геодинамические обстановки седиментогенеза и структурное положение осадочных комплексов в межплитных и внутриплитных орогенах // Осадочные бассейны Урала и прилегающих регионов. – Екатеринбург: Изд-во ИГиГ УрО РАН, 2000. – С. 159–162.
5. Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Северного Урала. – Уфа: Даурья, 2000. – 145 с.
6. Сурков В.С. Строение грабен-рифтов и нефтегазоносность Западно-Сибирской низменности // Рифтогенез и нефтегазоносность. – М.: Наука, 1993. – С. 77–84.
7. Сурков В.С., Смирнов Л.В., Казаков А.М., Крамник В.Н. Раннетриасовый рифтогенез и особенности формирования нефтегазоносных комплексов Западно-Сибирского бассейна // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и северо-востока России. – Томск: ГалаПресс, 2000. – С. 114–116.
8. Устинова В.Н., Устинова И.Г. Некоторые особенности строения фундамента Западно-Сибирской плиты в связи с нефтегазоносностью // Вестник ТГУ. – 2003. – № 3 (II). – С. 371–373.
9. Яновский Б.М. Земной магнетизм. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1978. – 592 с.
10. Мегакомплексы и глубинная структура земной коры Западно-Сибирской плиты / под ред. В.С. Суркова. – М.: Недра, 1986. – 149 с.
11. Устинова В.Н. Морфологическая интерпретация сейсмических поверхностей // Отечественная геология. – 2005. – № 6. – С. 23–27.
12. Устинова В.Н., Устинов В.Г. Сейсмоморфологический анализ при картировании высокоёмких коллекторов. I. Классификация морфоформ. Отражение фациального типа коллектора в палеорельефе // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 3. – С. 42–48.
13. Устинова В.Н., Устинов В.Г. Сейсмоморфологический анализ при картировании высокоёмких коллекторов. II. Роль тектонической трещиноватости в форме палеорельефа и формировании проницаемых ячеек коллекторов // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 4. – С. 63–69.

Поступила 16.02.2012 г.

Геохимия

УДК 553.98;550.4

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ КОМПЛЕКСОВ (НА ПРИМЕРЕ РОГОЖНИКОВСКОГО И СЕВЕРО-РОГОЖНИКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ)

А.А. Жильцова, В.И. Исаев, Ю.В. Коржов*

Томский политехнический университет

*Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

E-mail: zhiltsovaaa@mail.ru

Установлено межпластовое перемещение тяжелых нефтяных углеводородов состава $C_{10}-C_{21}$ в разрезе Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений Ханты-Мансийского автономного округа на основе уникальных геохимических исследований образцов кернового материала двух разведочных скважин (718, 765). Построена геохимическая модель вертикальной миграции тяжелых нефтяных углеводородов, в которой определены соединения, способные к межпластовой миграции, предложена форма миграции, и оценена дальность перемещения веществ в рассматриваемом разрезе.

Ключевые слова:

Миграция, тяжелые нефтяные углеводороды, геохимическая модель, Рогожниковское месторождение, Северо-Рогожниковское месторождение.

Key words:

Migration, heavy oil hydrocarbons, geochemical model, Rogozhnikovsky field, Severo-Rogozhnikovsky field.

Введение

Вертикальная миграция газообразных C_1-C_4 и легких C_5-C_8 углеводородов (УВ) от залежи к поверхности считается возможной и доказанной, наличие геохимических аномалий этих веществ относят к показателям нефтегазоносности [1].

В то же время возможно вертикальное перемещение УВ состава C_8-C_{40} в надпродуктивные и приповерхностные отложения. Но связь выявляемых аномальных полей с глубинными нефтегазовыми ловушками остается недоказанной. Существующие теоретические физико-химические, петрофизические модели нефтяных залежей указывают на возможность, но не доказывают факт существования аномалий тяжелых УВ в приповерхностных горизонтах нефтеносных территорий [2].

Цель исследований – экспериментальное установление возможности и механизма вертикальной миграции тяжелых нефтяных УВ состава C_8-C_{40} от нефтяной залежи к поверхностным горизонтам разреза. А также определение новых надежных, стабильных во времени, прямых геохимических показателей (поисковых признаков) наличия в недрах залежей нефти и газа.

Рассмотрение картины перемещения УВ-флюидов от нефтяной залежи в вышележащие отложения выполнено на основе детального послойного изучения над- и подпродуктивных отложений, вскрытых разведочными скважинами 718 и 765 Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений, на содержание и молекулярно-массовое распределение нефтяных компонентов. Изучался керновый материал продуктивной (давшей притоки УВ) 765 Северо-Рогожниковской скважины и непродуктивной (без нефтепроявления) 718 Рогожниковской скважины. Последнее дало представление об углеводородном фоне осадочных отложений и позволило более обоснованно проследить миграцию нефтяных УВ-флюидов.

Краткая характеристика объекта исследований

Рогожниковское и Северо-Рогожниковское месторождения в административном отношении находятся в Октябрьском районе Ханты-Мансийского автономного округа в 100 км восточнее г. Нягань (рис. 1).

Нефтеносность месторождений связана с продуктивными комплексами мезозойского возраста:



Рис. 1. Положение Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений на схематической тектонической карте центральной части Западно-Сибирской плиты, на основе [3]: 1 – границы тектонических структур I порядка; 2 – границы внутреннего районирования; 3 – разрабатываемое месторождение углеводородов и его номер; 4 – исследуемая скважина и ее номер. Месторождения: 1) Каремпостское; 2) Песчаное; 3) Красноленинское; 4) Поснокортское; 5) Южно-Рогожниковское; 6) Рогожниковское; 7) Северо-Рогожниковское; 8) Большое; 9) Центральное; 10) Назымское; 11) Апсельское; 12) Средне Назымское

доюрским (отложения триаса); средне- и верхнеюрским (тюменская свита tm – пласты $ЮК_{2-6}$, абалакская ab – $ЮК_1$, тутлеймская tl – $ЮК_0$), апт-сеноманским (викуловская свита vk – пласт $ВК_1$).

Коллектора триасовых и ниже-среднеюрских отложений образуют единую в гидродинамическом отношении зону нефтенакопления. Нефтеносность данных отложений связывают с вертикальным перераспределением углеводородов из верхнеюрских отложений. Ожидаемыми видами межпластовой миграции УВ могут быть нисходящее

перемещение по трещинам и кавернам и диффузионное перераспределение.

Нефтеносность апт-сеноманского комплекса связана с викуловской свитой, заполнение залежей которой могло происходить в результате восходящих межпластовых перетоков из верхнеюрских нефтематеринских отложений.

Для исследований были отобраны образцы кернового материала скважин 765 (20 образцов из средне- и верхнеюрского, апт-сеноманского комплексов и палеозойского осадочно-вулкан-

генного образования) и 718 (8 образцов апт-сеноманского комплекса и палеозойских отложений).

Методика химико-аналитических исследований

Пробы керна, после детальной литологической и текстурной характеристики, определения наличия микрофаунистических остатков, следов битуминозности и нефтепроявлений, измельчали в лабораторной шековой дробилке до зернения менее 2 мм, перемешивали и направляли на аналитические исследования.

Навеску образца 40...50 г экстрагировали в колбе на 100 мл с притертой пробкой смесью н-гек-

сан: хлороформ (80:20 об. %) дважды по 30 мл при энергичном перемешивании в течение 10 мин. После фильтрации экстракта на анализ отбирают аликвоту, которую концентрировали до 1 мл отгонкой на ротационном испарителе при 40 °С.

Специальные количественные эксперименты показали, что данная схема позволяет выделить из образцов алевролитов при однократной экстракции до 90...95 % УВ рядов н-алканов C₉–C₄₀, алкилбензолов C₉–C₃₃, нафталинов C₁₀–C₁₃, фенантронов C₁₄–C₁₆ [4]. В экстракте по второй ступени указанные соединения находятся на грани чувствительности метода хромато-масс-спектроме-

Таблица. Характеристика органического вещества исследованного керна глубоких скважин

| Шифр образца породы | Интервал отбора, м | Свита, пласт (стратон) | Сумма экстрагированных веществ, мг/кг | Содержание в породе, мг/кг (хромато-масс-спектрометрия) | | | | | Параметр состава алканов* | |
|--|--------------------|---|---------------------------------------|---|--|--|---|--|---------------------------|------|
| | | | | н-алканов C ₉ -C ₄₀ | изопрен-алканов C ₁₅ -C ₂₀ | н-алкил-бензолов C ₈ -C ₃₄ | Нафталинов C ₁₀ -C ₁₂ | Фенантронов C ₁₄ -C ₁₅ | K _f | П/Ф |
| Площадь Северо-Рогожниковская, скв. 765 | | | | | | | | | | |
| (76) CP765 10ал | 1524,3 | hm (K ₁) | 84,40 | 1,960 | 0,415 | 0,019 | 0,196 | 0,049 | 0,44 | 1,49 |
| (80) CP765 9ар | 1526,0 | hm (K ₁) | 50,22 | 1,745 | 0,314 | 0,017 | 0,140 | 0,028 | 0,36 | 1,04 |
| (73) CP765 8п | 1546,8 | vk, BK ₁ (K ₁) | 84,66 | 3,885 | 0,688 | 0,045 | 0,422 | 0,074 | 0,59 | 1,23 |
| (84) CP765 7ар | 1550,0 | vk, BK ₁ (K ₁) | 73,36 | 6,445 | 1,616 | 0,059 | 0,530 | 0,056 | 0,50 | 1,43 |
| (66) CP765 7п | 1556,4 | vk, BK ₁ (K ₁) | 165,70 | 14,835 | 4,878 | 0,233 | 0,689 | 0,058 | 0,45 | 1,40 |
| (83) CP765 6ар | 2480,3 | tl (J ₃) | 204,29 | 32,730 | 1,505 | 0,117 | 0,983 | 0,240 | 0,13 | 1,71 |
| (67) CP765 6п | 2480,1 | tl (J ₃) | 80,29 | 9,873 | 1,490 | 0,053 | 0,325 | 0,160 | 0,29 | 1,63 |
| (82) CP765 5ар | 2502,0 | ab (J ₃) | 5353,50 | 187,566 | 32,507 | 5,608 | 29,283 | 6,285 | 0,58 | 0,83 |
| (78) CP765 4ал | 2506,1 | ab (J ₃) | 2746,47 | 84,255 | 23,177 | 1,943 | 6,941 | 1,651 | 0,86 | 0,96 |
| (79) CP765 3ар | 2507,0 | ab (J ₃) | 644,54 | 129,283 | 4,380 | 0,280 | 2,569 | 1,717 | 0,11 | 1,48 |
| (74) CP765 ал+п | 2563...2565 | tm, ЮК ₃₋₄ (J ₂) | 116,45 | 8,955 | 0,981 | 0,079 | 2,836 | 0,613 | 0,61 | 3,85 |
| (71) CP765 1п | 2585,0 | tm, ЮК ₃₋₄ (J ₂) | 55,17 | 2,657 | 0,325 | 0,022 | 0,506 | 0,109 | 0,47 | 1,64 |
| (75) CP765 0ал | 2600,0 | tm, ЮК ₃₋₄ (J ₂) | 128,62 | 16,998 | 1,013 | 0,078 | 2,808 | 0,707 | 0,27 | 3,62 |
| (70) CP765 0п | 2605,0 | tm, ЮК ₃₋₄ (J ₂) | 88,83 | 2,908 | 0,583 | 0,025 | 0,634 | 0,132 | 0,75 | 2,20 |
| (64) CP765-1п | 2610,3 | tm, ЮК ₃₋₄ (J ₂) | 93,85 | 5,958 | 2,112 | 0,049 | 0,534 | 0,152 | 0,72 | 4,46 |
| (77) CP765-1ал | 2616,5 | tm, ЮК ₃₋₄ (J ₂) | 1741,30 | 254,530 | 12,183 | 0,454 | 7,558 | 1,362 | 0,64 | 5,63 |
| (65) CP765-2п | 2769,0 | (Pz) | 78,46 | 4,614 | 0,649 | 0,040 | 0,102 | 0,020 | 0,49 | 1,04 |
| (81) CP765-3ар | 2892,1 | (Pz) | 3014,90 | 120,831 | 16,626 | 5,644 | 35,725 | 8,393 | 0,48 | 1,00 |
| (68) CP765-3п | 2900,8 | (Pz) | 177,09 | 0,800 | 0,134 | 0,008 | 0,018 | 0,005 | 0,54 | 0,78 |
| (69) CP765-4п | 2903,0 | (Pz) | 16,14 | 0,145 | 0,033 | 0,002 | 0,0 | 0,0 | 0,57 | 0,58 |
| Площадь Рогожниковская, скв. 718 | | | | | | | | | | |
| (99) P718 9ар | 1586...1588 | hm (K ₁) | 281,28 | 0,067 | 0,020 | 0,001 | 0,0 | 0,001 | 0,82 | 0,91 |
| (95) P718 8п | 1594,0 | vk, BK ₁ (K ₁) | 54,66 | 0,720 | 0,209 | 0,008 | 0,074 | 0,017 | 1,02 | 1,43 |
| (98) P718 7ар | 1598,0 | vk, BK ₁ (K ₁) | 53,38 | 0,344 | 0,103 | 0,003 | 0,008 | 0,008 | 0,84 | 1,53 |
| (97) P718 6ар | 1605,1 | vk, BK ₁ (K ₁) | 50,08 | 0,839 | 0,294 | 0,008 | 0,039 | 0,028 | 0,98 | 1,78 |
| (85) P718 5п | 1609,0 | vk, BK ₁ (K ₁) | 47,43 | 1,011 | 0,297 | 0,010 | 0,086 | 0,016 | 0,75 | 1,42 |
| (96) P718 4ар | 1610,2 | vk, BK ₁ (K ₁) | 99,58 | 1,625 | 0,476 | 0,020 | 0,305 | 0,042 | 1,09 | 2,14 |
| (100) P718-4фунд | 2695,5 | (Pz) | 57,11 | 0,325 | 0,030 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,36 | 0,50 |
| (86) P718-5фунд | 2707,0 | (Pz) | 54,72 | 0,742 | 0,079 | 0,008 | 0,006 | 0,006 | 0,70 | 0,41 |

*Геохимические параметры состава алканов [6]: П/Ф=иC₁₉/иC₂₀ – параметр обстановки осадконакопления; K_f=(иC₁₉+иC₂₀)/(иC₁₇+иC₁₈) – показатель источника органического вещества и обстановки осадконакопления.

| Система | | Отдел | Свита | Пласт | Литологический разрез | Глубина, м | Шифр пробы | Н-алкилбензолы, мг/кг | | Нафталины, мг/кг | | Фенантроны, мг/кг | | | | | |
|------------|--------------|------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|------------|--------------|---|--|---|--|--|---|--|--|--|--|
| Меловая, К | | | | | | | | Сумма н-алкилбензолов, концентрация, 10 ⁻³ мг/кг | Сумма нафталинов и фенантронов, концентрация, 10 ⁻³ мг/кг | Сумма н-алкилбензолов, концентрация, 10 ⁻³ мг/кг | Сумма нафталинов и фенантронов, концентрация, 10 ⁻³ мг/кг | Сумма нафталинов и фенантронов, концентрация, 10 ⁻³ мг/кг | Состав нафталинов и фенантронов, концентрация, 10 ⁻³ мг/кг | | | | |
| А | | Нижний отдел, К ₁ | Хантымансийская свита | ВК ₁ | | 1586 | (99)P718 9ap | 0,002 | 0,001 | | 0,001 | | | | | | |
| | | | | | | 1587 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 1588 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 1593 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 1594 | (95)P718 8п | 0,022 | 0,091 | | 0,091 | | | | | | |
| | | | | | | 1595 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 1596 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 1597 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 1598 | (98)P718 7ap | 0,008 | 0,016 | | 0,016 | | | | | | |
| | | | | | | 1605 | (97)P718 6ap | 0,021 | 0,066 | | 0,066 | | | | | | |
| 1606 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1607 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1608 | (85)P718 5п | 0,027 | 0,102 | | 0,102 | | | | | | | | | | | | |
| 1609 | (96)P718 4ap | 0,049 | 0,347 | | 0,347 | | | | | | | | | | | | |
| 1610 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

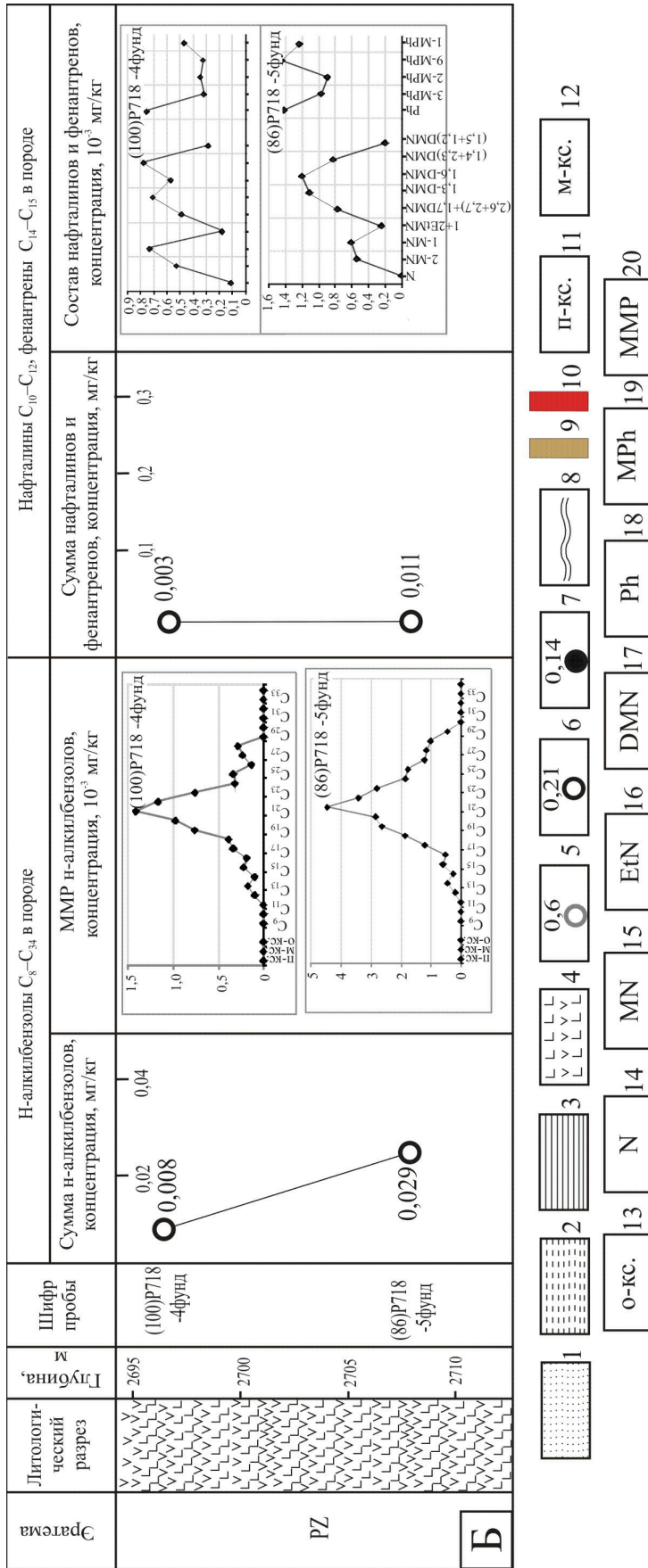


Рис. 2. Распределение ароматических углеводородов в разрезе меловых (А) и палеозойских (Б) отложений скважины Рогожниковская 718: 1) песчаник; 2) алевролит; 3) аргиллит; 4) породы фундамента; 5) концентрация в песчаниках; 6) концентрация в алевролитах; 7) концентрация в аргиллитах; 8) шкалы глин и значений; 9) продуктивный пласт; 10) материнские отложения; ароматические углеводороды и их изомеры: 11) пара-ксилол; 12) мета-ксилол; 13) орто-ксилол; 14) нафталин; 15) метилнафталин; 16) этилнафталин; 17) диметилнафталин; 18) фенантрен; 19) метилфенантрен; 20) молекулярно-массовое распределение

трии, а при третьей экстракции чистым хлороформом — не обнаруживаются методом хроматографии. Тетра- и пентаароматические УВ могут экстрагироваться при двукратной экстракции н-гексан: хлороформом (80:20 об. %) не полностью.

Анализ экстрактов проведен на хромато-масс-спектрометре фирмы PerkinElmer Clarus 500MS. Аналитическая колонка 30 м×0,25 мм×0,25 мкм Elite-5MS. Программирование температуры термостата 40° (5 мин) — 5°/мин — 310° (20 мин), температура инжектора 220 °С, трансферлайна — 300 °С, источника электронов — 190 °С, энергия электронов 70 эВ.

Идентификацию веществ проводили по относительным временам удерживания и характеристическим ионам. Концентрацию компонента рассчитывали из исходной хроматограммы по внутреннему градуировочному стандарту — аценафтену-d10.

Оцененная точность определения УВ в семи образцах породы составила для диапазона концентраций 0,005...0,010 мг/кг — 33 отн. %; 0,011...0,015 мг/кг — 30 отн. %; 0,90...1,30 мг/кг — 20 отн. %. Краткая характеристика органического вещества исследованных проб кернa приведена в таблице.

Концептуальные допущения, положенные в основу исследований

В качестве индикаторов миграции приняты концентрации следующих ароматических УВ, присутствующих в нефтяном флюиде, устойчивые к выветриванию и окислению [5]:

- алкилбензолы с одним заместителем нормального строения C_8-C_{34} ;
- биароматические соединения с нафталиновым ядром, включая нафталин, 1-, 2-метилнафталины, 10 изомеров диметилнафталинов;
- триарены с фенантеновым ядром, включая фенантрен, 9-, 2-, 3-, 1-метилфенантрены.

Выяснение объективной картины межпластового перемещения УВ состава C_8-C_{40} от нефтяной залежи в над- и подпродуктивные отложения основано и предполагает доказательств следующих допущений.

1. Слои песчаника в рассматриваемых разрезах принимаются за транзитные или накапливающие (содержащие залежь УВ) слои.
2. Генерирующими и отдающими УВ слоями являются богатые органическим веществом аргиллиты и алевролиты. Эти же слои являются естественными барьерами миграции, под/над которыми в слоях песчаника могут накапливаться повышенные концентрации мигрирующих УВ.
3. В разрезе рассматриваемого участка нефтеобразование (генерация УВ) идет гораздо менее интенсивно, чем рассеивание веществ в окружающей среде.
4. За геологическое время состав и распределение УВ в породе стабилизировались как конечный продукт генерации, накопления и последующего рассеивания веществ в разрезе отложений.

5. Перемещение тяжелых (выше C_9) УВ происходит из слоев с большей концентрацией в слои с меньшей. Обратное возможно только при значительном перепаде давления. Но аномально высокое давление в зоне нефтепроявления на рассматриваемом участке не зафиксировано.
6. Существующий массообмен можно зафиксировать при послойном исследовании над- и продуктивных пород на содержание нефтяных УВ. С определенной достоверностью может быть оценено расстояние перемещения мигрирующих веществ.

Исследования распределения углеводородов в разрезе отложений Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений

Распределение ароматических УВ в разрезе над- и подпродуктивных отложений в двух разведочных скважинах Рогожниковская 718 и Северо-Рогожниковская 765 представлено на рис. 2, 3.

В пределах непродуктивной скважины 718 максимальные концентрации идентифицированных УВ в аргиллитах составляют 2,5 мг/кг, в песчаниках — 1,4 мг/кг (таблица). Для алкилбензолов меловых отложений (пласт ВК₁) характерны узкие молекулярно-массовые распределения с доминированием 4–5 гомологов в интервале $C_{13}-C_{17}$ (рис. 2), образовавшихся в окислительных условиях (отношение пристана к фитану от 1,4 до 2,1). В некоторых прослоях аргиллита в составе нафталинов и фенантенов отчетливо заметна эмиграция легких гомологов $C_{10}-C_{11}$ и накопление немигрирующего фенантена. Соседние выше и ниже лежащие песчаники, напротив, обогащены подвижными нафталинами, мигрирующими в них в результате диффузии или с пластовыми водами. В хантымансийской свите hm, играющей роль глинистой крышки викуловским коллекторам, нафталины $C_{10}-C_{12}$ вообще не зафиксированы, что более всего напоминает результат водной промывки (рис. 2, А). Не исключено, что на данном участке в пределах меловых отложений активно циркулируют водные растворы. Это объясняет и отсутствие нефтепроявлений, и узкие гомологические ряды циркулирующих УВ, и «промытые» по составу нафталинов прослои аргиллитов.

В палеозойских образцах фоновой скважины, по отношению пристана к фитану — 0,4...0,5, фиксируется резко восстановительная обстановка, благоприятная для нефтеобразования. Ряды алкилбензолов более широкие, близкие к нефтяному молекулярно-массовому распределению, то есть нефтеобразование из рассеянного органического вещества идет (об этом свидетельствуют низкие значения показателя K_f), но из-за низких концентраций не обеспечивает образование залежей (рис. 2, Б).

Концентрация идентифицированных углеводородов в слоях аргиллитов юрского возраста **в скважине Северо-Рогожниковская 765** составляет от 35 до 261 мг/кг (в среднем 112 мг/кг), алевролитов — от 21,5 до 276 мг/кг (в среднем 140 мг/кг), в песча-

никах накапливаются менее значительные концентрации — от 3,7 до 12 мг/кг (в среднем 7,2 мг/кг). Это на 1–2 порядка выше, чем в скважине 718 (таблица).

К нефтематеринским толщам, активно реализующим свой генерационный потенциал, по содержанию и распределению углеводородов относятся нижняя часть тюменской свиты и тутлеймские аргиллиты.

Исследованный из низов тюменских отложений алевролит характеризуется широким (нефтяным) распределением *n*-алкилбензолов C_9 – C_{34-36} , максимумом, приходящимся на C_{13-29} , и пониженным содержанием легких гомологов C_{9-12} . В соседних с ним вышележащих образцах песчаника и алевролита фиксируются легкие гомологи C_{9-21} . Эти легкие мигрирующие углеводороды можно проследить вверх по юрскому разрезу на расстояние 100 м до абалакских глин, которые, очевидно, являются для них серьезным барьером (рис. 3, Б, В).

Выше абалакского флюидоупора в верхнеюрской зоне нефтепроявления начинает доминировать органическое вещество тутлеймской (аналог баженовской) свиты. Для *n*-алкилбензолов тутлеймских аргиллитов характерно типично нефтяное, широкое унимодальное распределение C_9 – C_{34-36} с размытым максимумом на C_{13} – C_{23} . Все нижележащие слои на расстояние до 20...25 м, включая верхи абалакской свиты, пропитаны мигрирующими легкими гомологами *n*-алкилбензолов C_{11} – C_{21} , а компоненты тяжелее C_{24} задержаны фильтрацией или в результате недостаточной летучести (рис. 3, Б, В).

В нижней части юры, до абалакских глин, характерно однотипное распределение циркулирующих по пластам изомеров и гомологов нафталинов и фенантронов с повышенным содержанием 2-метил- и 1,6-диметилнафталинов (рис. 3, В). А в абалакских, тутлеймских глинах и в низах викуловской свиты отмечается другое по составу ОВ, источником которого может выступать тутлеймская пачка аргиллитов — стратиграфический аналог баженовской свиты; фиксируется существенное повышение концентрации нафталинов, а в их составе — рост содержания 1-метил- и 1,3-диметилнафталинов (рис. 3, А, Б).

Основной формой миграции, обеспечивающей такое распределение веществ, может быть перемещение в свободной газопаровой фазе или всплывание из зон генерации. Причем циркулируют по пластам в основном легкие алкилбензолы состава C_{11-21} , летучие C_{10-12} нафталины и, возможно, фенантрен. Именно эти вещества достаточно равномерно распределяются в нижней и верхней частях юрской зоны нефтепроявления.

Ниже — в палеозойские (рис. 3, Г), и выше — в меловые (рис. 3, А) отложения углеводороды также проникают. Из нижнеюрских алевролитов в палеозойские слои нисходяще мигрируют легкие алканы и алкилбензолы состава C_{11} – C_{22} , насыщая не только песчаники, но и плотные слои аргилли-

та. Перемещение прослеживается на расстояние до 250...270 м от тюменских отложений (рис. 3, Г и 4, Б). В меловые отложения из тутлеймской свиты восходящей миграцией переходит узкий ряд легких алканов и алкилбензолов состава C_{9-20} . Их поток можно проследить до образцов хантымансийской свиты, включительно (рис. 3, А).

Нафталины и фенантроны меловых пород имеют распределение, близкое к верхнеюрским.

Расстояние вертикального межпластового перемещения нефтяных УВ из юрской зоны нефтепроявления в меловые отложения можно оценить по тенденции к убыванию их концентраций: для алкилбензолов — почти 1000 м, для нафталинов — 800...900 м, до верхов викуловской свиты (рис. 4, А). Для фенантронов закономерного изменения концентраций не выявлено, что говорит о слабой миграционной способности этого класса УВ.

Наиболее вероятная форма нисходящего перемещения веществ в палеозойские отложения — диффузия в виде свободной парагазовой фазы с опережающим перемещением легких УВ C_{9-22} на расстояние до 250...270 м. Ряд тяжелых УВ также перемещается вниз, но отслеживается на расстояние до 150 м.

Вероятной формой восходящей межпластовой миграции из юрских в меловые и дальше по разрезу отложения может быть свободная парагазовая фаза. Всплывание маловероятно по причине отсутствия перераспределения фенантронов по меловым пластам.

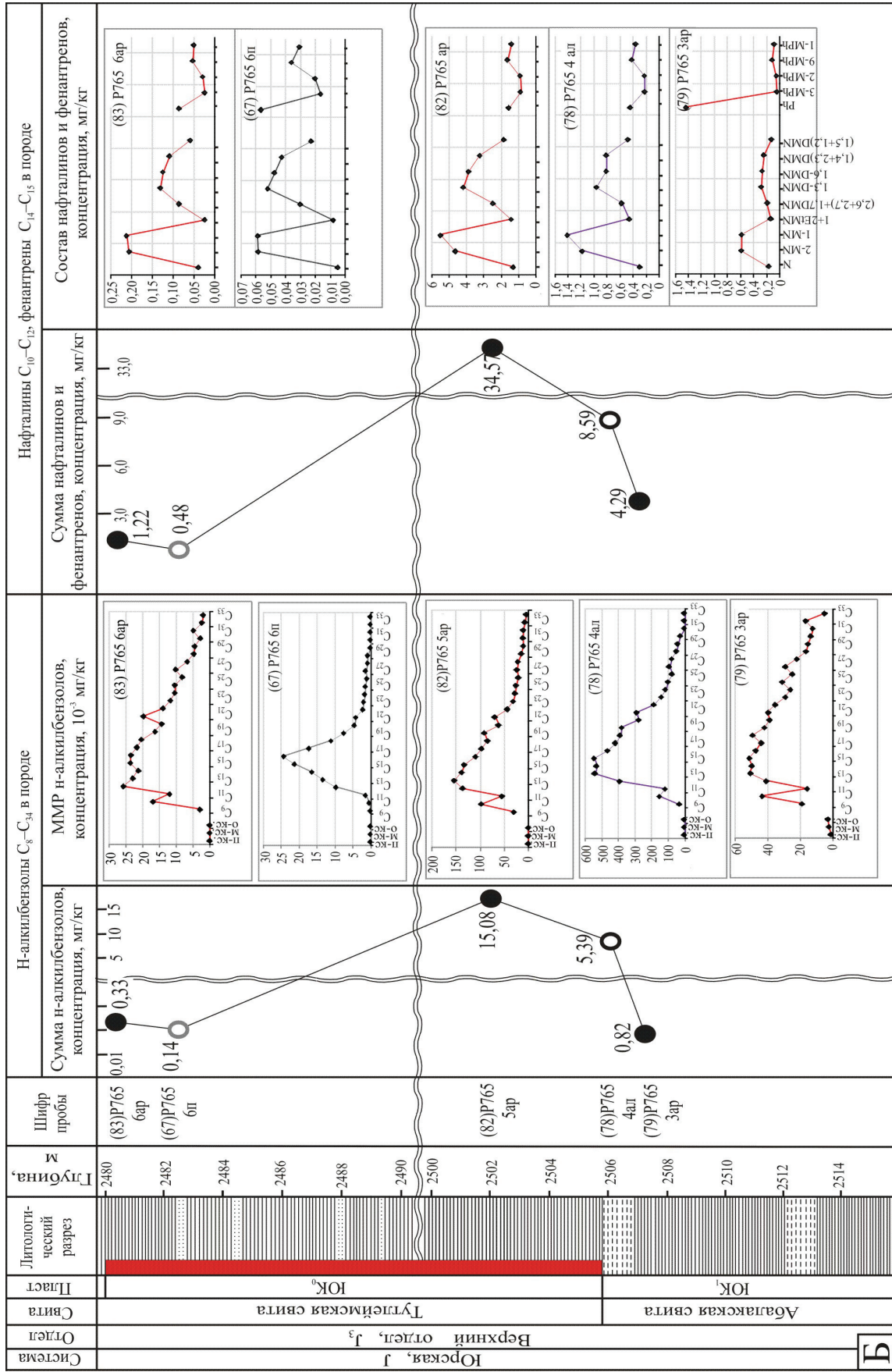
Геохимическая модель вертикальной миграции углеводородов

Результатом исследования послойного распределения нефтяных углеводородов в разрезе меловых, юрских и палеозойских отложений Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений явилось составление схематичной геохимической модели меж- и внутрипластовой вертикальной миграции (рис. 4, А, Б).

В разрезе отложений исследуемых месторождений можно отметить особенности модели:

1. Обширная зона юрского нефтепроявления сформирована в результате активных межпластовых перетоков из низов среднеюрского отдела (низ тюменской свиты) и из верхних отделов тутлеймской свиты. Миграция из низов тюменской свиты происходит как в нижележащие палеозойские отложения, насыщая песчаники и прослои аргиллита, так и в вышележащие пласты, заполняя углеводородами юрский комплекс до абалакской свиты. Мигрирующие УВ богаты легкими гомологами C_9 – C_{21} алкилбензолов, нафталинами C_{10} – C_{12} . Расстояние нисходящей миграции нефти составляет 250...270 м в палеозойские слои (далее фиксируется сингенетичный битумоид). Расстояние проходное восходящими потоками до абалакской свиты составляет около 100 м. Выше абалакского флюидоупора в юрской зоне нефте-

| Система | Отдел | Свита | Пласт | Литологический разрез | Глубина, м | Н-алкилбензолы C_8-C_{34} в породе | | Нафталины $C_{10}-C_{12}$, фенантроны $C_{14}-C_{15}$ в породе | | | | | |
|---------|------------|------------------------------|-----------------|------------------------|------------|--|--|---|--|--------------|------|--------------|------|
| | | | | | | Сумма н-алкилбензолов, концентрация, мг/кг | ММР н-алкилбензолов, концентрация, 10^{-3} мг/кг | Сумма нафталинов и фенантронов, концентрация, мг/кг | Состав нафталинов и фенантронов, концентрация, 10^{-3} мг/кг | | | | |
| А | Меловая, К | Нижний отдел, К ₁ | ВК ₁ | Хантыгмансийская свита | 1524-1556 | Шифр пробы | (76)P765 10ал | 0,0 | 0,11 | 0,24 | | | |
| | | | | | | | | | | | | (80)P765 9ар | 0,05 |
| | | | | | | (73)P765 8п | 0,11 | 0,50 | | | | | |
| | | | | | | | | | | (84)P765 7ар | 0,14 | 0,59 | |
| | | | | | | | | | | | | | |



| Система | Отдел | Свита | Плост | Литологи- чешкий разрез | Глубина, м | Шифр пробы | Н-алкилбензолы C_8-C_{14} в породе | | Нафталины $C_{10}-C_{12}$, фенантроны $C_{14}-C_{15}$ в породе | | | |
|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------------|---------------|-------------------|---|---|---|---|--|---------------|
| | | | | | | | Сумма н-алкилбензолов, концентрация, мг/кг | ММР н-алкилбензолов, концентрация, 10^{-3} мг/кг | Сумма нафталинов и фенантронов, концентрация, мг/кг | Состав нафталинов и фенантронов, концентрация, мг/кг | | |
| Юрская, J | Средний отдел, J ₂ | Люменская свита | ЮК ₂₋₃ | | 2556 | (74)P765 2ал+п | 0,21 | (74)P765 2ал+п | 3,45 | (74)P765 2ал+п | | |
| | | | | | 2560 | | | | | | | |
| | | | | | 2564 | | | | | | | |
| | | | | | 2568 | | | | | | | (71)P765 In |
| | | | | | 2572 | | | | | | | |
| | | | | | 2576 | | | | | | | (75)P765 0ал |
| | | | | | 2580 | | | | | | | |
| | | | | | 2584 | | | | | | | (70)P765 0п |
| | | | | | 2588 | | | | | | | |
| | | | | | 2592 | | | | | | | |
| | | | | | 2596 | | | | | | | |
| | | | | | 2600 | | | | | | | (64)P765 -In |
| | | | | | 2604 | | | | | | | |
| | | | | | 2608 | | | | | | | (77)P765 -1ал |
| 2612 | | | | | | | | | | | | |
| 2616 | | | | | | | | | | | | |
| 2618 | | | | | | | | | | | | |
| ЮК ₄ | | | | | | | 0,13 | | 0,69 | | | |
| | | | | | | | 1,2 | | 8,92 | | | |

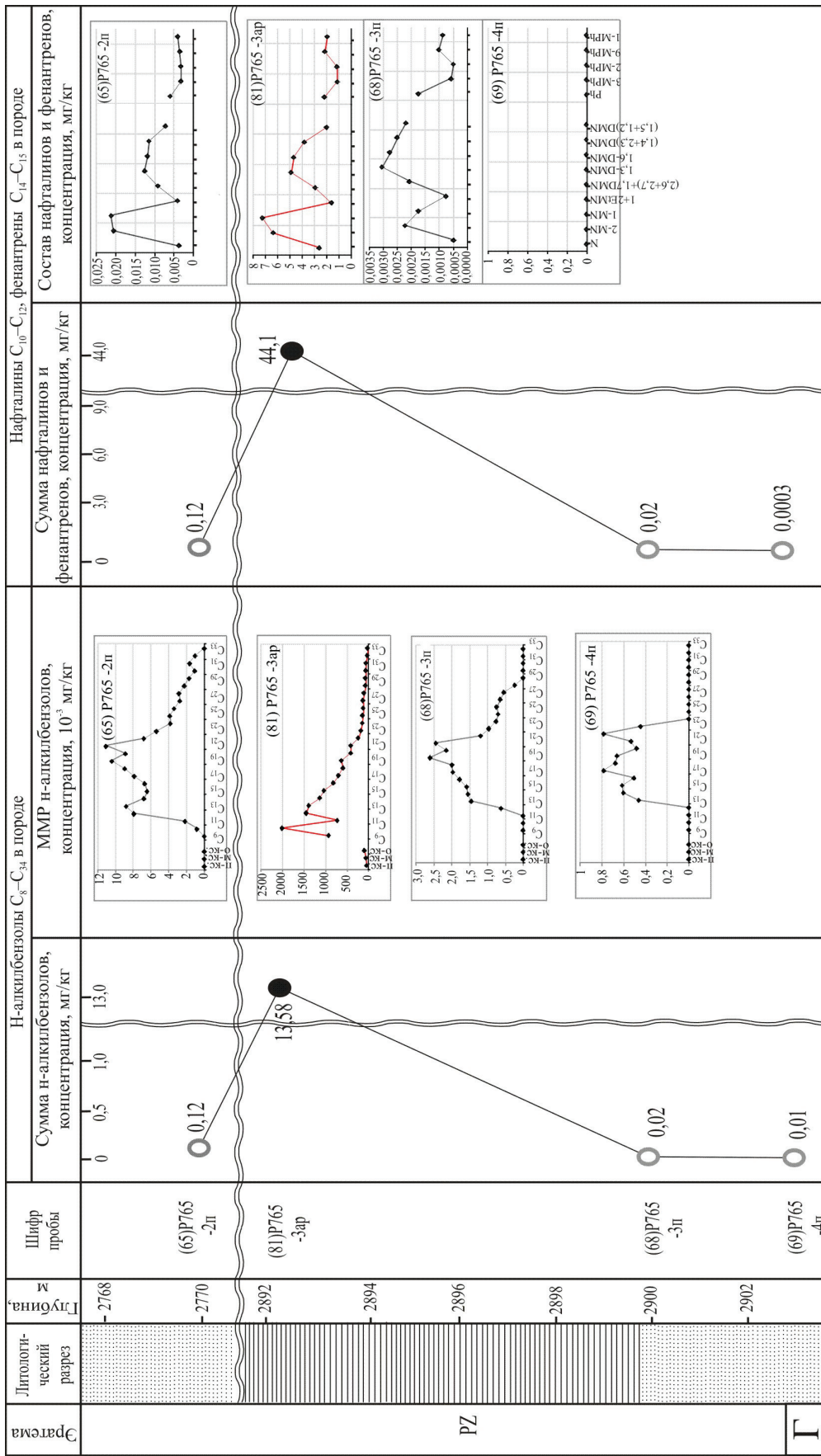
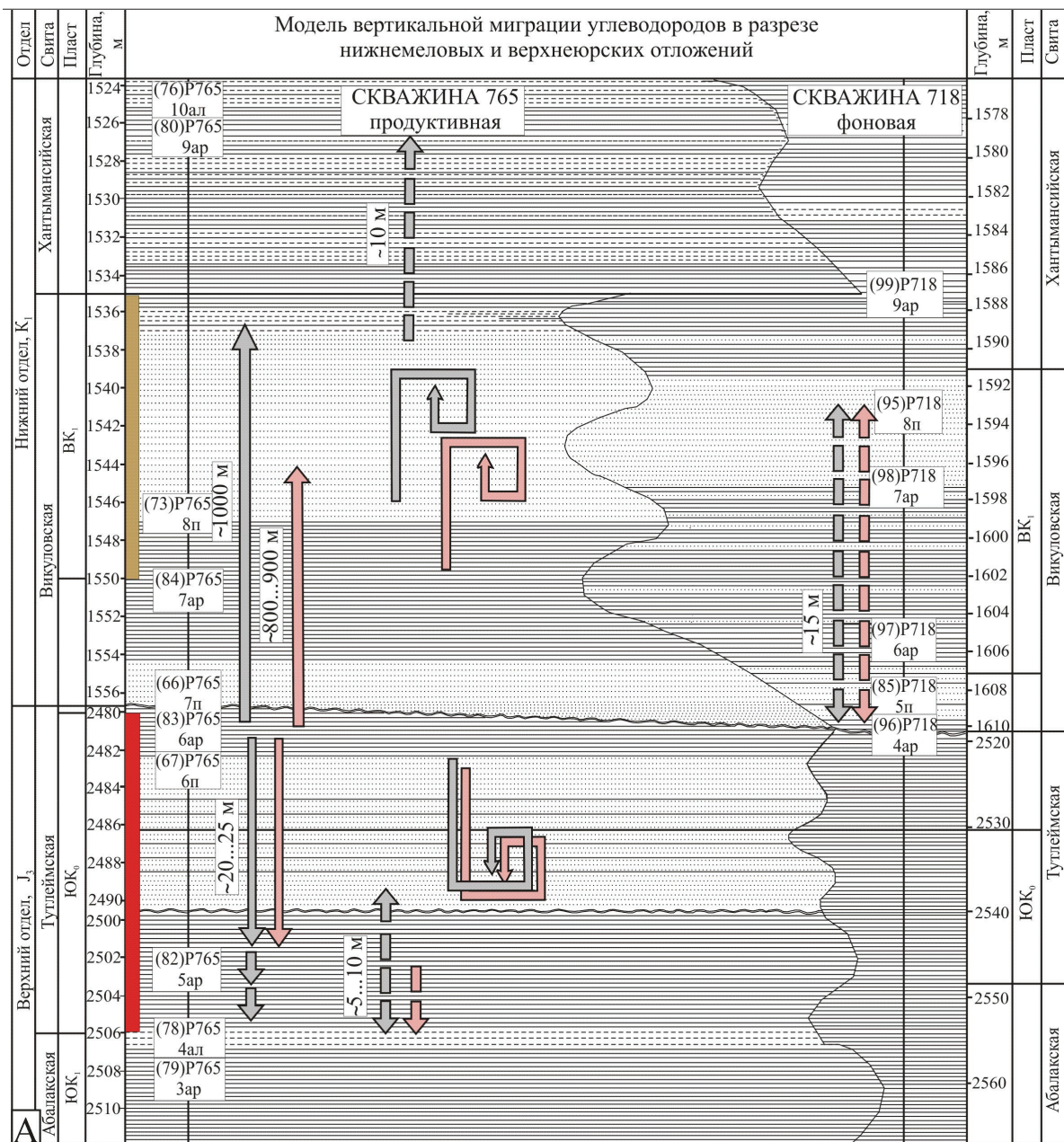


Рис. 3. Распределение ароматических углеводородов в разрезе нижнемеловых (А), верхнеюрских (Б), среднеюрских (В) и палеозойских (Г) отложений скважины Северо-Рогожниковская 765 (условные обозначения те же, что и для рис. 2)

- проявления начинает доминировать органика тутлеймской свиты. Слой ниже тутлеймских аргиллитов, на расстояние до 20...25 м, включая верхи абалакской свиты, пропитаны мигрирующими легкими гомологами C_{11-21} , а компоненты тяжелее C_{24} задержаны фильтрацией или недостаточной летучестью.
- В меловые отложения УВ переходят из юрской зоны нефтепроявлений. Мигрирующий поток легких алкилбензолов состава C_{9-20} можно проследить до образцов хантымансийской свиты, включительно. Нафталины и фенантроны меловых пород также имеют распределение близкое верхнеюрским. Расстояние вертикального межпластового перемещения нефтяных углево-

дородов из юрской зоны нефтепроявлений в меловые отложения можно оценить по тенденции убывания их концентраций: для алкилбензолов – почти 1000 м, для нафталинов – 800...900 м (до верхов викуловской свиты). Для фенантронов закономерного изменения концентраций не выявлено, что говорит о слабой миграционной способности этого класса УВ.

- Основной предполагаемой формой нисходящей меж- и внутрислоевой миграции в пределах Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений может быть перемещение в свободной газопаровой фазе или в водном растворе из зоны генерации. Предполагаемый ме-



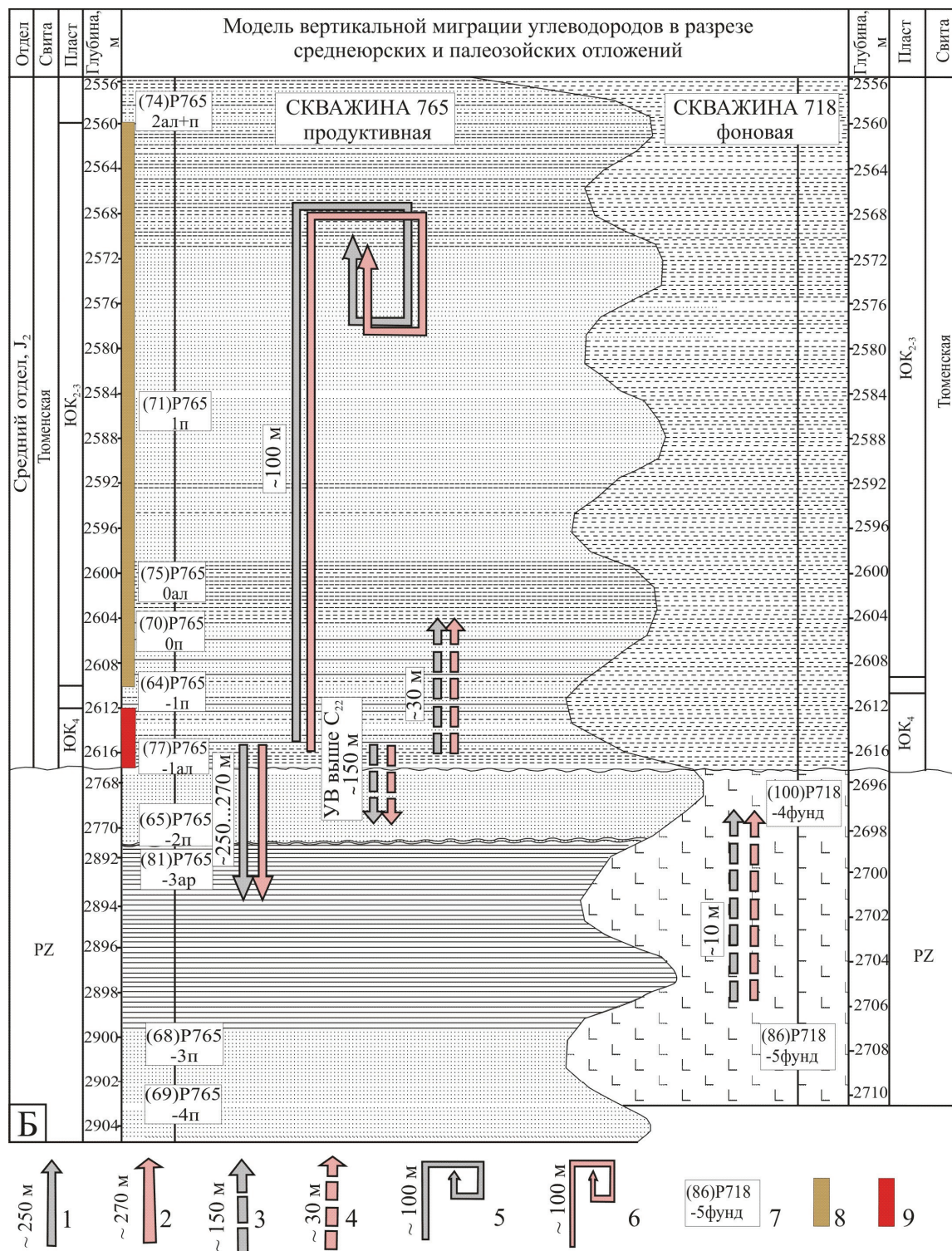


Рис. 4. Геохимическая модель вертикальной миграции углеводородов в разрезе нижнемеловых и верхнеюрских (А), среднеюрских и палеозойских (Б) отложений Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений: 1) межпластовая фильтрация насыщенных УВ; 2) межпластовая миграция ароматических УВ; 3) межпластовая диффузия насыщенных УВ; 4) межпластовая диффузия ароматических УВ; 5) внутрипластовая миграция насыщенных УВ; 6) внутрипластовая миграция ароматических УВ; 7) шифр образца; 8) продуктивный пласт; 9) материнские отложения

ханизм перемещения – поровая фильтрация и диффузия паровой фазы, не исключено перемещение с отжимаемыми водными растворами. Такой механизм обеспечит циркуляцию по пластам в основном легких алкилбензолов состава C_{11-21} , летучих C_{10-12} нафталинов и фенантрена. Вероятной формой восходящей межпластовой миграции из юрских в меловые и дальше по разрезу отложения может быть свободная парогазовая фаза. Всплывание маловероятно по причине отсутствия перераспределения фенантронов по меловым пластам.

Выводы

1. Экспериментально установлено межпластовое перемещение тяжелых нефтяных ароматических углеводородов состава C_9-C_{36} в разрезе Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений Ханты-Мансийского автономно-го округа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по геохимии нефти и газа / под ред. С.Г. Неручева. – СПб.: Недра, 1998. – 576 с.
2. Коржов Ю.В., Исаев В.И., Жильцова А.А. Проблемы нефтепоисковой геохимии и обобщающая схема миграции углеводородных флюидов // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 116–122.
3. Атлас «Геология и нефтегазоносность Ханты-Мансийского автономного округа» // под ред. Э.А. Ахпателова, В.А. Волкова, В.Н. Гончаровой и др. – Екатеринбург: ИздатНаукаСервис, 2004. – 148 с.
4. Иванова Л.И., Исаев В.И., Коржов Ю.В. Методика лабораторных исследований тяжелых углеводородов при нефтепоисковой геохимии // Изменяющаяся геологическая среда: про-

2. Построена геохимическая модель миграции углеводородов, в которой определен набор соединений, обладающих повышенной способностью к межпластовой миграции ($C_{11}-C_{21}$ алкилбензолы, $C_{10}-C_{12}$ нафталины) на расстояния до 1000 м.
3. При высокой концентрации (не менее 5...10 мг/кг) миграция углеводородов происходит в свободной газопаровой фазе или в результате всплывания в водонасыщенных пластах, при низкой (фоновой) концентрации (до 5...10 мг/кг) – в форме диффузии с перераспределением состава по размерам молекул.
4. Дальность перемещения миграционноспособных углеводородов $C_{10}-C_{21}$ (как вверх, так и вниз по разрезу) имеет прямую зависимость от их концентрации в зоне нефтепроявления: при высоких концентрациях – активное перемещение до 1000 м, при фоновых концентрациях – на расстоянии первых десятков метров (10...20 м).

- странственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов: Матер. Междунар. конф. – Казань, 12–16 ноября 2007 г. – Казань: Изд-во «Фэн», 2007. – С. 356–360.
5. Исаев В.И., Коржов Ю.В., Романова Т.И., Бочкарева Н.М. Оценка продуктивности локальных ловушек по составу тяжелых углеводородов в приповерхностных отложениях центральной части Западно-Сибирской плиты // Геофизический журнал. – 2006. – Т. 28. – № 6. – С. 58–74.
 6. Гончаров И.В. Геохимия нефтей Западной Сибири. – М.: Недра, 1987. – 179 с.

Поступила 02.03.2012 г.

МЕТАЛЛОНОСНОСТЬ УГЛЕЙ ИРАНА

В.И. Рыбалко, С.И. Арбузов, А.В. Волостнов

Томский политехнический университет

E-mail: rybalko14@yandex.ru

Оценены средние содержания элементов-примесей в углях Исламской Республики Иран. Выявлены металлоносные угли, и определена геохимическая специализация угольных бассейнов и месторождений. Установлено, что для углей Ирана характерен смешанный халькофильно-литофильно-сидерофильный тип геохимической специализации.

Ключевые слова:

Уголь, Иран, металлоносность углей, редкие элементы.

Key words:

Coal, Iran, metal-bearing of coal, rare elements.

Исламская Республика Иран обладает значительными ресурсами угля, превышающими по современным оценкам 36 млрд т [1]. Геологические работы на уголь в Иране начались в середине XX в. и осуществлялись европейскими, главным образом немецкими, специалистами. С 60-х гг. XX в. геологоразведочные и поисково-съёмочные работы в полном объеме производились советскими геологами. За этот период было открыто и детально исследовано большое количество угольных месторождений, изучено их геологическое и тектоническое строение, угленосность, гидрогеологические условия, подсчитаны запасы углей [1–3]. В связи с осложнившейся политической ситуацией в стране в 80-х гг. XX в. геологоразведочные работы, выполняемые иностранными специалистами, были временно прекращены. Принятые тогда стандарты по оценке качества углей не предусматривали геохимического исследования попутных элементов-примесей в углях. По этой причине, а также в связи с незначительными масштабами угледобычи, металлоносность углей в Иране до настоящего времени практически не изучена. Наметившийся рост добычи и потребления угля в стране обусловил необходимость проведения работ по оценке экологической безопасности и потенциальной металлоносности углей. Для организации таких исследований необходимо проведение опережающих прогнозно-металлогенических работ, позволяющих на предварительной стадии выделить потенциально металлоносные угли, требующие специализированного изучения.

К настоящему времени иранскими специалистами и зарубежными авторами было опубликовано несколько работ, в которых на основе единичных проб из отдельных месторождений оценены содержания некоторых металлов, в том числе редких и благородных [4–7]. Настоящая работа является первой попыткой оценить геохимическую специализацию и металлоносность углей Ирана.

Характеристика объекта исследования

На территории Ирана выделено два угольных бассейна (Табасский и Эльбурсский), несколько

угленосных районов, а также ряд отдельных месторождений (рис. 1). Основная угленосность связана с формацией Шемшак триас-юрского возраста. Кроме того, встречаются каменноугольные и кайнозойские угленосные отложения, не представляющие промышленного интереса. Общие прогнозные ресурсы углей в Иране составляют 36,1 млрд тонн, из них 33,4 млрд тонн сосредоточено в Табасском бассейне и 2,6 млрд тонн – в Эльбурсском бассейне. Угли каменные, марочный состав углей разнообразен, изменяется от Д до А. Пласты в основном маломощные: средняя мощность рабочих пластов составляет 1...2 м [1].

Методика исследований

Для оценки металлоносности углей Ирана было проведено опробование 34 угольных месторождений и углепроявлений, и отобрано 610 проб углей и углевмещающих пород. Отбор проб производился бороздовым способом вкрест простирания угольного пласта по направлению от кровли к почве (рис. 2). Длина интервала опробования составляла от первых сантиметров до метра в зависимости от сложности строения угольного пласта, наличия внутренних породных прослоев, зон трещиноватости, зон окисления. Затем пробы высушивались в естественных условиях, дробились и истирались до пудры (0,074 мм).

Во всех углях и углистых породах определена зольность. Работы выполнены в ПНИЛ по комплексному использованию горючих полезных ископаемых Западной Сибири кафедры химической технологии топлива и химической кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета (ТПУ) по ГОСТ 11022-95 (аналитики Маслов С.Г., Архипов В.С.). Для количественного определения элементов-примесей использовались современные аналитические методы. Основным методом является многоэлементный инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА), выполненный в ядерно-геохимической лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии ТПУ (аналитик А.Ф. Судыко). Методом ИНАА проанализировано 1094 пробы угля, зо-

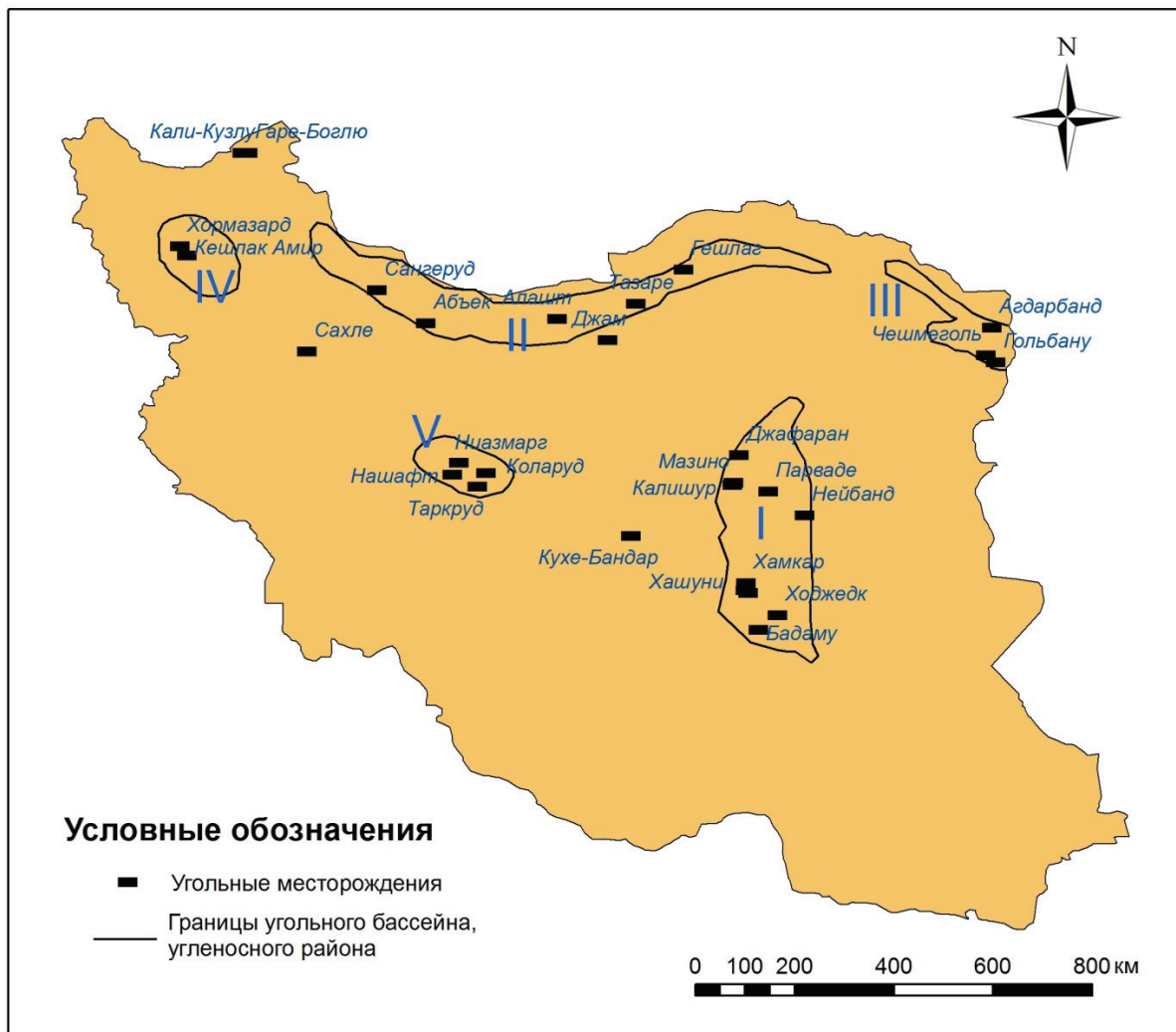


Рис. 1. Схема расположения основных угольных бассейнов и месторождений на территории Исламской Республики Иран: I – Табасский угольный бассейн; II – Эльбурсский угольный бассейн; III – Северо-Хорасанский угленосный район; IV – Мерагинский угленосный район; V – Кашан-Эсфаханский угленосный район

лы угля и углевмещающих пород, и определено содержание 29 химических элементов. Широкий спектр элементов определялся масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), который выполнялся в центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Национального исследовательского Томского государственного университета (аналитик Аношкина Ю.В.). Методом ICP-MS проанализировано 106 проб. Для оценки содержания в золах углей основных золообразующих элементов и отдельных микроэлементов в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа института Геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) выполнен рентгено-флуоресцентный анализ (аналитик Карманова Н.Г.).

Оценка средних содержаний в угольных пластах выполнена как средневзвешенная величина по мощности интервалов опробования; в месторождениях – как средневзвешенное по мощности пластов, в бассейнах и угленосных районах – как

среднеарифметическое по угольным месторождениям (по причине отсутствия точных данных по запасам и ресурсам угля в отдельных месторождениях). Среднее содержание элементов-примесей в углях Ирана в целом по стране рассчитывалось как средневзвешенное по ресурсам угля в бассейнах и угленосных районах.

Результаты исследований и их обсуждение

Преобладающая часть геологических ресурсов угля в Иране сосредоточена в Табасском угольном бассейне. В связи с этим, полученные средневзвешенные оценки содержания элементов-примесей в углях Ирана близки к их содержаниям в углях Табасского бассейна (табл. 1).

Известно, что ископаемые угли способны накапливать значительные количества элементов-примесей, нередко достигающих промышленно значимых концентраций. Накопление элементов-примесей в промышленных концентрациях отмечается в целом ряде угольных месторождений мира [8, 9].



Рис. 2. Схема опробования месторождения Джафаран (Табасский угольный бассейн): 1) уголь; 2) аргиллит

С целью оценки потенциальной металлоносности углей используется понятие геохимической специализации. По А.А. Смыслову [10] выделяется геохимическая специализация первого и второго рода. Специализация первого рода для углей Ирана оценивалась как отношение средних содержаний элементов в углях к кларку для верхней части континентальной земной коры [11].

Сопоставление геохимической специализации углей из разных регионов мира (рис. 3) показывает, что все они имеют близкую геохимическую специализацию. Большинство углей специализировано на Be, B, Ge, Mo. Отличия заключаются в специализации углей Китая также на Li, Y, Ta, Hf, U, REE, углей Сибири – на Au, Sc, Co, Sb, REE, Ирана – на Li, Rb, Cs, Cd, Pb.

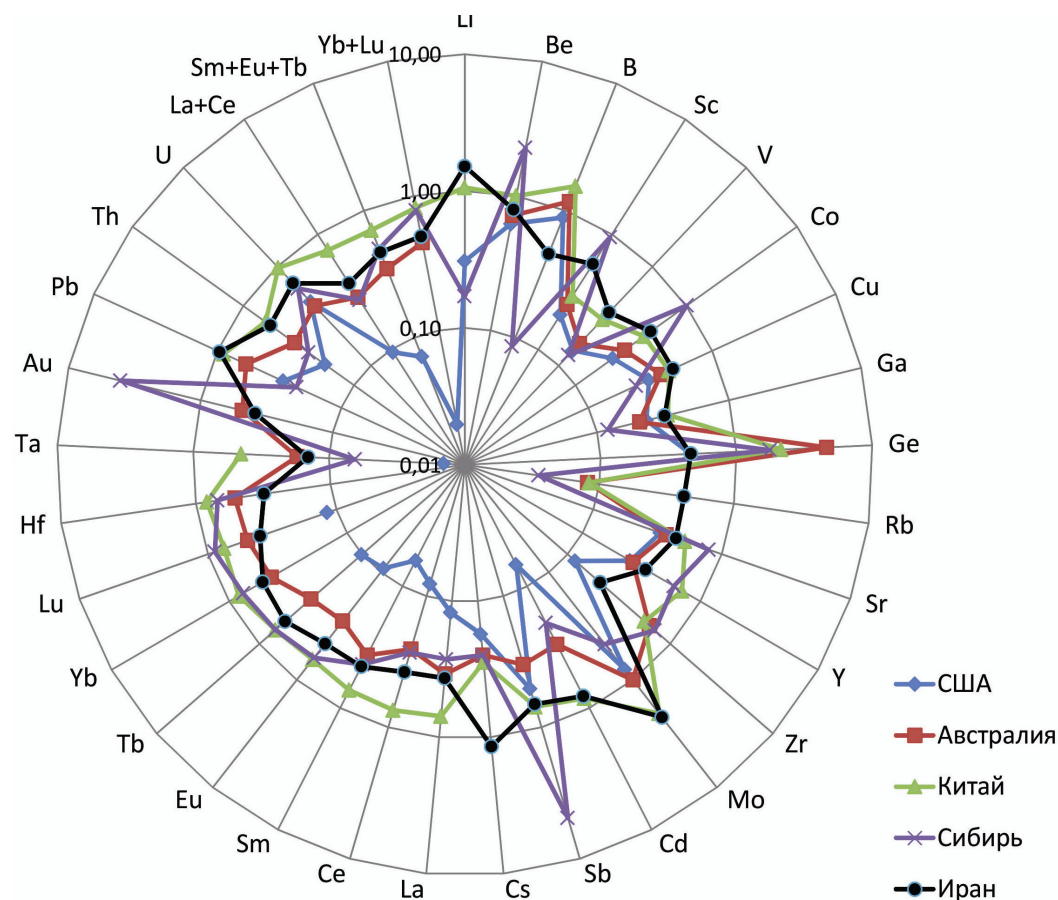


Рис. 3. Нормированные (к среднему в земной коре) кривые распределения элементов в углях США [12], Австралии [13], Китая [14], Сибири [15] и Ирана

Таблица 1. Среднее содержание некоторых редких элементов-примесей в углях Ирана

| Месторождение, бассейн | Число проб | A*, %* | Содержание элемента, г/т | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------------|-------------|--------------------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | Sc | Co | Rb | Sb | Cs | La | Ce | Nd | Sm | Eu | Tb | Yb | Lu | Hf | Ta | Au** | Th | U |
| Эльбурсский угольный бассейн | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Гешлаг | 37 | 26,4 | 11,0 | 10,9 | 44,8 | 0,7 | 4,2 | 20,4 | 38,8 | 14,8 | 3,2 | 0,8 | 0,6 | 1,7 | 0,2 | 2,1 | 0,6 | 0,4 | 8,2 | 1,6 |
| Тазаре | 38 | 21,8 | 13,8 | 13,0 | 32,2 | 0,4 | 3,4 | 18,6 | 34,0 | 11,4 | 3,2 | 0,8 | 0,6 | 1,6 | 0,3 | 2,2 | 0,4 | 7,7 | 6,5 | 2,3 |
| Джам | 21 | 19,6 | 10,5 | 4,1 | 21,0 | 0,4 | 1,9 | 8,4 | 17,8 | 6,5 | 2,6 | 0,9 | 0,9 | 1,5 | 0,2 | 0,8 | 0,2 | 0,4 | 4,0 | 1,4 |
| Абъек | 7 | 37,7 | 15,3 | 10,5 | 43,0 | 0,7 | 4,9 | 19,0 | 34,0 | 9,7 | 2,9 | 0,8 | 0,6 | 1,9 | 0,3 | 2,4 | 0,7 | 2,0 | 6,4 | 2,8 |
| Алашт | 11 | 18,9 | 9,2 | 8,9 | 25,0 | 0,8 | 2,9 | 13,4 | 26,6 | 10,5 | 2,4 | 0,4 | 0,4 | 1,4 | 0,2 | 2,4 | 0,8 | 3,7 | 5,2 | 2,5 |
| Сангеруд | 18 | 7,9 | 5,5 | 8,3 | 10,7 | 2,1 | 1,3 | 5,6 | 14,5 | 6,5 | 1,8 | 0,5 | 0,3 | 0,8 | 0,1 | 0,8 | 0,3 | 0,7 | 2,5 | 0,9 |
| Среднее для бассейна | 132 | 22,1 | 10,9 | 9,3 | 29,4 | 0,9 | 3,1 | 14,2 | 27,6 | 9,9 | 2,7 | 0,7 | 0,6 | 1,5 | 0,2 | 1,8 | 0,5 | 2,5 | 5,5 | 1,9 |
| Табасский угольный бассейн | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Бадаму | 33 | 24,5 | 8,5 | 9,6 | 49,1 | 1,5 | 5,9 | 10,8 | 15,1 | 6,6 | 2,1 | 0,6 | 0,4 | 1,2 | 0,2 | 1,4 | 0,2 | 0,3 | 4,8 | 1,4 |
| Хамкар | 40 | 19,9 | 8,2 | 10,6 | 41,8 | 1,0 | 4,5 | 13,6 | 26,7 | 10,6 | 3,0 | 0,7 | 0,6 | 1,3 | 0,2 | 1,4 | 0,3 | 1,8 | 5,5 | 1,6 |
| Хашуни | 31 | 16 | 7,6 | 5,5 | 35,7 | 1,2 | 3,8 | 9,3 | 20,4 | 9,9 | 2,5 | 0,6 | 0,5 | 1,0 | 0,1 | 1,3 | 0,1 | 0,5 | 5,1 | 1,3 |
| Ходжедк | 24 | 14,9 | 4,5 | 5,1 | 16,9 | 0,5 | 2,1 | 4,9 | 11,3 | 4,1 | 1,2 | 0,3 | 0,2 | 0,6 | 0,1 | 0,7 | 0,1 | 0,0 | 1,9 | 1,2 |
| Джафаран | 19 | 27 | 8,2 | 11,7 | 55,8 | 0,6 | 8,0 | 13,5 | 28,6 | 10,7 | 2,8 | 0,6 | 0,4 | 2,0 | 0,2 | 1,6 | 0,3 | 1,0 | 7,0 | 1,8 |
| Калишур | 30 | 36,7 | 11,8 | 10,8 | 76,4 | 0,6 | 6,7 | 22,5 | 44,3 | 18,4 | 3,9 | 1,0 | 0,6 | 1,8 | 0,3 | 2,2 | 0,3 | 0,0 | 9,4 | 2,0 |
| Мазино | 38 | 24,9 | 8,6 | 7,5 | 52,4 | 0,4 | 4,2 | 11,6 | 25,0 | 10,5 | 2,3 | 0,6 | 0,4 | 1,3 | 0,2 | 1,5 | 0,3 | 19,0 | 5,8 | 1,0 |
| Нейбанд | 38 | 28,1 | 7,3 | 8,6 | 44,6 | 0,6 | 3,7 | 9,2 | 20,5 | 8,7 | 3,6 | 0,9 | 0,7 | 1,2 | 0,2 | 1,0 | 0,2 | 0,2 | 3,8 | 2,4 |
| Пабдана | 26 | 25 | 11,2 | 4,8 | 65,7 | 0,8 | 6,5 | 11,3 | 24,0 | 10,7 | 2,4 | 0,6 | 0,3 | 1,3 | 0,2 | 1,7 | 0,2 | 0,0 | 6,1 | 2,6 |
| Парваде | 35 | 24,4 | 5,0 | 5,7 | 43,4 | 0,4 | 2,9 | 8,9 | 19,0 | 7,1 | 1,9 | 0,4 | 0,4 | 1,0 | 0,1 | 1,0 | 0,1 | 0,8 | 3,8 | 1,3 |
| Среднее для бассейна | 314 | 24,1 | 8,1 | 8,0 | 48,2 | 0,8 | 4,8 | 11,6 | 23,5 | 9,7 | 2,6 | 0,6 | 0,5 | 1,3 | 0,2 | 1,4 | 0,2 | 2,4 | 5,3 | 1,7 |
| Северо-Хорасанский угленосный район | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Агдарбанд | 23 | 38,5 | 14,9 | 8,0 | 15,5 | 0,4 | 1,9 | 16,7 | 30,6 | 8,9 | 2,4 | 0,6 | 0,4 | 1,7 | 0,3 | 1,7 | 0,4 | 2,0 | 3,6 | 1,2 |
| Чешмеголь | 7 | 20,8 | 7,8 | 4,8 | 59,1 | 0,6 | 6,4 | 54,6 | 97,4 | 30,8 | 5,0 | 0,9 | 0,8 | 2,6 | 0,4 | 1,3 | 1,1 | 0,0 | 18,9 | 8,7 |
| Гольбану | 30 | 17,4 | 7,9 | 7,2 | 30,1 | 1,7 | 3,0 | 10,2 | 22,2 | 9,2 | 2,4 | 0,5 | 0,5 | 1,4 | 0,2 | 1,0 | 0,1 | 1,1 | 4,3 | 1,7 |
| Среднее для района | 60 | 25,6 | 10,2 | 6,7 | 34,9 | 0,9 | 3,7 | 27,2 | 50,1 | 16,3 | 3,3 | 0,7 | 0,5 | 1,9 | 0,3 | 1,3 | 0,5 | 1,0 | 8,9 | 3,9 |
| Мерагинский угленосный район | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Хормазард | 7 | 18,5 | 15,6 | 0,9 | 3,3 | 0,2 | 0,5 | 41,7 | 69,0 | 31,8 | 10,3 | 2,4 | 1,0 | 1,7 | 0,2 | 1,8 | 0,8 | 1,0 | 4,6 | 5,2 |
| Санг-Хотаб | 3 | 24,0 | 16,5 | 11,8 | 43,6 | 1,1 | 4,2 | 9,7 | 22,2 | 8,7 | 2,0 | 0,5 | 0,5 | 1,2 | 0,2 | 1,0 | 0,4 | 0,0 | 3,8 | 2,4 |
| Кали-Кузлу | 5 | 21,1 | 3,4 | 28,6 | 11,6 | 0,1 | 0,8 | 8,9 | 24,1 | 13,5 | 3,6 | 0,8 | 0,6 | 2,2 | 0,3 | 0,8 | 0,2 | 2,6 | 1,7 | 1,0 |
| Сахле | 13 | 28,8 | 22,2 | 5,9 | 27,7 | 1,1 | 2,4 | 17,9 | 31,7 | 8,7 | 2,6 | 0,8 | 0,7 | 1,9 | 0,3 | 2,9 | 0,7 | 2,1 | 5,0 | 2,3 |
| Среднее для района | 28 | 26,3 | 14,0 | 10,7 | 32,0 | 0,7 | 2,9 | 19,1 | 36,4 | 16,2 | 4,3 | 1,0 | 0,6 | 1,7 | 0,2 | 1,8 | 0,5 | 1,1 | 4,4 | 2,5 |
| Среднее для Ирана | 534 | 24,0 | 8,3 | 8,1 | 46,8 | 0,8 | 4,7 | 11,8 | 23,9 | 9,8 | 2,6 | 0,6 | 0,5 | 1,3 | 0,2 | 1,4 | 0,2 | 2,4 | 5,3 | 1,7 |
| Среднее для углей мира [17] | | | 3,7 | 6,0 | 18,0 | 1,0 | 1,1 | 11,0 | 23,0 | 12 | 2,2 | 0,4 | 0,3 | 1,0 | 0,2 | 1,2 | 0,3 | 4,4 | 3,2 | 1,9 |

Примечание: * – зольность угля; ** – в мг/т.

Поскольку средние содержания элементов-примесей в углях Ирана практически совпадают со средними содержаниями в углях Табасского бассейна, целесообразно производить оценку геохимической специализации отдельно по бассейнам и угленосным районам. Для изученных угольных бассейнов и угленосных районов Ирана характерна однотипная специализация на Li, Cs, Mo. Угли Эльбурсского угольного бассейна специализированы на Be, Ge, Nb, Pb, угли Табасского – на Pb, для углей Северо-Хорасанского бассейна характерна литофильная специализация U, Th, LREE (рис. 4).

Информация о металлонности углей Ирана, полученная в процессе выполнения настоящей работы, хорошо согласуется с прогнозами, данными авторами ранее [16].

В углях исследуемых угольных месторождений Ирана наряду с содержаниями отдельных элементов ниже предела обнаружения аналитического ме-

тода и рядовыми содержаниями отмечаются также и возможно промышленно-значимые концентрации элементов-примесей. Из большой группы исследуемых элементов практический интерес в настоящее время могут представлять Sc, Ge, Au, Cu, V, REE (табл. 2). Коэффициенты перед элементами в формуле характеризуют контрастность аномалий и рассчитаны по отношению к кларку для верхней части континентальной земной коры по [11].

Скандий. Среднее содержание скандия в углях Ирана составляет 8,3 г/т, а в золе – 39,4 г/т, при средней зольности 24 %. По сравнению с мировыми данными для каменных углей [17] угли Ирана значительно обогащены скандием. По отдельным угольным месторождениям средние его содержания изменяются от 3,4 до 22,2 г/т. В некоторых пробах угля из месторождений Эльбурсского угольного бассейна концентрация скандия в золе достигает 250 г/т.

Сравнение средних данных по отдельным угольным бассейнам и угленосным районам показывает, что угли центральной части Ирана (Табасский угольный бассейн) обеднены скандием по сравнению с углями северных районов. Вероятно, это связано с геохимическими особенностями областей питания угольных бассейнов. Скандий относится к группе сидерофильных элементов, повышенным кларком Sc обладают богатые железом и магнием изверженные породы основного состава [9]. Основной областью питания в период формирования Табасского бассейна были преимущественно салические породы верхнепротерозойского метаморфического комплекса, в пределах которого значительную роль играли докембрийские интрузии гранитоидов. В то же время в петрофонде области питания Эльбурсского бассейна, особенно в центральной и западной его части, распространены формации базитового ряда.

На фоне в целом повышенного содержания скандия в углях Ирана здесь можно выделить несколько угольных месторождений с аномальными концентрациями и значительными его ресурсами, перспективных для его промышленного извлечения. По предварительным оценкам на месторождении Тазаре ресурсы скандия в углях могут составлять

около 400 т, а на месторождении Хашуни – около 100 т.

Германий. Определение Ge производилось в углях методом ICP-MS и в золе углей Ирана – методом РФА. Данные методики предполагают нагревание проб до температур 500 и 960 °С соответственно. В последнем случае значительная часть германия может переходить в летучие соединения и не фиксироваться методом РФА. Предел обнаружения Ge методом РФА составляет 20 г/т, при среднем содержании Ge в золах каменных углей мира 18 г/т [17]. Аномально высокие содержания Ge в золе углей отмечены в трех месторождениях Эльбурсского угольного бассейна: Сангеруд, Гешлаг и Алашт. В месторождении Сангеруд в двух пробах золы из низкозольных углей установлены содержания 326 и 323 г/т. В месторождении Гешлаг также в двух пробах золы из низкозольных углей содержание Ge в составляет 254 и 219 г/т. Единичная проба из месторождения Алашт с зольностью угля 4,7 % содержит 155 г/т Ge в золе. Полученные данные не позволяют сделать объективные выводы о германиеносном потенциале углей Ирана, однако они позволяют сделать оптимистичный прогноз на выявление здесь германий-угольных месторождений.

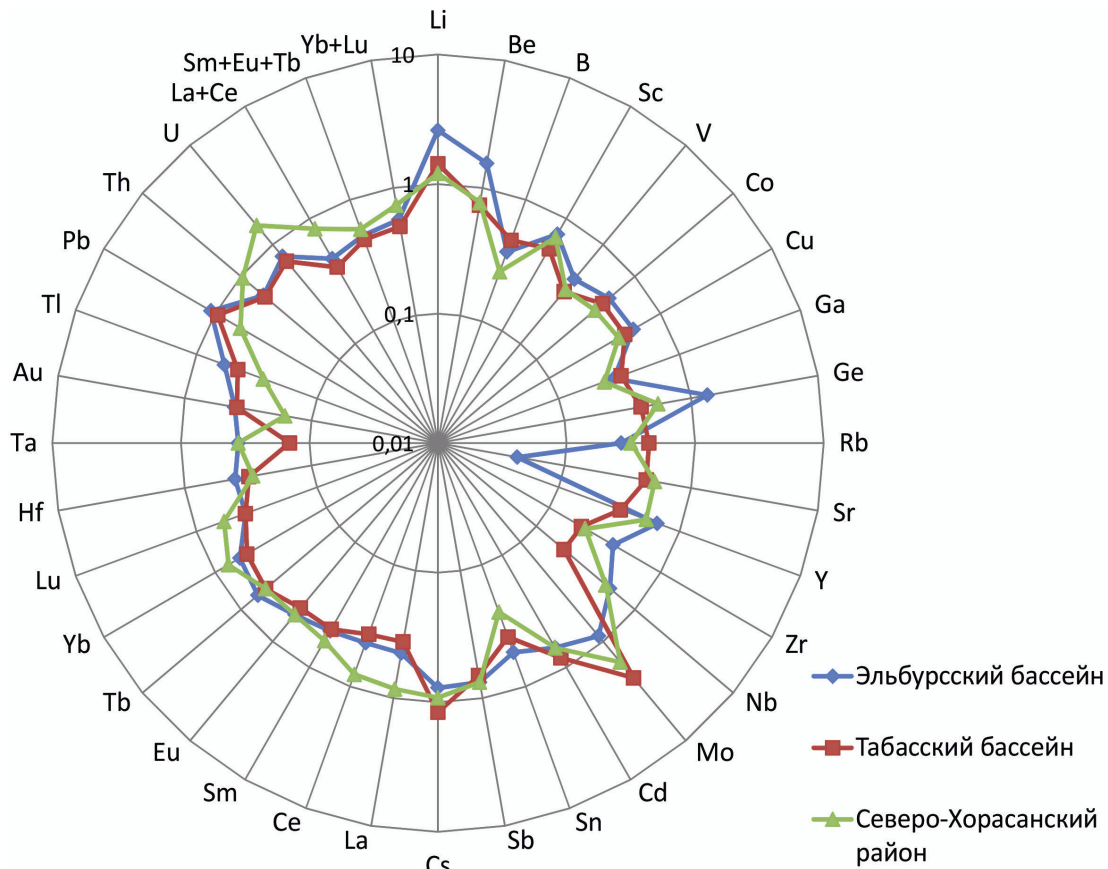


Рис. 4. Нормированные (к среднему в земной коре) кривые распределения элементов в углях Эльбурского, Табасского угольных бассейнов и Северо-Хорасанского угленосного района

Таблица 2. Формулы геохимической специализации угольных месторождений, угленосных районов и бассейнов Ирана

| Бассейн, район, месторождение | Ассоциация элементов |
|-------------------------------------|---|
| Эльбурсский угольный бассейн | |
| Абъек | 9Se 3As 3Cs 2Be 2Pb |
| Алашт | 7Se 5As 2Au 2Sb 2Nb 2Ti |
| Гешлаг | 32Se 4Li 2Cs 2As |
| Джам | 44Se |
| Сангеруд | 4Sb 3Ge 3Cd 2Li 2Be 2Se |
| Тазаре | 33Se 6Li 3Cs 2Be 2Pb 2Zn |
| Табасский угольный бассейн | |
| Бадаму | 49As 16Se 10Mo 9Pb 4Be 4Sb 3Li 3Cs 3Zn 2Sc 2Co 2Mn 2Y 2Gd 2Tb 2Dy 2Er 2Bi |
| Джафаран | 38Se 4As 4Cs 3Yb |
| Калишур | 196Se 3As 2Cs |
| Мазино | 38Au 26Se 7Li 3B 2Cs 2Pb |
| Нейбанд | 72Se 10As 4U 3Cs 3Tb 2Sm 2Zn 2Eu |
| Парваде | 29Se 9As 6Mo 5Li |
| Пабдана | 16Se 5As 4Cs 3U 3Mo |
| Хамкар | 130As 7Se 5Pb 4Cs 4Sb 3Li 3Zn 3Mo 2Co |
| Хашуни | 7Sr 7Se 3As 3Cs 3Sb 2Li 2Be 2Zn 2Mo 2Ba 2Pb |
| Ходжедк | 20Se 14Au 14As 2Cs |
| Северо-Хорасанский угленосный район | |
| Агдарбанд | 255Au 17Se 4As 2Li |
| Гольбану | 25Au 21Se 14As 8Sb 4Zn 3Cs 2Tb 2Eu |
| Чешмеголь | 25Se 10W 8U 5Th 4 La 4Ce 4Cs 3As 2Sm 2Yb 2Nd 2Tb 2Ta 2Be |
| Мерагинский угленосный район | |
| Хормазард | 12 Sr 5Eu 4Sm 3U 3La 3Nd 2Ce 2Zn |
| Кали-Кузлу | 26Se 4Co 2Zn |
| Гаредагло | 4Cs 2U |
| Сахле | 21Se 2Ba 2Sb |

Золото. Среднее содержание золота в углях Ирана составляет 2,4 мг/т, при кларке для каменных углей мира 4,4 мг/т [17]. Аномальные концентрации Au в углях отмечаются в Табасском и Эльбурсском угольных бассейнах, а также в Северо-Хорасанском угленосном районе. Они установлены в пробах угля из месторождения Мазино (241 мг/т), Тазаре (122 мг/т), Ходжедк (87 мг/т). Наиболее высокие концентрации отмечаются в Северо-Хорасанском угленосном районе. В месторождении Гольбану в золе углей установлены аномалии с содержаниями золота 2 и 5 г/т, а в месторождении Агдарбанд в одной пробе содержание золота достигает 5,2 г/т. Природа этих аномалий не ясна, однако наиболее вероятным источником аномальных концентраций золота в углях района являются продукты размыва золоторудных месторождений, распространенных в непосредственной близости от угольных объектов [18].

Аномальная золотоносность углей из угольной шахты Шахруд (месторождение Тазаре Эльбурсского бассейна) была ранее отмечена Язди [5]. Приведенные автором данные уникальны для углей и в процессе настоящей работы не нашли подтверждения.

Ванадий. Среднее содержание V в углях составляет 44 г/т, при кларке для каменных углей 28 г/т. Угли Эльбурсского бассейна в большей степени обогащены V, в них среднее содержание достигает 88 г/т.

Обогащение углей Ирана V по сравнению с кларком для углей, вероятно, связано с широким распространением на территории Ирана вулкано-генных образований основного состава, которые также можно рассматривать в качестве источника Sc в углях, содержания которого в углях Ирана также превышают среднемировые оценки. С магматизмом базитового состава связано накопление в углях прочих элементов-сидерофилов, в том числе элементов группы платины, однако в рамках настоящей работы содержание платиноидов не определялось.

Наиболее контрастные аномалии V в углях отмечаются в месторождении Абъек (195 г/т), Хашуни (144 г/т), Бадаму (144 г/т), Сангеруд (112 г/т).

Среднее содержание ванадия в золе углей Ирана составило 201 г/т. Кларк для золы каменных углей составляет 170 г/т [17]. Наиболее высокие средние содержания V золе углей отдельного месторождения отмечаются в месторождениях Алашт и Тазаре и составляют 371 и 307 г/т соответственно.

Медь. По результатам анализов ICP-MS среднее содержание Cu в углях Ирана составляет 18,8 г/т. При этом угли Эльбурсского угольного бассейна несколько обогащены Cu на фоне углей Табасского угольного бассейна и Северо-Хорасанского угленосного района, и среднее содержание в них составляет 22 г/т. Максимальные концентрации меди в углях зафиксированы в месторождении Сангеруд (75 г/т), Хашуни (68 г/т), Бадаму (61 г/т).

Среднее содержание в золе углей Ирана составляет 142 г/т при кларке для золы углей мира 110 г/т [17]. Наиболее высокие концентрации меди (до 0,15 %) отмечаются в месторождении Джам, содержание Cu в золе в среднем по месторождению составляет 628 г/т. Вероятно, повышенные концентрации Cu в углях отдельных месторождений связаны с широким распространением рудных месторождений Cu на территории Ирана, расположенных в непосредственной близости от угольных объектов. По мнению Я.Э. Юдовича [9], одним из условий накопления Cu в углях является наличие ореольных меденосных вод рудных месторождений. Так, вблизи от месторождения Джам локализируются два медных месторождения жильного типа: Чах-Месси и Чах-Ширин [18], оказавших свое влияние на геохимический спектр углей месторождения Джам. В целом угли Ирана обогащены Cu на фоне углей мира, однако даже самые обогащенные угли нельзя рассматривать в качестве возможного сырьевого источника Cu, поскольку концентрации в золах этих углей на порядок ниже бедных руд собственно медных месторождений.

Редкоземельные элементы (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu). Средние содержания этих элементов

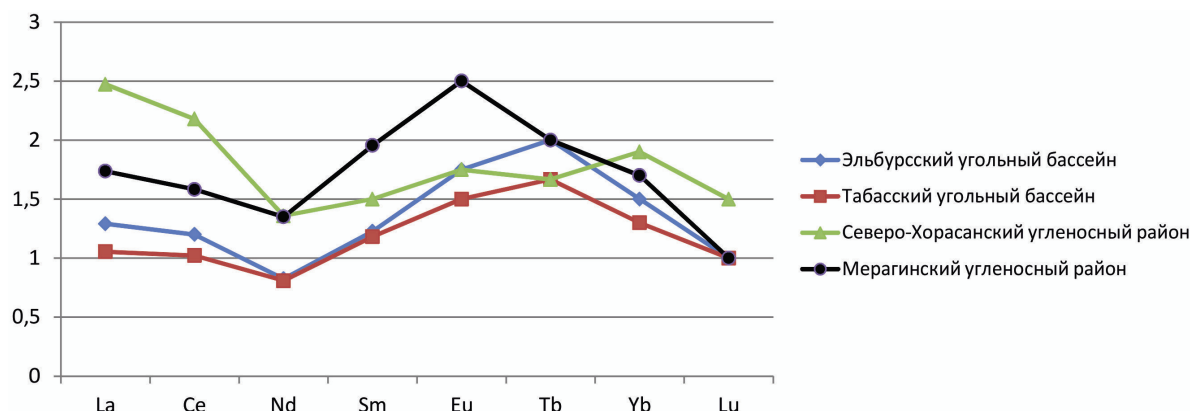


Рис. 5. Нормированные кривые (к кларку для каменных углей [17]) распределения REE в углях различных бассейнов и угленосных районах Ирана

в углях Ирана близки к среднемировым значениям. Так, сумма этих редких земель в углях Ирана составляет 50,6 г/т при среднемировых значениях 50,1 г/т [17]. Наименьшие значения суммы REE в углях отмечаются в Табасском угольном бассейне, немногим выше значение суммы REE в углях Эльбурского угольного бассейна (рис. 5). Угли Северо-Хорасанского и Мерагинского угленосных районов обогащены на фоне остальных углей.

Наиболее высокими уровнями накопления характеризуются угли месторождений Чешмеголь Северо-Хорасанского угленосного района на северо-востоке и Хормазард Мерагинского района на северо-западе страны. На месторождении Чешмеголь среднее содержание суммы REE в углях составляет 192,5 г/т, в золе углей – 848 г/т, а на месторождении Хормазард – 158,3 г/т в углях и 922 г/т в золе углей.

В золах углей Ирана нередко фиксируются аномальные концентрации таких элементов-примесей, как Zr (до 0,14 %), Hf (до 174 г/т), Ag (до 24 г/т), Ta (до 14,2 г/т), Co (до 722 г/т) и др. Так, максимальное содержание Zr, Hf и Nb зафиксировано в золе угля угольного месторождения Алашт и составляет 1357, 58 и 137 г/т соответственно. Максимальная концентрация серебра отмечена в пробе зола углей из месторождения Абъек и составляет 24,1 г/т, что в 240 раз больше, чем кларк для зола каменных углей [17]. Аномальные значения содержаний Ta отмечаются в углях Эльбурского бассейна. На месторождении Алашт в двух пробах содержание Ta составляет 14,2 и 7,6 г/т, а в месторождении Сангеруд – 8 и 7,6 г/т в золе угля.

Максимумы Co и Mo в золе угля отмечены на месторождении Хамкар Табасского бассейна и составляют 722 и 77 г/т соответственно. На месторождении Ходжек в золе углей содержание Pb достигает 0,3 %. Аномальное содержание Y отмечается в золе углей месторождения Тазаре и составляет 257 г/т. Содержание Ga в золе углей месторождения Сангеруд достигает 229 г/т.

Выводы

1. Угли Ирана характеризуются смешанной халькофильно-сидерофильно-литофильной геохимической специализацией.
2. Угли Табасского бассейна геохимически специализированы на Au, Cs, Sc, Sb и REE. Для Эльбурского угольного бассейна характерна геохимическая специализация на Sc, Sb, Ge и V. Геохимическая специализация углей Северо-Хорасанского угленосного района хорошо согласуется с особенностями геологического строения и металлогении района. Здесь отмечаются контрастные аномалии Au, Ta, Sc и REE. Широкое распространение магматических пород различного возраста и состава в области питания Мерагинского угленосного района оказало свое влияние на геохимический спектр углей. Здесь отмечаются угли, специализированные на Sc, Co, Sb, REE.
3. Наличие контрастных аномалий редких элементов в углях Ирана позволяет прогнозировать обнаружение здесь промышленно значимых концентрации и ресурсов таких элементов, как Ge, Sc, Se, As, Sb, Mo, Au, REE.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геология и полезные ископаемые зарубежных стран. Вып.1. Минерально-сырьевая база Ирана (твердые полезные ископаемые) / под ред. В.П. Орлова. – М.-СПб.: ВНИИЗарубежгеологии, 1993. – 300 с.
2. Брагин Ю.Н., Голубев С.А., Полянский Б.Н. Палеогеография основных этапов накопления нижнемезозойских угленосных отложений в Иране // Литология и полезные ископаемые. – 1981. – № 1. – С. 69–81.
3. Брагин Ю.Н., Голубев С.А., Полянский Б.Н. Стратиграфия нижнемезозойской угленосной формации Ирана // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1981. – № 8. – С. 64–71.
4. Goodarzy F., Sanei H., Stasiuk L.D., Bagheri-Sadeghi H., Reyes J. A preliminary study of mineralogy and geochemistry of four coal samples from northern Iran // Int. J. Coal Geol. – 2006. – V. 65. – P. 35–50.
5. Yazdi M., Esmailnia S.A. Dual-energy gamma-ray technique for quantitative measurement of coal ash in the Shahroud mine, Iran // Int. J. Coal Geol. – 2003. – V. 55. – P. 151–155.
6. Yazdi M., Esmailnia S.A. Geochemical properties of coals in the Lushan coal field of Iran // Int. J. Coal Geol. – 2004. – V. 60. – P. 73–79.
7. Babazadeh V.M., Ardebili L.S., Navi P., Xasayev A.I., Kerimli U.I. Geochemistry of trace elements in Galandrud coals of Central Alborz, Iran // The Caspian Sea. International Journal. Natural resources. – 2010. – № 4. – P. 18–29.
8. Угольная база России. Том VI. Основные закономерности углеобразования и размещения угленосности на территории России. – М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. – 779 с.
9. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 538 с.
10. Принципы и методика геохимических исследований при прогнозировании и поисках рудных месторождений / под ред. А.А. Смыслова, В.А. Рудника, Н.М. Динкова, А.И. Понойтова. – Л.: Недра, 1979. – 247 с.
11. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной земной коры // Геохимия. – 2003. – № 7. – С. 785–792.
12. Finkelman R.B. Trace and minor elements in coal // Organic geochemistry. Chapter 28 / Eds. M.H. Engel, S.A. Masco. – N.Y.: Plenum Press, 1993. – P. 593–607.
13. Sweine D.J. Trace elements in Australian bituminous coal and fly ashes // Colloq. Combustion of Pulverised Coal: The Effects of Mineral Matter. – Newcastle, NSW: Univ. Newcastle, 1979. – P. 14–18.
14. Dai Sh., Ren D., Chou Ch, Finkelman R.B., Seredin V.V., Zhou Y. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization // Int. J. Coal Geol. – 2012. – V. 94. – P. 3–21.
15. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: Изд. Дом «Д-Принт», 2007. – 468 с.
16. Рыбалко В.И., Арбузов С.И. Прогнозно-геохимическая оценка металлоносности углей Ирана // Вестник науки Сибири. – 2011. – № 1 (1). – С. 19–22. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/18/83> (дата обращения: 20.10.2012).
17. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals // Int. J. Coal Geol. – 2009. – V. 78. – P. 135–148.
18. Веселов В.В., Перфильев Ю.С., Чальян М.А., Сафронов Д.С., Тареева С.К., Ионкина Т.В. Твердые полезные ископаемые Ирана // Экономика минерального сырья и геологоразведочных работ. – М.: ВИЭМС, 1977. – 83 с.

Поступила 23.10.2012 г.

УДК 622.276.43

МЕТОД МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА КАК ПЕРВИЧНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗРАБОТКИ УЧАСТКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПРИ ЗАВОДНЕНИИ

Д.Г. Абидов*, М.Р. Камартинов

Томский политехнический университет

E-mail: kamartdinovmr@hw.tpu.ru

*Компания «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.», г. Южно-Сахалинск

E-mail: Denis.Abidov@sakhalinenergy.ru

Рассмотрена проблема применения материального баланса в задаче оценки эффективности заводнения участка месторождения. Предложено решение проблемы распределения объемов добытой и закачанной жидкости от общих граничных скважин между соседними участками (проблема оценки участия скважин). Метод основывается на переходе от постоянных геометрических коэффициентов участия скважин, корректных лишь в условиях симметричной картины распределения давления, к их переменным аналогам, что отражало бы реальную ситуацию, когда картина распределения давления меняется, что в свою очередь влияет на распределение дебитов скважин между участками.

Ключевые слова:

Уравнение материального баланса, открытый угол притока, геометрический коэффициент участия, приток из законтурной области.

Key words:

Material balance equation, angle open-to-flow, geometrical well allocation factor, water influx.

Уравнение материального баланса (МБ) – универсальный инструмент, позволяющий оценить запасы углеводородов, объемы воды, поступающей из законтурной области, и режимы разработки месторождения. Очевидное преимущество использования уравнения МБ по сравнению с процессом построения и адаптации гидродинамической модели месторождения – использование минимального набора исходной информации [1].

В классическом представлении теории МБ пласт рассматривается как изолированный поровый объем, который на любой момент времени можно охарактеризовать величиной среднего пластового давления. Применение уравнения МБ для участка месторождения рассматривалось несколькими авторами [2, 3]. Но рассматриваемый в [2, 3] подход основан на использовании постоянных геометрических коэффициентов участия скважин, корректных лишь в условиях симметричной картины распределения давления.

Целью данной работы является расширение традиционной концепции применения уравнения МБ для анализа эффективности процесса заводне-

ния на определенном участке (элементе или блоке) разработки. Основная проблема при анализе выбранного элемента разработки – распределение добываемого (закачиваемого) флюида для скважин, попадающих на границу выбранного элемента.

В качестве апробации предложенной методики в данной статье рассматривается одно из нефтяных месторождений Томской области, на котором сформирована система поддержания пластового давления – пластовое давление поддерживается выше давления насыщения. Следовательно, уравнение МБ принимает следующий вид:

$$N_p B_o + W_p B_w - W_i B_w = N(B_o - B_{oi}) + N \frac{B_{oi}}{1 - S_{wc}} (c_f + c_w S_{wc}) \Delta P + W_e, \quad (1)$$

где N_p – накопленная добыча нефти, м³; N – начальные геологические запасы нефти, м³; W_p – накопленная добыча воды, м³; W_i – накопленный объем закачанной воды, м³; B_{oi} , B_o – объемный коэффициент нефти при начальном (26 МПа) и при

текущем пластовом давлении, $\text{м}^3/\text{м}^3$; B_w – объемный коэффициент воды, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $S_{\text{ис}}$ – насыщенность связанной воды, д.е.; c_f – сжимаемость порового пространства, атм^{-1} ; c_w – сжимаемость воды, атм^{-1} ; $\Delta P = P_i - P$ – снижение давления, разница между начальным пластовым давлением и величиной среднего пластового давления на текущий момент, атм ; W_e – накопленный приток воды из законтурной области, м^3 .

Анализируемое месторождение имеет сложное геологическое строение. Нефтенасыщенными продуктивными интервалами являются пласты юрской группы $Ю_1^{11}$, $Ю_1^1$, $Ю_1^0$. Каждый из пластов имеет определенную протяженность и выдержанность по площади месторождения. Можно выделить три основных типа разреза, представленных: 1 – относительно тонким по мощности песчаным пластом; 2 – двумя пластами, разделенными глинистой перемычкой; 3 – сравнительно мощным песчаным пластом, в котором присутствуют тонкие непроницаемые пропластки. На месторождении сформирована трехрядная схема заводнения (с тремя рядами добывающих скважин и одним рядом нагнетательных), рис. 1. Месторождение разделено рядами нагнетательных скважин на 17 блоков.

Так как результат применения уравнения МБ сильно зависит от физико-химических свойств пластовых флюидов [4], то для анализа был выбран блок № 15 в той части месторождения, где скважины вскрывают только один пласт $Ю_1^0$, рис. 1. Это позволит избежать неопределенностей, связанных с оценкой физико-химических свойств пластовых флюидов, а также с оценкой средних значений фильтрационно-емкостных свойств пластов.

При анализе уравнения МБ основной исходной информацией являются данные по накопленной добыче жидкости и закачке воды. При попытке применить уравнение МБ на выбранном элементе разработки важно помнить, что не весь объем добываемого или закачиваемого скважинами флюида относится именно к выбранному блоку. Часть флюидов может поступать от соседних блоков. Таким образом, для использования уравнения МБ необходимо прежде всего распределить добычу и закачку по анализируемым элементам разработки.

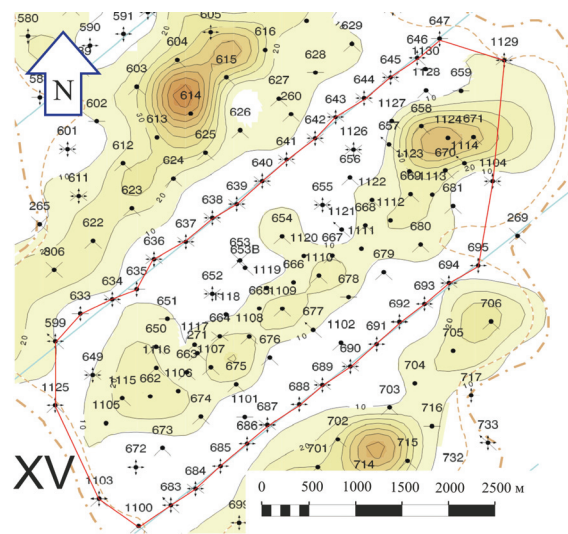


Рис. 1. Карта проводимости условного нефтяного месторождения

Корректное распределение добываемых и закачиваемых объемов жидкости сильно зависит от распределения давления вокруг скважин и фактически возможно только после построения полноценной гидродинамической модели месторождения [3]. В данной статье предлагается новый подход к оценке распределения добываемых и закачиваемых объемов жидкости, в котором правильность полученного распределения оценивается с помощью уравнения МБ.

Один из простейших подходов состоит в том, что объемы определяются пропорционально углам притоков в каждый элемент, имеющий общую скважину [5]. Два простейших примера иллюстрируют этот метод (рис. 2). Согласно рис. 2, а, угловые скважины нагнетают в выбранный элемент (ограниченный красной линией) только $120/360=1/3$ от общего объема закачки, тогда как для ситуации, представленной на рис. 2, б, доля закачиваемых в элемент объемов составляет $90/360=1/4$. Коэффициент, рассчитываемый на основе угла притока, называется геометрическим коэффициентом участия и обозначается как WAF (well allocation factor).

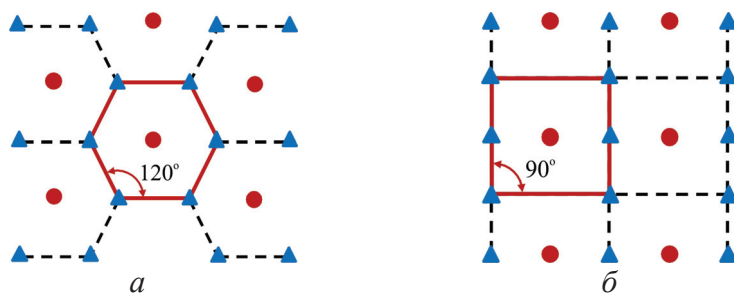


Рис. 2. Оценка распределения флюидов по блокам, основанная на углах притока. Схема размещения скважин: а) семиточечная; б) девятиточечная

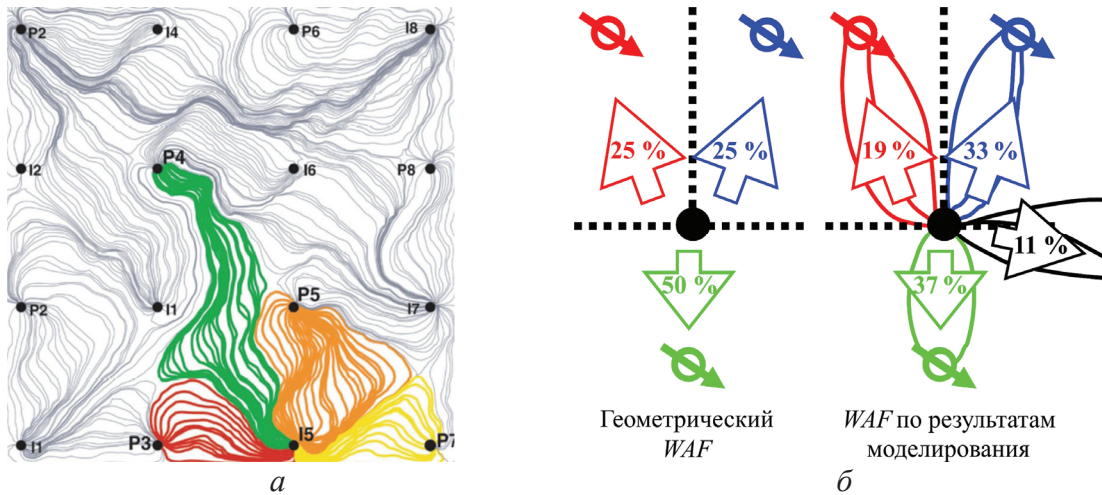


Рис. 3. Геометрический коэффициент участия (WAF) по результатам моделирования на основе модели линий тока

Данный подход, использующий угол притока для распределения объемов жидкости по блокам, подходит для геологически однородных пластов, с симметричными схемами расстановки скважин, работающих с одинаковыми дебитами при одинаковых забойных давлениях. Однако на практике такие условия практически никогда не выполняются, что приводит к нарушению симметрии и варьированию во времени величины WAF, что можно продемонстрировать на примере модели линий тока [6], рис. 3.

Таким образом, можно сделать вывод, что используемое определение величины WAF не подходит для решения поставленной задачи и необходимо использовать аналогичную переменную, являющуюся функцией времени.

Поскольку в ур. (1) величины N_p , W_p , W_i являются накопленными объемами, то они не могут быть использованы напрямую для анализа выбранного элемента разработки. Для того чтобы учесть распределение добычаемых и закачиваемых объемов по блокам, необходимо, чтобы объемы добычи и закачки были правильно распределены между элементами разработки:

$$N_p^* B_o + W_p^* B_w = N(B_o - B_{oi}) + N \frac{B_{oi}}{1 - S_{wc}} (c_f + c_w S_{wc}) + W_i^* B_w, \quad (2)$$

где N_p^* , W_p^* , W_i^* – соответствующие объемы с учетом распределения добычи и закачки по блокам.

Для каждой скважины на рис. 1 характерный геометрический коэффициент участия можно выразить с помощью выражения:

$$\alpha_{ok} = \frac{\theta_k}{360}. \quad (3)$$

Для учета изменения WAF со временем введем дополнительную переменную, зависящую от времени, таким образом, чтобы динамический WAF принял вид:

$$\alpha_k(t) = \alpha_{ok} + \tilde{\alpha}_k(t). \quad (4)$$

В ур. (4) α_{ok} – величина известная, согласно определению угла притока (рис. 1 и 2). Величину α_{ok} можно использовать как первое приближение при оценке $\alpha_k(t)$, а величина $\tilde{\alpha}_k(t)$ позволяет оценить более точное значение $\alpha_k(t)$ и его зависимость от времени. Следовательно, распределенные объемы добычи нефти будут рассчитываться согласно следующему выражению:

$$q_k^*(t) = \alpha_k(t) q_k(t).$$

Добыча и закачка воды рассчитывается аналогичным образом.

Таким образом, если анализируемый блок содержит N скважин (в нашем случае 15 блок содержит 94 скважины), то необходимо определить N неизвестных $\alpha_k(t)$ на каждый временной шаг. Но при этом мы можем использовать только одно уравнение – уравнение МБ. Очевидно, что необходимо сократить количество переменных, заменяя N коэффициентов $\alpha_k(t)$ одним общим коэффициентом $\alpha_B(t)$, который можно представить как среднее арифметическое всех $\alpha_k(t)$:

$$\alpha_B(t) = \frac{BOPM^*(t)}{BOPM(t)} = \frac{\sum_{k=1}^N \alpha_k(t) \cdot q_k(t) \Delta t}{\sum_{k=1}^N q_k(t) \Delta t}, \quad (5)$$

где $BOPM(t) = \sum_{k=1}^N q_k(t) \Delta t$ – месячная (если временной шаг анализа составляет 1 месяц) накопленная добыча нефти по анализируемому блоку без учета распределения объемов флюидов, а

$BOPM^*(t) = \sum_{k=1}^N \alpha_k(t) q_k(t) \Delta t$ – месячная накопленная добыча нефти по анализируемому блоку с учетом распределения объема. Аналогичным образом определяются месячная накопленная добыча и за-

качка воды $BWPM(t)$, $BWIM(t)$ и соответствующие коэффициенты распределения объемов добычи и закачки воды по блокам.

Совокупный коэффициент распределения объемов добычи и закачки для всего блока определяется аналогично коэффициенту $\alpha_k(t)$:

$$\alpha_B(t) = \alpha_{B0} + \tilde{\alpha}_B(t), \quad (6)$$

где $\alpha_{B0}(t)$ – геометрический коэффициент участия для всех скважин блока, введенный по аналогии с коэффициентом α_{0k} (3), который можно оценить из выражения (5), приравняв в ур. (4) $\tilde{\alpha}_k(t)$ нулю.

Коэффициент распределения накопленных объемов может быть определен как арифметическое среднее, согласно следующему выражению:

$$\beta_B(t) = \frac{N_p^*}{N_p} = \frac{\sum_0^t \alpha_B(t) BOPM(t)}{\sum_0^t BOPM(t)}. \quad (7)$$

Совокупный коэффициент распределения накопленных объемов для всего блока определяется как:

$$\beta_B(t) = \beta_{B0} + \tilde{\beta}_B(t).$$

Таким образом, количество неизвестных было сокращено до одной неизвестной величины $\alpha_B(t)$, определив которую, с помощью ур. (7) можно определить и $\beta_B(t)$.

На каждый временной шаг в ур. (2) используются следующие распределенные объемы добычи и закачки (индексы определяют «рo» – добыча нефти; «рw» – добыча воды; «iw» – нагнетание воды):

$$N_p^* = N_p \beta_{po},$$

$$W_i^* = W_i \beta_{iw},$$

$$W_p^* = W_p \beta_{pw}.$$

В общем случае, при анализе выбранного блока месторождения, величина накопленных объемов притока воды из законтурной области W_e также является неизвестной. Таким образом, в ур. (2) имеем 4 неизвестных величины на каждый временной шаг $\alpha_{B,po}(t)$, $\alpha_{B,pw}(t)$, $\alpha_{B,iw}(t)$, W_e . Допуская, что до и после распределения по блокам объемов добычи жидкости обводненность в скважинах не изменяется, $\alpha_{B,pw}(t) = \alpha_{B,po}(t)$. Таким образом, число неизвестных в ур. (2) сократилось до трех.

Величина W_e традиционно рассчитывается с помощью уравнения МБ, но для этого необходимо, чтобы были известны накопленные объемы добычи и закачки жидкости. Аналогичным подходом воспользуемся и в нашем случае. Предположим, что в течение некоторого периода X оценка распределения объемов добычи и закачки с помощью геометрического WAF дает достаточную точность. Следовательно, можно считать, что величины N_p^* , W_p^* , W_i^* известны. Используя различные модели расчета притока из законтурной области W_e , добиваемся равенства левой и правой части ур. (2) и по-

лучаем основные параметры и свойства законтурной области. Основная проблема в данном подходе – достоверное выделение периода X .

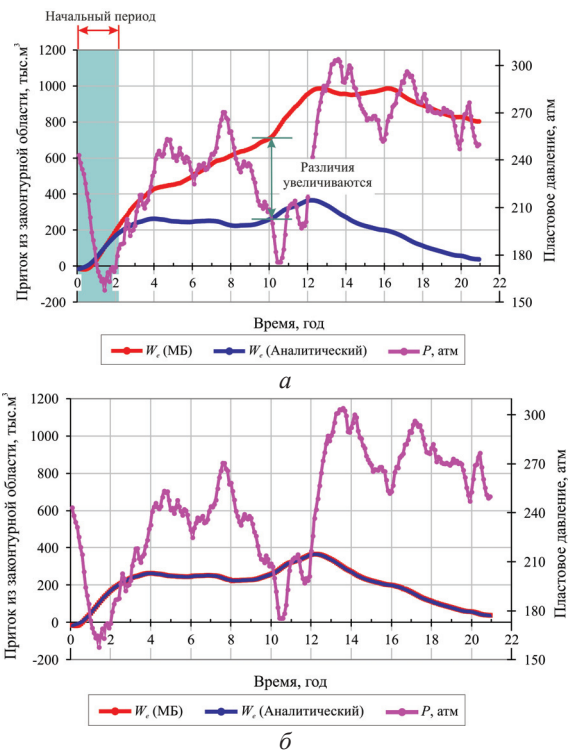


Рис. 4. Сравнение величины притока из законтурной области. Результаты расчета: а) исходные; б) после подбора коэффициентов $\alpha_{B,po}(t)$ и $\alpha_{B,iw}(t)$

Из анализа информации об истории разработки рассматриваемого месторождения известно, что ввод скважин в работу в выбранном блоке производился постепенно в направлении с северо-запада на юго-восток. Было сделано предположение, что наиболее достоверным периодом для определения параметров законтурной области являются первые два года разработки выбранного блока; во внимание были приняты следующие факторы:

1. Ввод новых скважин практически не изменяет первоначального распределения между блоками добываемых и закачиваемых объемов, так как каждая скважина дренирует ограниченную зону и интерференция между соседними скважинами практически отсутствует.
2. Если в этот период и существуют неучтенные объемы перетоков жидкости в пределах блока, то данные объемы должны в большей степени определяться притоком из законтурной области, так как количество пробуренных скважин сравнительно невелико.
3. Первоначально вводились скважины, расположенные в центральной части анализируемого блока, то есть предполагаем, что для данных скважин WAF равен 1 и не изменяется со временем.
4. Предполагаем, что начальный период добычи дает меньшую накопленную ошибку при ра-

спределении накопленных объемов добычи и закачки для выбранного блока.

- В этот период вводятся нагнетательные скважины на границах блока, что локально увеличивает водонасыщенность и препятствует перетокам нефти из смежных блоков.

Величина W_e рассчитывается по методу МБ (2) и с помощью аналитической модели притока из законтурной области. Параметры аналитической модели подбираются таким образом, чтобы результаты расчетов двумя методами согласовались в течение первых двух лет (предположение, что распределение объемов добычи и закачки вычисляется на основе геометрического коэффициента участия, который постоянен во времени в этот период). Как и предполагалось, на более поздних этапах различия увеличиваются (рис. 4, а) – это связано с тем, что коэффициент участия скважин меняется со временем.

Таким образом, получив параметры аналитической модели для расчета W_e , количество неизвестных в ур. (2) сократилось до двух: $\alpha_{B,po}(t)$ и $\alpha_{B,iw}(t)$. При этом предполагаем, что параметры для расчета притока из законтурной области являются истинными и не будут меняться со временем. Задача сводится к подбору таких значений $\alpha_{B,po}(t)$ и $\alpha_{B,iw}(t)$, чтобы минимизировать различия в расчете W_e по методу МБ и с помощью аналитической модели (рис. 4, а). Результат показан на рис. 4, б, разница в расчете W_e была устранена за счет распределения объемов добычи и закачки флюидов по блокам с помощью коэффициентов $\alpha_{B,po}(t)$ и $\alpha_{B,iw}(t)$.

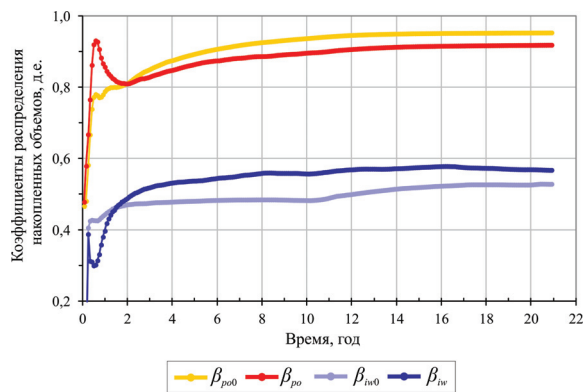


Рис. 5. Коэффициенты распределения накопленных объемов добычи нефти и закачки воды

Согласно полученным результатам подбора коэффициентов $\alpha_{B,po}(t)$ и $\alpha_{B,iw}(t)$, а следовательно и значений $\beta_{po}(t)$ и $\beta_{iw}(t)$ (рис. 5), выделим временные периоды:

- От 0 до 2 лет: $\beta_{po}(t) > \beta_{po0}(t)$, $\beta_{iw}(t) < \beta_{iw0}(t)$. Из анализируемого блока добывается больше нефти, чем это предполагалось на основе геометрического коэффициента участия, а воды закачивается меньше. Данный факт можно объяснить следующими факторами: соседний блок № 14 к

тому времени уже активно разрабатывается, и пластовое давление в нем ниже, чем давление в анализируемом блоке № 15. Таким образом, добыча нефти скважинами идет в основном за счет притока нефти в пределах блока с более высоким пластовым давлением (блок № 15), а закачка, наоборот, направляется в зону пониженного давления – в соседний блок № 14.

- От 2 до 10 лет: $\beta_{po}(t) < \beta_{po0}(t)$, $\beta_{iw}(t) > \beta_{iw0}(t)$. Из анализируемого блока добывается меньше нефти, чем это предполагалось на основе геометрического коэффициента участия, а воды закачивается больше. В этот период практически все скважины блока уже введены в эксплуатацию. Нефтенасыщенность в пределах блока существенно снизилась, что предполагает увеличение доли добываемой нефти, поступающей в добывающие скважины из-за пределов анализируемого блока. Снижение пластового давления в блоке является причиной того, что нагнетаемая вода остается в пределах анализируемого участка.
- От 10 лет: $\beta_{po}(t) \rightarrow \beta_{po0}(t)$, $\beta_{iw}(t) \rightarrow \beta_{iw0}(t)$. Добывающие скважины находятся внутри блока и не граничат с соседними участками, т. е. добыча определяется в основном притоком нефти в пределах блока. Коэффициент распределения объемов добычи нефти приближается к постоянному значению, соответствующему величине геометрического коэффициента участия (который близок к 1). Распределение закачиваемых в пласт объемов воды соответствует геометрическому коэффициенту участия, так как смежные блоки 14–16 характеризуются сравнительно одинаковыми пластовыми давлениями и закачка в блоки происходит пропорционально углу притока.

Получив распределение добываемого (закачиваемого) флюида для скважин анализируемого блока, можно применять классические методы оценки эффективности процесса заводнения, которые широко освещены в технической литературе.

Выводы

Предложен метод оценки коэффициентов участия скважин в добыче нефтепродуктов из блока месторождения, который позволяет оценить данные коэффициенты как функции времени и свести задачу к классическому материальному балансу для замкнутых систем. С помощью данного метода можно проводить оперативный анализ разработки месторождения по блокам, оценивать эффективность заводнения без применения сложных систем моделирования. Зависимость коэффициентов участия от времени рекомендуется использовать и при задании граничных условий при построении секторных гидродинамических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дейк Л.П. Практический инжиниринг резервуаров. – М.: Институт компьютерных исследований, 2008. – 668 с.
2. Уолкотт Д.С. Разработка и управление месторождениями при заводнении. – М.: Юкос, 2001. – 144 с.
3. Ehlig-Economides C.A. Applications for Multiphase Compartmentalized Material Balance // University of Tulsa: Centennial Petroleum Engineering Symposium. – Tulsa, 1994. – V. 1. – P. 429–441.
4. Baker R.O. Reservoir management for waterfloods. P. II // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 1998. – V. 37. – № 1. – P. 12–17.
5. Chapman L.R., Thomson R.R. Waterflood Surveillance in the Kuparuk River Unit with Computerized Pattern Analysis // Journal of Petroleum Technology. – 1989. – V. 41. – № 3. – P. 277–282.
6. Chugh S.H., Baker R.O. Revisiting reservoir flood-surveillance methods using streamlines // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2008. – V. 11. – № 2. – P. 387–394.

Поступила 17.04.2012 г.

УДК 551.762(571.1)

СХЕМА ИНДЕКСАЦИИ ПРОДУКТИВНЫХ ПЕСЧАНЫХ ПЛАСТОВ ЮРЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА ОСНОВЕ ИНВЕРСИОННОЙ МОДЕЛИ ЦИКЛОГЕНЕЗА

А.Л. Бейзель

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: beiselal@ipgg.nsc.ru

Разработана новая схема индексации песчаных продуктивных пластов, основанная на раздельном подходе к континентальным и морским разрезам. В аллювиальных циклах песчаные пласты базальные, а в морских – кровельные, регрессивные. Они не могут быть синхронными друг другу. В предлагаемой схеме вместо единой серии индексов вида $Ю_n$ представлены две колонки индексов: морские пласты обозначены буквой «м», а континентальные – «к», например: $Юм_1^1$ и $Юк_1^1$. Для пластов неопределенной фациальной принадлежности и для циклов в целом остается индекс вида $Ю_1^1$. Пласты типа $Ю_2^2$ рассматриваются как непосредственное продолжение континентальных базальных пластов главной фазы активизации речного стока. Самый нижний пласт васюганского горизонта в морских фациях будет иметь индекс $Юм_2^2$, а синхронный ему континентальный – $Юк_2^2$.

Ключевые слова:

Юра, Западная Сибирь, индексация пластов.

Key words:

Jurassic, Western Siberia, productivity layers indexing.

В нефтепромысловой геологии сложилась традиция индексировать продуктивные пласты, присваивая им цифровые и буквенные индексы. Это совершенно необходимая мера для работы с месторождениями на всех стадиях: от поисков и разведки до оценки запасов и промышленной эксплуатации. В настоящее время индексация приобрела роль инструмента стратификации разрезов практически в региональном масштабе. В некоторых случаях индексированные пласты превосходят по своей корреляционной значимости как литостратоны (свиты, пачки и т. д.), так и биостратиграфические подразделения.

Индексация представлена в региональных стратиграфических схемах, где пласты или их группы отмечены в характеристиках свит. Этим как бы подчеркивается их неопределенное стратиграфическое положение внутри литостратонов. Для юры Западной Сибири схемы индексации в наиболее общем виде представлены в работах [1, 2]. Сразу следует отметить, что они сделаны независимо от фациальной принадлежности отложений. Морские песчаные пласты оказались увязанными с континентальными и получили одинаковые ин-

дексы. Между тем, в разнофациальных отложениях не принято выделять даже единые свиты.

Многими исследователями было отмечено, что в терригенных отложениях в зависимости от обстановок осадконакопления (континентальной или морской) имеет место смена гранулометрического состава пород разной направленности. Для континентальных обстановок характерно уменьшение размерности обломочных зерен вверх по разрезу, в то время как для отложений морского генезиса преобладающей является обратная последовательность распределения обломочных зерен [3–8]. В Западной Сибири хорошо известна приуроченность проциклитов к континентальным отложениям нижней и средней юры, а рециклитов и асимметричных проречициклитов – к морским осадкам келловей и верхней юры [9–11]. Морские песчаные пласты являются регрессивными и формируются в конце цикла, а континентальные базальные пласты – в начале циклов. Они не могут быть синхронными друг другу. Если предположить, что циклогенез в разных фациальных областях идет независимо, то еще менее вероятно, что песчаные пласты в них будут совпадать между собой.

Необходимо отметить, что обзор существующих представлений о принципах построения и конкретных схемах индексации здесь не приводится. Предлагаемая схема не претендует на выработку какого-то универсального варианта индексации в части общего количества пластов и привязки их к конкретным горизонтам. Основная цель настоящей работы – внедрение дифференцированного подхода к континентальным и морским пластам.

Решение проблемы соответствия прогрессивных и регрессивных циклитов было предложено автором на примере стратиграфических горизонтов юры Западной Сибири [12]. Согласно инверсионной модели циклогенеза, циклы едины для всех фациальных областей. В качестве ведущего механизма циклогенеза принимаются эпизодические тектонические движения, омолаживающие рельеф одновременно на суше и в морских акваториях. В горных областях это, как правило, восходящие движения, а в смежных осадочных бассейнах – нисходящие. Они взаимно компенсируют друг друга. Далее в течение всего цикла происходит выравнивание искаженного рельефа экзогенными процессами. Положительные формы рельефа снижаются, а отрицательные повышаются, заполняясь осадками – и так до новой тектонической фазы. В континентальных фациальных областях разрезы представлены сериями от грубых осадков к тонким, представляющими собой «прямую» запись циклов преобразования рельефа. В морских условиях вследствие инверсии циклов в береговой барьерной зоне молодому рельефу отвечают тонкодисперсные осадки, а пенепленизированному – песчаные разности. В переходной зоне суша–море песчаные горизонты совершают диагональный переход из нижнего базального положения в верхнее регрессивное. Глинистые горизонты при этом оказываются «разорванными» – континентальные глинистые толщи с морскими никак не связаны.

Аналогичный подход предлагается в настоящей работе для индексированных пластов (рисунок). При этом возникает ряд особенностей, связанных с сочетанием циклов разного порядка по вертикали и в латеральном направлении. Прежде всего, процессы выравнивания рельефа происходят не равномерно, а нарушаются тектоническими колебаниями низшего порядка, порождающими соответствующие подчиненные циклы. Природа низших циклов отличается от «главного» цикла тем, что тектонические колебания могут представлять собой так называемые рибанды. Под последними в иностранной литературе понимаются изостатические поднятия (опускания) при снятии (возрастании) нагрузки. Понятно, что поднятия происходят в области эрозии и сноса, а синхронные им опускания – в осадочных бассейнах. Если взять в качестве примера васюганский горизонт, то главная тектоническая фаза произошла в его подошве и явилась «горизнтообразующим» событием, а все пласты, индексиремые от Ю₁¹ до Ю₁⁶ можно рас-

сматривать как проявления рибандов. Можно предполагать, что изостатические поднятия и опускания в разных тектонических структурах происходили неодновременно, поэтому общее количество их может быть разным, точная корреляция этих пластов затруднена и т. д. – все это мы видим на практике.

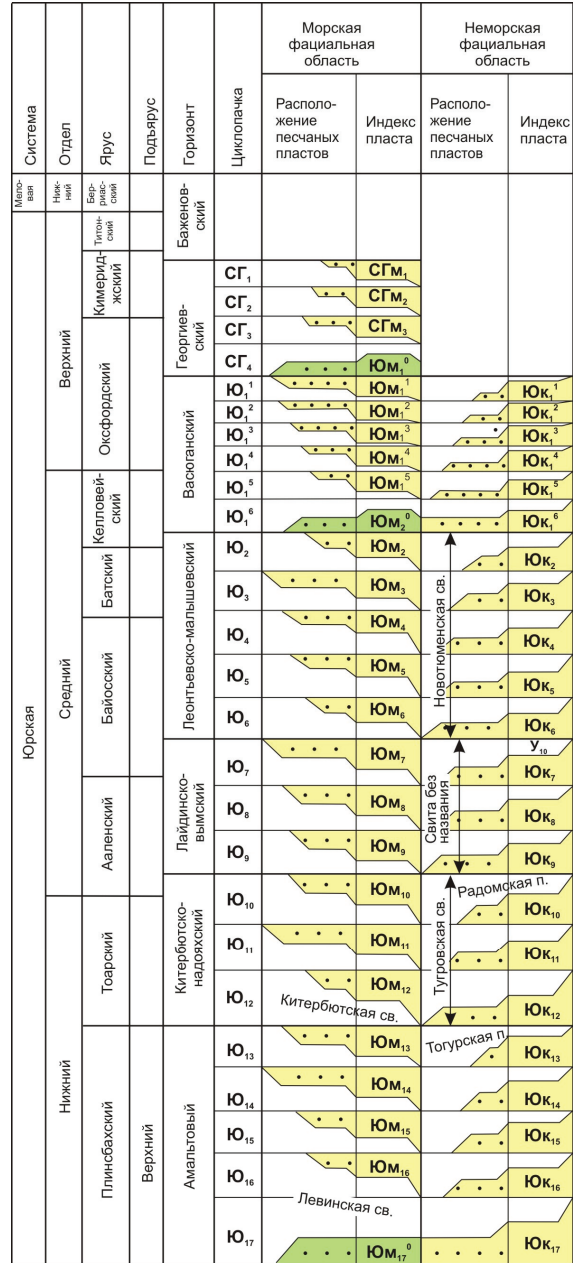


Рисунок. Индексация песчаных пластов юры Западной Сибири, основанная на инверсионной модели циклогенеза

В рамках принятой модели первичными следует считать континентальные проциклиты, показанные в правой части схемы. Они представляют собой «прямую» запись цикла преобразования рельефа. Самым крупным песчаным пластом является базальный, а последующие образуют «угасающий» ряд. Нечто противоположное происходит в мор-

ских рециклитах, образующихся в результате проградации береговых фаций. Здесь роль базального пласта играет глинистая толща, а затем возникают песчаные тела. В типовом случае самым крупным и развитым является верхний пласт, а нижележащие образуют «угасающий» ряд в направлении сверху вниз. Получается своего рода зеркальное отражение континентальной последовательности.

Авторская индексация отражает принятые допущения. Континентальным (аллювиальным) пластам присваивается индекс Ю_{к_n}, а морским – Ю_{м_n}, с соответствующим номером. Пласты неопределенной фациальной принадлежности предлагается индексировать как обычно – Ю_n. Так же индексируются и циклиты в целом. Рисовка пластов в приведенной схеме в стилизованном виде отражает поведение пластов. Аллювиальные базальные пласты омолаживаются в направлении источника сноса, а морские регрессивные – в сторону бассейна.

В некоторых случаях дифференцированный подход создает трудности в индексации, поскольку пласты всегда нумеруются сверху вниз. Такая нумерация благоприятна для морских рециклитов, поскольку в них наиболее выраженный пласт залегает, как правило, в кровле. В индексации пластов горизонта Ю₁ существует закономерность: наиболее отчетливо и более-менее стабильно выделяются первые четыре пласта (от Ю₁¹ до Ю₁⁴), пятый и шестой встречаются довольно часто, но общее их количество определить трудно. Иногда встречаются варианты выделения пластов до Ю₁⁸.

Для индексации континентальных пластов в прогрессивном циклите нужно точно знать, сколько частных пластов мы выделяем в горизонте Ю₁. Самым крупным и выдержанным пластом здесь будет последний по своему номеру. В предлагаемой схеме выделено 6 пластов, однако это может быть предметом обсуждения. Для нижележащих горизонтов юры эта проблема не столь актуальна, поскольку там пластам присвоены однозначные индексы.

Итак, континентальный базальный пласт горизонта Ю₁ должен индексироваться как Ю_{к₁}⁶. Здесь, однако, мы сталкиваемся с другой проблемой, связанной с установившейся традицией выделения пластов типа Ю₂⁰. В рамках инверсионной модели циклогенеза они получают новую интерпретацию как являющиеся непосредственным латеральным продолжением базальных континентальных пластов в морских бассейнах. Они являются базальными пластами новых циклов, но в то же время не являются трансгрессивными, поскольку во время формирования этих пластов не происходило наступление моря на сушу [13]. В начале цикла речной сток был наиболее интенсивен, и в бассейн выносились наиболее крупномерные обломки. Они преодолевали береговой барьер и попадали во внутренние области морской седиментации. Кроме того, в начальной стадии в море выносились продукты кор выветривания, сформировавшиеся в конце предшествующих циклов. С речным

стоком выносилось большое количество озерных и болотных вод, обогащенных железом и другими элементами. При смешивании с морскими водами происходила коагуляция растворов с формированием железистых оолитов, различных аутигенных минералов типа глауконита и пр. Все это и выразилось в формировании особых базальных пластов типа Ю₂⁰. В схеме индексации они показаны зеленым цветом.

Всего таких пластов показано три: первый в основании юры (Ю_{м₁₇}⁰, зимняя свита – это наиболее крупный пласт такого типа, который заслуживает отдельного рассмотрения), второй – в основании васюганского горизонта (Ю₂⁰, пахомовская пачка) и третий – в основании георгиевского горизонта (Ю₁⁰, барабинская пачка). Для последнего не показаны континентальные аналоги, поскольку такие фации практически неизвестны для всего георгиевского горизонта. Примером континентального базального пласта Ю_{к₂}⁰ в основании наунакской свиты, по мнению автора, может служить мощный пласт песчаника, отмеченный в стратотипе наунакской свиты по разрезу скв. 2 Усть-Сильгинской площади, инт. 2365...2368 м [14].

Можно предполагать существование пластов типа Ю₂⁰ в основании леонтьевского горизонта (с индексом Ю_{к₇}⁰), а в двух других горизонтах – лайдинском и китербютском – они вряд ли будут найдены. Отсутствие такого пласта в основании баженовского горизонта можно считать установленным. Это отражает специфику палеогеографических условий соответствующих эпох. Лайдинский горизонт наиболее слабо выражен среди других юрских глинистых горизонтов, и тектоническое событие в его основании было недостаточно интенсивным для формирования выраженного базального слоя. В китербютском и баженовском горизонтах ситуация иная. Они отражают крупнейшие события, прослеживающиеся в межрегиональном и субглобальном масштабе. По мнению автора, Западно-сибирский бассейн в эти эпохи после структурной перестройки рельефа земной поверхности оказывался в зоне так называемой «дождевой тени». Поэтому интенсификация сноса осадков в начальной стадии циклов не происходила.

Общее количество пластов в юрском комплексе Западной Сибири невозможно определить каким-то «объективным» способом. Анализ существующих схем показывает, что определенная согласованность между различными исследователями соблюдается в интервале от баженовского горизонта до подошвы тоара (от Ю₀ до Ю₁₀₋₁₂), а в нижележащем интервале расхождения увеличиваются. В представленном варианте индексации нижнеюрских пластов автор использовал морские разрезы арктических районов, поэтому их количество оказалось меньше, чем в схемах, основанных на континентальных разрезах – например, по юго-востоку Западной Сибири.

В схеме на рисунке показано также распространение некоторых наиболее характерных свит, что-

бы подчеркнуть особенности их стратиграфического положения и соотношения со смежными стратонами. Отметим некоторые из таких особенностей. Зимняя, левинская и шараповская свиты объединяются в единый комплекс, относящийся к верхнему плинсбахскому подъярусу. Именно с этого уровня начинается интенсивное формирование юрско-мелового и кайнозойского чехла в Западной Сибири. Левинская свита — единственная глинистая толща с обеими «скользящими» границами. Кровля тогурской свиты соответствует подошве китербютской, аналогично соотносятся радомская пачка и лайдинская свита. Вместо тюменской сви-

ты предлагается выделять новотюменскую в объеме леонтьевского и малышевского горизонтов, т. е. средней и верхней подсвит тюменской свиты. Интервал нижней подсвиты рассматривается как самостоятельный цикл, отвечающий лайдинско-вымскому комплексу. В его кровле залегает угольный пласт U_{10} .

Предлагаемая схема имеет определенное значение для регионального прогнозирования расположения ловушек нефти и газа. Наиболее перспективными объектами поиска залежей углеводородов в терригенных отложениях являются морские песчаные пласты, показанные в левой части схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шурыгин Б.Н., Никитенко Б.Л., Девятков В.П., Ильина В.И., Меледина С.В., Гайдебурова Е.А., Дзюба О.С., Казаков А.М., Могучева Н.К. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Юрская система. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. — 480 с.
2. Решение 6-го Межведомственного стратиграфического совещания по рассмотрению и принятию уточненных стратиграфических схем мезозойских отложений Западной Сибири, Новосибирск, 2003 г. / Ф.Г. Гурари (глав. ред.). — Новосибирск: СНИИГиМС, 2004. — 114 с. — Прил. 3.
3. Шанцер Е.В. Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит // Труды ин-та геол. наук АН СССР. Геол. серия. — 1951. — Вып. 134. — 274 с.
4. Жемчужников Ю.А. Общая геология ископаемых углей, 2-е изд. — М.: Госгеолгиздат, 1948. — 200 с.
5. Shepard P.E. Criteria in modern sediments useful in recognizing ancient sedimentary environments / In: Deltaic and shallow marine sediments (Ed. L.M.J.U. Van Straaten). — Amsterdam: Elsevier, 1964. — P. 1–25.
6. Ботвинкина Л.Н. Слоистость осадочных пород. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 542 с.
7. Муромцев В.С. Электрометрическая геология песчаных тел — литологических ловушек нефти и газа. — Л.: Недра, 1984. — 260 с.
8. Visher G.S. Use of vertical profile in environmental reconstruction // Bull. AAPG. — 1965. — V. 49. — № 1. — P. 41–61.
9. Карогодин Ю.Н., Гайдебурова Е.А. Системные исследования слоевых ассоциаций нефтегазоносных бассейнов. — Новосибирск: Наука, 1985. — 112 с.
10. Ежова А.В. Историко-геологический анализ особенностей формирования продуктивной толщи юго-востока Западно-Сибирской плиты // Нефтегазовому образованию 50 лет: Труды Междунар. конф., посвящ. 50-летию кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений (горючих ископаемых и нефти). — Томск: ТПУ, 2002. — С. 8–26.
11. Шемин Г.Г., Нехаев А.Ю. Характеристика фильтрационно-емкостных свойств и закономерности их изменения в зависимости от глубины залегания нефтегазоносных резервуаров юры севера Западно-Сибирской НПП // Горные ведомости. — 2005. — № 12 (5). — С. 12–23.
12. Бейзель А.Л. Предложения по уточнению и совершенствованию региональных стратиграфических схем юры Сибири // Материалы науч. сессии (18–22 апреля 2011): 2 т. / под ред. Б.Н. Шурыгина, Н.К. Лебедевой, А.А. Горячевой / Т. I. Мезозой; Рос. Акад. Наук, Сибирское отд-ние, Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. — Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. — С. 31–34.
13. Бейзель А.Л. Модель формирования пластов типа Ю⁹ в рамках концепции географического цикла // ГЕО-СИБИРЬ-2010. Т. 2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Ч. 1: Сб. матер. VI Междунар. науч. конгресса «ГЕО-Сибирь-2010». — Новосибирск, 9–19 апреля 2010. — Новосибирск: СГГА, 2010. — С. 131–134.
14. Чернова О.С. Системно-литологическое расчленение и корреляция васюганской свиты Усть-Тымской впадины / Актуальные проблемы нефтегазоносных бассейнов. — Новосибирск: Изд-во НГУ, 2003. — С. 90–98.

Поступила 11.05.2012 г.

УДК 551.762 (571.1+420)

О ВОЗМОЖНОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ АНАЛОГОВ ВАСЮГАНСКОГО, ГЕОРГИЕВСКОГО И ЧАСТИЧНО БАЖЕНОВСКОГО ГОРИЗОНТОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В СТРАТОТИПИЧЕСКИХ РАЗРЕЗАХ КЕЛЛОВЕЙСКОГО, ОКСФОРДСКОГО И КИМЕРИДЖСКОГО ЯРУСОВ ЮЖНОЙ АНГЛИИ

А.Л. Бейзель, А.С. Алифирова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: beiselal@ipgg.nsc.ru; alifirovas@ipgg.nsc.ru

Стратиграфические горизонты юры Западной Сибири, рассмотренные под определенным углом зрения, представляют собой седиментационные циклы высокого порядка, границы которых обладают высоким корреляционным потенциалом. Они прослеживаются далеко за пределами региона – в Восточной Сибири, Печорском бассейне, на Баренцевоморском шельфе, Восточно-Европейской платформе, Северном Кавказе и т. д. Особый интерес представляет возможность прослеживания сибирских горизонтов в стратотипических разрезах соответствующих ярусов в Западной Европе. Такая корреляция с использованием детальных аммонитовых шкал показана на примере васюганского, георгиевского и частично баженовского горизонтов.

Ключевые слова:

Средняя и верхняя юра, Западная Сибирь, Южная Англия.

Key words:

Middle and Upper Jurassic, Western Siberia, Southern England.

Попытки межрегионального прослеживания местных литостратиграфических подразделений и разделяющих их поверхностей несогласий делаются постоянно и с разным успехом. Литостратиграфическая схема мезокайнозоя Западной Сибири считается одной из самых обоснованных, поскольку в нашем регионе пробурены сотни тысяч скважин и пройдены сотни тысяч километров сейсмопрофилей. Юрские – и в особенности нижнесреднеюрские – горизонты, основанные на морских разрезах Усть-Енисейского района, прослежены в последние годы в Восточной Сибири [1, 2], а также на запад от Урала – в Печорском бассейне и на Баренцевоморском шельфе [3]. Их «следы» отмечаются на Туранской плите и Северном Кавказе [4] и, вероятно, во многих других местах. Однако возможность выделения аналогов сибирских литостратонов в европейских стратотипических разрезах ярусов имеет особое значение.

Несовпадение местных литостратонов с ярусами – обычное дело, поскольку они выделяются на принципиально различной основе. Примером может служить келловейский ярус, отнесенный к средней юре по биостратиграфическим данным, тогда как по своим литофациальным признакам он объединяется с верхней юрой. Как это ни парадоксально, данная особенность проявляется не только в Западной Сибири, но и в стратотипической местности келловея и оксфорда – в Южной Англии. При ближайшем рассмотрении английские литостратоны в интервале келловей – верхняя юра проявляют признаки сходства с сибирскими, вне связи с ярусами. Эти аспекты являются предметом исследования настоящей работы.

Постановка отмеченной задачи имеет свою историю. Она началась с детального анализа различных вариантов секвентных стратиграфических шкал Eххон, получивших широкую известность в мировой литературе [5, 6], в плане возможного

применения их к нашим разрезам. При близком знакомстве с ними выяснилось, что эти шкалы в значительной мере представляют собой ноу-хау. Какие конкретно разрезы положены в основу тех или иных сиквенсов и каким образом в шкалу внедрены биостратиграфические данные – в опубликованных работах не раскрывается. Хотя в целом отмечается, что в шкале были использованы стратотипические разрезы ярусов, большинство из которых расположены в Западной Европе [6]. С ними мы и решили сравнить наши разрезы, чтобы получить представление о природе осадочных циклов, лежащих в основе сиквенс-стратиграфической шкалы. С другой стороны, стратотипы ярусов – объект и сам по себе интересный. Поскольку ярусы выделяются исключительно на биостратиграфической основе, то сравнение со стратотипами производится обычно по биоте, а структура этих разрезов остается без внимания. Необходимо восполнить этот пробел. В итоге мы выбрали такие звенья для сравнительного анализа: (1) шкала Eххон-1988 как основа (с уточнениями по современному данным по аммонитам); (2) английские стратотипы бата, келловея, оксфорда, кимериджа и портланда; (3) западносибирская региональная стратиграфическая схема 2004 г. [7] (рис. 1). На первом этапе для сравнительного анализа вместо Западной Сибири привлекались разрезы Московской синеклизы.

Здесь рассматривается интервал верхнего бата, келловея и верхней юры как наиболее охарактеризованный аммонитами. Корреляция основана целиком на аммонитовых зональных шкалах. Совпадение или несовпадение границ литостратонов и системных трактов рассматривается как следствие полученных корреляций.

Результаты сравнительного анализа с учетом разрезов Московской синеклизы и без привлечения данных по Западной Сибири опубликованы

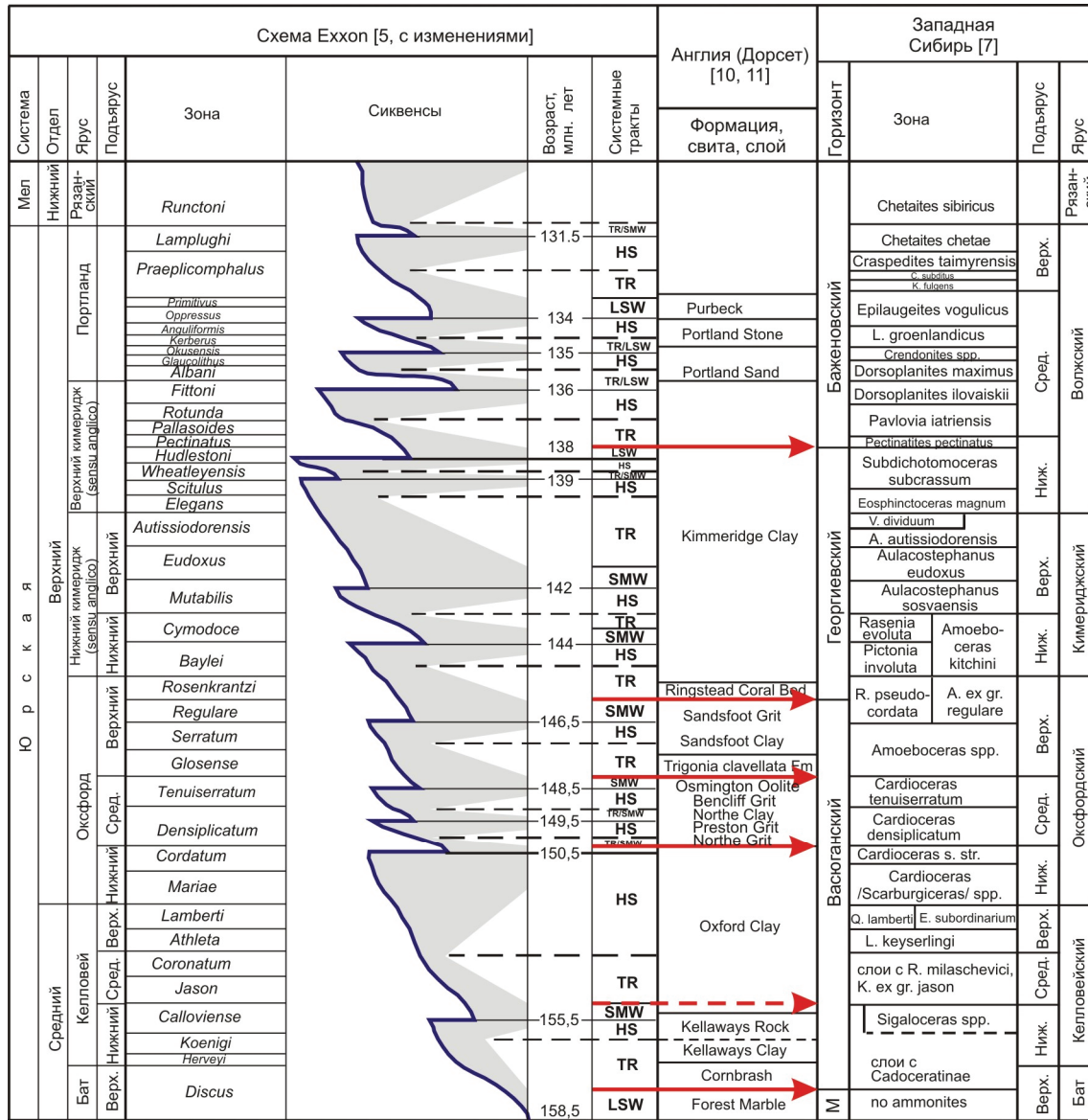


Рис. 1. Единые событийные уровни в келловее и верхней юре Северо-Западной Европы и Западной Сибири

[8]. Было отмечено весьма характерное обстоятельство: ни одна из многочисленных поверхностей несогласий подмосковного келловее и верхней юры не совпадает с границами сиквенсов, но в то же время они хорошо совпадают с подошвами трансгрессивных системных трактов шкалы Еххон. Кроме того, основные поверхности несогласий совпадают также с границами формаций английской юры. Эти положения стали ключевыми для дальнейших построений.

Интеграция полученной корреляционной схемы с западносибирскими разрезами встречает определенные трудности. Литостратиграфия у нас разработана и обоснована на сопоставимом уровне с Англией, а биостратиграфия заметно отстает по понятным причинам. Поэтому сравнение проводится пока только на уровне наиболее крупных подразделений – стратиграфических горизонтов или подгоризонтов. Хотя в литературе имеются

примеры и более детального сравнения тех же схем, проведенного в ходе построения кривых эвстатических колебаний уровня моря [9].

Вывод о возможности выделения сибирских горизонтов в стратотипических разрезах ярусов не следует понимать буквально. Прежде всего, в англоязычной литературе нет понятия стратиграфического горизонта в том смысле, как оно применяется в России. Там принята стратиграфическая «триада» – био-, лито- и хроностратиграфия. В связи с этим литостратиграфические подразделения (формации, группы и т. д.) не имеют хроностратиграфического значения, поскольку их границы рассматриваются как «скользящие». Хроностратиграфический статус имеет целый ряд категорий (абсолютные датировки, разного рода событийные уровни и пр.), среди которых можно отметить сиквенсы и системные тракты в составе секвентных шкал. В общем, на данном этапе коррели-

руемыми объектами в английских разрезах могут быть крупные литостратоны и ограничивающие их поверхности несогласий. Последние показаны на рис. 1 стрелками.

Английская юра изучена и отражена в литературе детальнейшим образом. Основы литостратиграфии сложились там еще в 30-х гг. прошлого века. Стратотипы келловейского, оксфордского и киммериджского ярусов расположены в Южной Англии, в графстве Дорсет. В последние десятилетия здесь совершенствуется зональная аммонитовая шкала. Авторы пользовались основополагающими работами [10, 11 и др.], а также многочисленными источниками в Интернете, где сейчас можно получить исчерпывающее представление о том, как выглядят и как устроены классические английские разрезы.

В Южной Англии в интервале бата, келловей и верхней юры выделяются следующие основные формации и группы: Great Oolite Group (бат), Kellaways Fm. (нижний келловей), Oxford Clay Fm. (средний келловей – нижний оксфорд), Corallian Group (средний-верхний оксфорд), Kimmeridge Clay Fm. (верхи оксфорда, киммеридж и болонский ярус) и Portland Fm. (портландский регионарус). Бат и нижний келловей характеризуются карбонатным и карбонатно-терригенным осадконакоплением, а вышележащий интервал представлен преобладающими терригенными фациями. При этом формации Oxford Clay и Kimmeridge Clay, как следует из их названия, представлены глинистыми толщами, а Corallian Beds и частично портланд имеют существенно песчаный состав. Получается чередование глинистых и песчаных толщ, что и составляет основу литостратиграфического расчленения.

Формации Cornbrash и Kellaways верхов бата – нижнего келловей образуют трансгрессивную серию. Формация Oxford Clay вместе с группой Corallian Beds по своему преобладающему литологическому составу, стратиграфическому положению и объему удивительно напоминают васюганскую свиту Западной Сибири (рис. 2). Из всех сравниваемых объектов эта пара имеет наибольшее сходство. Нижневасюганские глины идентичны формации Oxford Clay, а существенно песчаная верхневасюганская подсвита – это полный аналог коралловых слюев, также состоящих из глинисто-песчаных циклитов (парасиквенсов). Полнота аналогии нарушается только расхождениями в датировке подошвы глинистой толщи: оксфордские глины начинаются со среднего келловей, а нижневасюганские – с верхов батского яруса. На самом деле это противоречие можно преодолеть, если применить единый подход к интерпретации истории формирования разрезов. Отложения верхнего бата и нижнего келловей в обоих сравниваемых регионах образуют трансгрессивную серию, которая в Западной Сибири отнесена к васюганскому горизонту (т. е. помещена в начало осадочного цикла соответствующего порядка), а в Англии – к группе Great Oolite. Последнее сделано исключительно на основании сходства литологического состава, безотносительно циклов.

В Сибири имеется много данных в пользу того, чтобы нижневасюганские глины также начинать со среднего келловей. С точки зрения инверсионной модели циклогенеза формирование тектоно-седиментационного комплекса не может начинаться с трансгрессии, а должно начинаться с регрессии, поскольку после тектонической фазы омоложения рельефа в береговой зоне сразу устанавливается положительный баланс осадков [12]. Поэтому верхне-бат-нижнекелловейскую трансгрессивную серию надо отнести к малышевскому горизонту, а васюганский горизонт начинать со среднего келловей, как это было сделано в ранних схемах [13]. Подошва среднего келловей – это хороший событийный рубеж, прослеживаемый практически повсеместно в бореальном поясе. Он был обусловлен тектоническим эпизодом перестройки структурного плана земной поверхности – углублением впадин и поднятиями в областях сноса, сопровождавшимися трансгрессиями и регрессиями.

Граница коралловых слюев и формации Kimmeridge Clay практически совпадает с границей васюганского и георгиевского горизонтов. При этом в английских разрезах есть стратон, называемый Ringstead Coral Bed, который по многим параметрам отвечает нашей барабинской пачке. Однако, как видно из названия, он объединяется скорее с нижележащей формацией, чем с киммериджскими глинами.

Формация Kimmeridge Clay в нижней части образует трансгрессивную серию, составленную угасающими рециклитами и завершающуюся появлением высокоуглеродистых сланцев (black shales). Последние появляются практически на том же зональном уровне, с которого у нас начинается баженовская свита. Далее начинается регрессивная серия, переходящая в формацию Portland и завершающаяся лагунными и другими неморскими фациями юрско-меловой формации Purbeck.

Рассмотрим кратко вопрос о том, почему синхронные поверхности, показанные на рисунке стрелками, совпадают именно с подошвами трансгрессивных системных трактов, а не с чем-то другим, в первую очередь не с границами сиквенсов. В основе сиквенс-стратиграфической концепции лежат представления о синусоидальных колебаниях уровня моря [18 и др.]. Это заставляет исследователей выделять по две границы на цикл – одну на ветви падения уровня и другую на ветви подъема. Первая из них – это граница сиквенсов, а вторая – трансгрессивная поверхность (подошва TP-трактов), mfs, иногда mrgs, граница генетических сиквенсов В. Галлова [19] и т. д. При этом границы сиквенсов хорошо выделяются на периферии осадочных бассейнов, а в морских разрезах им отвечают согласные границы; трансгрессивные же поверхности ведут себя наоборот – хорошо проявлены в морских фациях и не видны в крайних частях. Рассматриваемый в настоящей работе интервал по определению морской, поэтому здесь границы циклов интерпретируются как трансгрессивные поверхности, а границы сиквенсов не вы-

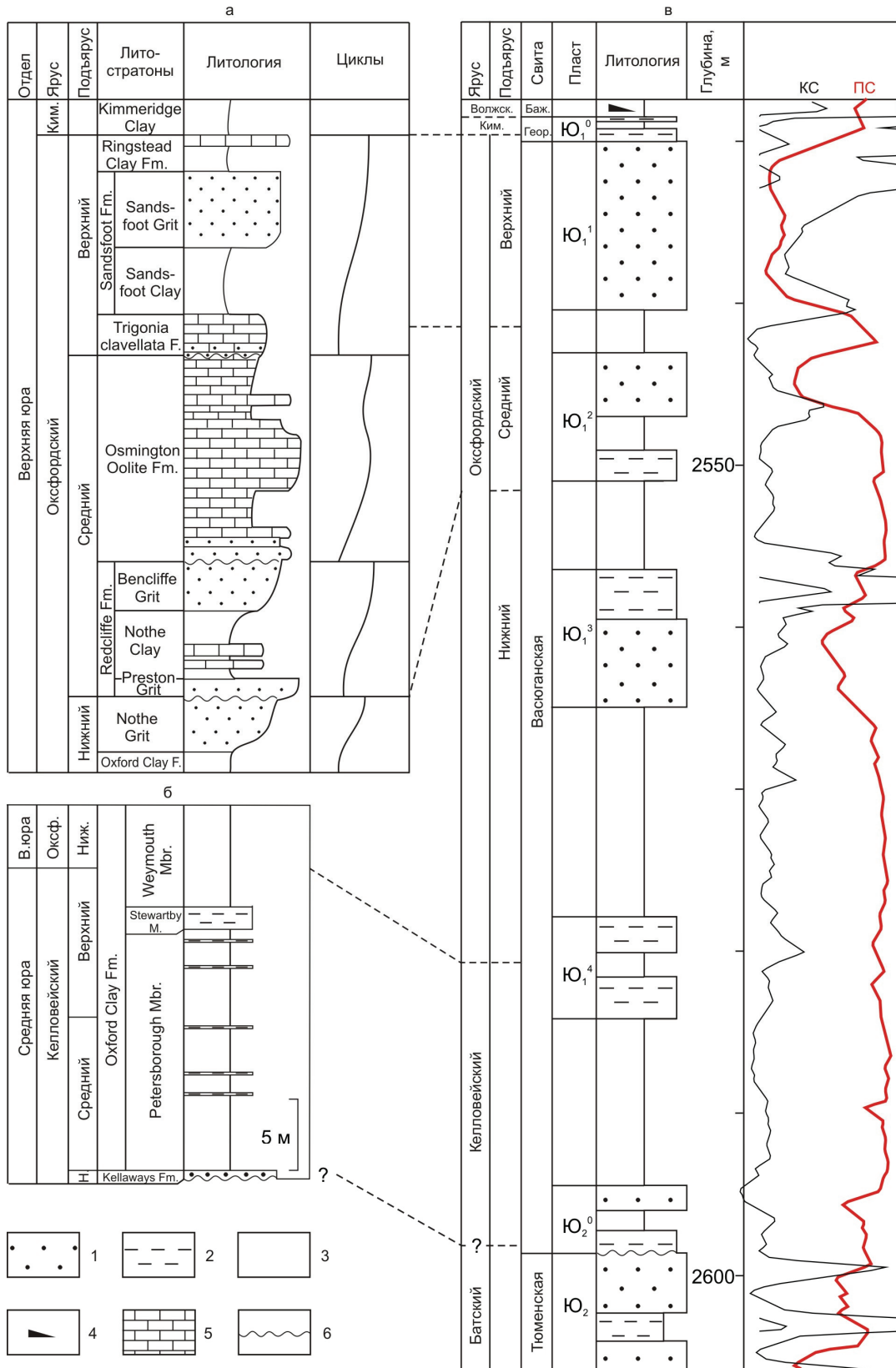


Рис. 2. Сходство строения разрезов келловей-оксфорда в стратотипической местности и в Западной Сибири: а) разрез оксфордского яруса (по [14], циклы – по [15]); б) разрез келловейского и низов оксфордского ярусов в Osmington Mills, Южная Англия, Дорсет [16]; в) разрез васюганской свиты в скв. 268 Первомайской площади, юго-восток Западной Сибири [17]. 1 – песчанники, 2 – алевролиты, 3 – глины, 4 – высокоуглеродистые аргиллиты, 5 – известняки, 6 – поверхности несогласий

деляются. Кроме того, в сиквенс-стратиграфии выделение системных трактов и вся их номенклатура также основаны на колебаниях уровня моря. Выделяются тракты высокого стояния, низкого стояния, трансгрессивные, регрессивные и пр.

Инверсионная модель выделяет только одну границу на цикл, отвечающую быстрой фазе тектонического омоложения рельефа. Поэтому принимается, что граница сиквенсов и подошва трансгрессивных трактов — это одна и та же поверхность. Следовательно, в приведенной схеме несогласия подмосковной юры границы основных литостратонов Южной Англии и Западной Сибири совпадают с границами крупных тектоно-седиментационных циклов. Впрочем, тема соотношения инверсионной модели с сиквенс-стратиграфией планируется как предмет специальной работы.

Имеется еще один аспект анализа межрегионального распространения тектоно-седиментационных комплексов. Если смена режимов седиментации обусловлена тектоническими событиями, то каждый из них связан с определенным эпицентром. По мере удаления от него контрастность выражения события в осадочных разрезах убывает. Поэтому в конкретных регионах иерархия одних

и тех же циклов будет заметно отличаться. События, ярко выраженные в одних бассейнах, будут слабее проявлены в соседних и почти не видны в удаленных бассейнах. Это одно из важных отличий инверсионной модели от построений, основанных на глобальной эвстазии. В этом плане геологическая летопись явно свидетельствует в пользу инверсионной модели циклогенеза. Иерархия циклитов в Западной Сибири, на Русской платформе, в Южной Англии и в схеме Еххон — везде разная. Тем не менее, основные событийные границы удается проследить.

Таким образом, стратотипические разрезы келловеев — верхней юры Англии и соответствующих региональных горизонтов Западной Сибири, кроме фаунистического сходства, позволяющего проводить их детальную корреляцию, обнаруживают сходство циклической структуры разрезов. Это свидетельствует об общем геосторическом контексте развития бассейнов.

Работа выполнена при финансовой поддержке по программам Президиума РАН «Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология» (№ 23), «Проблемы происхождения жизни и становления биосферы» (№ 28) и гранта РФФИ № 12–05–00453.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриненко В.С., Князев В.Г., Девятков В.П., Никитенко Б.Л., Шурыгин Б.Н. Новая региональная стратиграфическая схема верхнетриасовых — юрских отложений востока Сибирской платформы и складчатого обрамления // Палеонтология, стратиграфия и палеогеография мезозоя и кайнозоя бореальных районов: Материалы науч. сессии. — Новосибирск: ИНГТ СО РАН, 2011. — С. 65–70.
2. Гриненко В.С., Князев В.Г., Девятков В.П., Никитенко Б.Л., Шурыгин Б.Н. Этапы формирования и палеогеография лаптевского подкомплекса Восточно-Сибирского осадочного бассейна (поздний триас — юра) // Вестник Госкомгеологии. Материалы по геологии и полезным ископаемым Республики Саха (Якутия). — 2011. — № 1 (10). — С. 63–70.
3. Никитенко Б.Л. Стратиграфия, палеобиогеография и биофауна юры Сибири по микрофауне (фораминиферы и остракоды). — Новосибирск: Параллель, 2009. — 680 с.
4. Бейзель А.Л. Сравнительная геостратиграфия Западной и Восточной Сибири, Туранской плиты и Северного Кавказа // III Стратиграфическое совещание «Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии». — Саратов: Наука, 2009. — С. 16–18.
5. Haq В.У., Hardenbol J., Vail P.R. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change / С.К. Wilgus et al. (eds.): Sea-level changes: An integrated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Spec. Publ. № 42. — Tulsa, 1988. — P. 71–108.
6. Hardenbol J., Thierry J., Farley M., Jacquin T., de Graciansky P.C., Vail P. Mesozoic and Cenozoic sequence stratigraphy of European basins // Spec. Publ. SEPM. № 60. — Tulsa, 1998. — P. 3–13, 763–781.
7. Решение VI Межведомственного стратиграфического совещания по рассмотрению и принятию уточненных стратиграфических схем мезозойских отложений Западной Сибири, Новосибирск, 2003 / глав. ред. Ф.Г. Гурари. — Новосибирск: СНИИГГиМС, 2004. — 114 с. — Прил. 3.
8. Бейзель А.Л., Алифиров А.С. Совпадения событийных уровней в келловее и верхней юре Московской синеклизы и секвентной шкале Еххон // IV Стратиграфическое совещание «Юрская система России: Проблемы стратиграфии и палеогеографии». — СПб.: ООО «Издательство ЛЕМА», 2011. — С. 34–36.
9. Шурыгин Б.Н., Пинус О.В., Никитенко Б.Л. Сиквенс-стратиграфическая интерпретация келловеев и верхней юры (васюганский горизонт) юго-востока Западной Сибири // Геология и геофизика. — 1999. — Т. 40. — № 6. — С. 843–862.
10. Callomon J.H., Cope J.C.W. The Jurassic geology of Dorset / In Taylor P.D. (eds.): Field Geology of the British Jurassic. — L.: Geological Society, 1995. — P. 51–103.
11. Callomon J.H. The Kelloway Beds and the Oxford Clay / In: P.C. Sylvester-Bradley and T.D. Ford (eds.): Geology of the East Midlands. — Leicester: Leicester University Press, 1968. — P. 264–290.
12. Бейзель А.Л. Модель формирования нефтегазового резервуара на основе концепции географического цикла // Известия Томского политехнического университета. — 2010. — Т. 316. — № 1. — С. 52–57.
13. Стратиграфия юрской и меловой систем Севера СССР. — М.: Наука, 1976. — 436 с.
14. Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. The Geologic Time Scale. — Amsterdam: Elsevier, 2012. — 1144 p.
15. Talbot M.R. Major sedimentary cycles in Corallian Beds (Oxfordian) of southern England // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. — 1973. — V. 14. — P. 293–310.
16. Page K.N., Melendez G., Hart B.M., Price D.G., Wright J.K., Bown P., Bello J. Integrated stratigraphical study of the candidate Oxfordian Global Stratotype Section and Point (GSSP) at Redcliff Point, Weymouth, Dorset, UK. P. // Volumina Jurassica. — 2009. — V. VII. — P. 101–111.
17. Атлас моллюсков и фораминифер морских отложений верхней юры и неокома Западно-Сибирской нефтегазоносной области. Т. 1. — М.: Недра, 1990. — 286 с.
18. Catuneanu O. Principles of Sequence Stratigraphy. — Amsterdam: Elsevier, 2006. — 375 p.
19. Galloway W. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis. I. Architecture and genesis of flooding surface bounded depositional units // AAPG Bulletin. — 1989. — V. 73. — P. 125–142.

Поступила 11.05.2012 г.

УДК 553.984;552.54

МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА ТРЕЩИННО-МЕТАСОМАТИЧЕСКОГО ГЕНЕЗИСА В ДОЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ГЕОСИНЕКЛИЗЫ

А.Е. Ковешников

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

В доюрских отложениях Западно-Сибирской геосинеклизы месторождения нефти и газа могут формироваться или в нефтегазоносной зоне контакта палеозойских и мезозойских отложений по пермо-триасовым корам выветривания, или по гидротермально-метасоматическим трещинным зонам как в неизменных породах, так и при наложении данных зон на зону пермо-триасовых кор выветривания. Ключевой является система сопряженных трещин или трещинных зон, в которую в качестве отдельных участков улучшения коллекторских свойств включены породы-коллекторы зоны коры выветривания.

Ключевые слова:

Доюрские карбонатные породы, Западно-Сибирская геосинеклиза, доломитизация, выщелачивание.

Key words:

Prejurassic carbonate rocks, Western-Siberian geosineclise, dolomitization, lixiviation.

В юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы, изученной нами на примере Чузикско-Чижапской зоны нефтегазоаккумуляции [1], ранее именуемой в литературе Нюрольским осадочным бассейном или Межовским срединным массивом [2], установлены вендские и палеозойские продуктивные отложения, в карбонатных кремнисто-карбонатных и кремнисто-глинистых породах формируется гидротермально-метасоматический трещинно-каверно-поровый и трещинно-поровый типы коллектора. Они накладываются на сформированную ранее кору выветривания или развиты в виде самостоятельных трещинных систем, что, с одной стороны, увеличивает перспективность обнаружения месторождений нефти и газа в доюрском комплексе, с другой, переориентирует поиск новых месторождений с тектонических выступов фундамента, с которыми связаны месторождения зоны пермо-триасовых кор выветривания, на зоны развития трещинных зон, с которыми связаны месторождения трещинно-метасоматического типа.

На изученной нами территории установлено широкое развитие карбонатных пород [3], лишенных терригенной примеси (силурийско-раннедевонская доломито-известняковая толща, толща известняков с биогермами и биостромами среднего девона, карбонатная толща верхнего девона), а также пород кремнисто-карбонатного и кремнисто-глинистого состава (верхнедевонская толща кремнеаргиллитовая с радиоляритами и толща известняков окварцованных раннего карбона), по которым установлено формирование пород-коллекторов. Доюрские отложения претерпели три этапа преобразований [3], а именно: первичный катагенез, проявившийся тем больше, чем более древние отложения мы рассматриваем; орогенез, или этап формирования пермо-триасовых кор выветривания, с формированием горизонта НГГЗК (нефтегазоносный горизонт зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений); вторично-ка-

тагенетический метасоматоз, проявление которого связано с системой трещинных зон. Как нами показано ранее [4, 5], со вторым и третьим этапами связано формирование пород-коллекторов и месторождений нефти и газа. Но если с пермо-триасовыми корами выветривания связано формирование емкостного пространства разобренных выступов палеозойского фундамента в доюрском рельефе, то вторично-катагенетическим преобразованиям соответствует система трещинных зон, по которым осуществлялась циркуляция растворов, вызвавших гидротермальное преобразование пород, и в то же время данная трещинная система является подводящей системой, по которой в доюрские породы осуществлялась миграция углеводородов [6].

Формирование пустотного пространства карбонатных пород

Для карбонатных пород изученной территории нами установлено [5], что в диагенезе и раннем первичном катагенезе известняки были в различной степени доломитизированы [7]. В орогенный этап развития при формировании пермо-триасовых кор выветривания и воздействии гипергенных процессов известняки интенсивно разрушались [3]. Ввиду особенностей состава данные отложения занимают в доюрском рельефе пониженные участки, что не способствовало преобразованию этих пород процессами гипергенеза на значительную глубину.

В этих отложениях пустотное пространство может быть образовано в зоне формирования пермо-триасовых кор выветривания (диагностируются по увеличению значений пористости и проницаемости при приближении к доюрской поверхности), или породы-коллекторы формируются в трещинно-метасоматических зонах (развиты вне видимой связи с доюрской поверхностью и устанавливаются по высоким значениям коллекторских свойств с примыкающими к ним породами-некол-

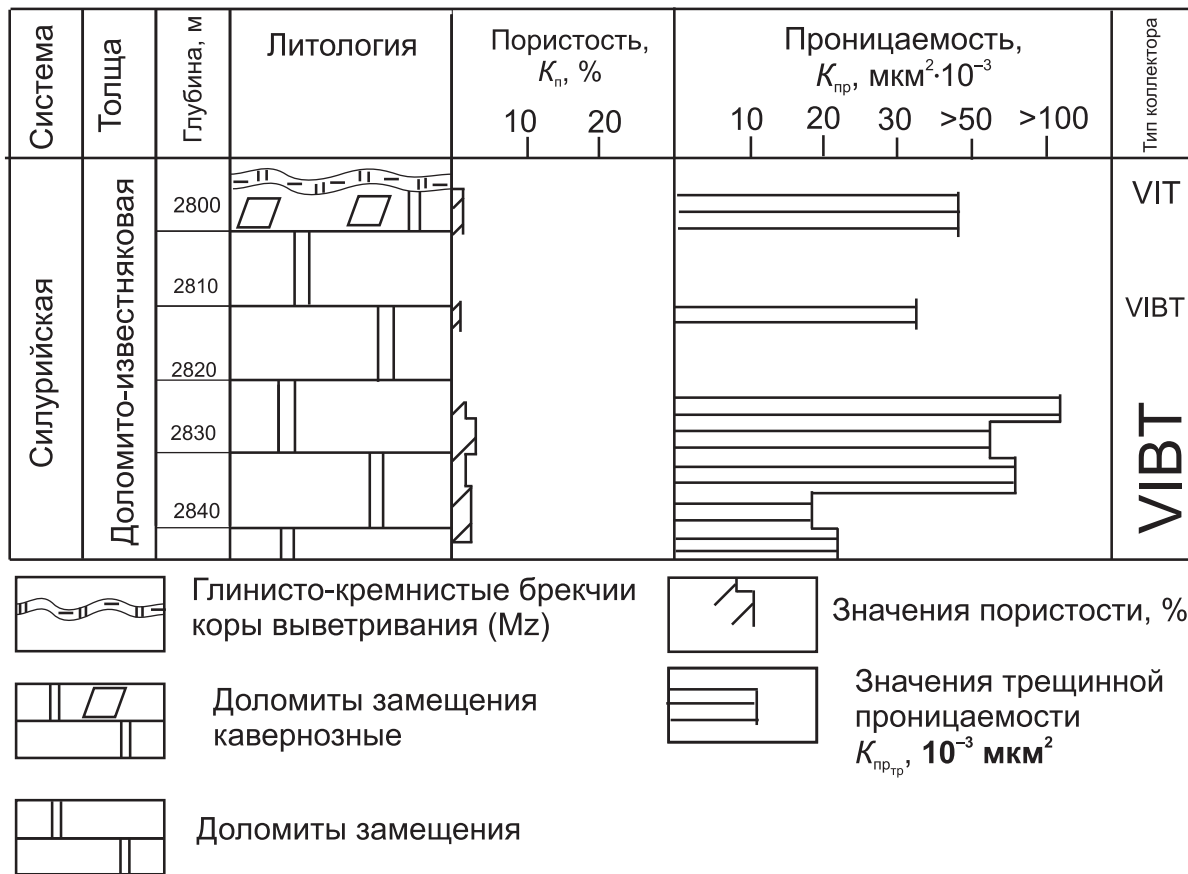


Рис. 1. Литологическая колонка и коллекторские свойства отложений карбонатной толщи (скважина Северо-Останинская 7). Здесь и далее тип коллектора указан по классификации К.И. Багринцевой с добавлениями [8]

лекторами). Как видно из рис. 1, 2, при достаточно низких значениях пористости в обеих скважинах установлено развитие зон повышенных значений проницаемости по всему разрезу скважин. Горизонт НГГЗК проявился только при наличии зоны кавернозности, развитой в непосредственной близости от доюрской поверхности. По скважине Северо-Останинской 7 (при неполном отборе керна) все опробованные интервалы характеризуются низкими значениями пористости и высокими значениями проницаемости. Весь разрез скважины может соответствовать зоне трещинно-метасоматической проработки.

По скважине Урманская 7 осуществлен достаточно полный отбор керна. Здесь также при невысоких значениях пористости отмечается наличие участков с повышенной проницаемостью. По этой скважине в нашем распоряжении имеются данные по трещинной проницаемости, показывающей повышенные значения по всему разрезу скважины, и данные по матричной проницаемости, установленные в верхней части разреза скважины, но при некотором удалении от доюрской поверхности. Таким образом, и здесь можно говорить о трещинной природе сформированных пород-коллекторов при слабо проявленной зоне НГГЗК.

Таким образом, на изученной территории установлено слабое влияние на коллекторские свой-

ства карбонатных пород процессов гипергенного выщелачивания, связанных с формированием горизонта НГГЗК. Породы-коллекторы формируются в результате гидротермальной проработки, которая связана со вторично-катагенетическим этапом преобразования палеозойских отложений.

Формирование пустотного пространства нормально-осадочных кремнисто-глинистых пород

Кремнеаккумуляция на изученной территории начинается в начале позднего девона с формированием в бассейновых условиях толщ кремнеаргиллитовой с радиоляритами, затем в раннем карбоне формируется рифогенно-аккумулятивная толща известняков, окварцованных со спонголитами (с широким развитием диагенетического окремнения).

Отложения толщ кремнеаргиллитовой с радиоляритами, знаменующей завершение накопления бассейновых отложений ввиду наличия в их составе кремнезема, занимают в доюрском рельефе повышенное положение, что предполагает их усиленную проработку процессами гипергенеза в период континентального стояния региона.

Породы-коллекторы в данных образованиях могут сформироваться как в зоне НГГЗК (будут характеризоваться повышенными значениями пористости), так и вдоль трещинных зон, вдоль которых осуществлялись процессы гидротермально-мета-

| Система | Отдел | Толща | Глубина, м | Литология | Пористость, K_p , % | | Проницаемость, $K_{пр}$, $\text{мкм}^2 \cdot 10^{-3}$ | | | | | Коллектор трещинный | Коллектор матричный |
|-----------|---------|-------------|------------|-----------|-----------------------|----|--|----|----|-----|------|---------------------|---------------------|
| | | | | | 10 | 20 | 10 | 20 | 30 | >50 | >100 | | |
| Девонская | Верхний | Карбонатная | 3100 | | | | | | | | | VIB(M,T) | VIB(M,T) |
| | | | 3110 | | | | | | | | | VIB(T) | |
| | | | 3120 | | | | | | | | | | |
| | | | 3130 | | | | | | | | | | |
| | | | 3140 | | | | | | | | | | |

Рис. 2. Литологическая колонка и коллекторские свойства отложений карбонатной толщи (скважина Урманская 7). Условные обозначения см. на рис. 1.

| Система | Отдел | Толща | Глубина, м | Литология | Пористость, K_p , % | | Проницаемость, $K_{пр}$, $\text{мкм}^2 \cdot 10^{-3}$ | | | | | Коллектор трещинный | Коллектор матричный |
|-----------|---------|------------------------------------|------------|-----------|-----------------------|----|--|----|----|-----|------|---------------------|---------------------|
| | | | | | 10 | 20 | 10 | 20 | 30 | >50 | >100 | | |
| Девонская | Верхний | Кремнеаргиллитовая с радиоляритами | 2920 | | | | | | | | | | |
| | | | 2930 | | | | | | | | | | |
| | | | 2940 | | | | | | | | | | |
| | | | 2950 | | | | | | | | | | |
| | | | 2960 | | | | | | | | | | |
| | | | 2970 | | | | | | | | | | |
| | | | 2980 | | | | | | | | | | |
| | | | 2990 | | | | | | | | | | |
| | | | 3000 | | | | | | | | | | |
| | | | 3010 | | | | | | | | | | |
| | | | 3020 | | | | | | | | | | |
| | | | 3030 | | | | | | | | | | |
| | | | 3040 | | | | | | | | | | |

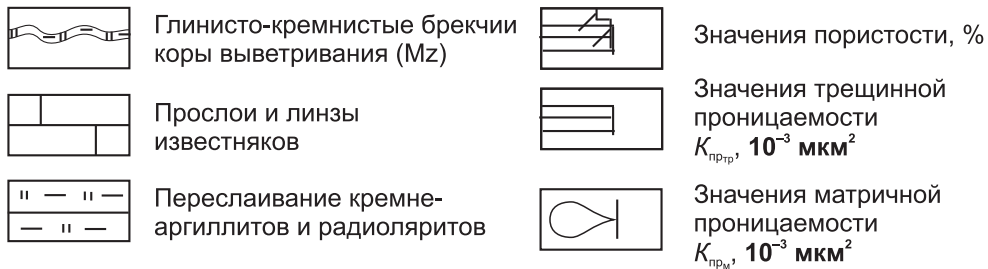


Рис. 3. Литология и коллекторские свойства отложений толщи кремнеаргиллитовой с радиоляритами (скважина Северо-Калиновская 21)

соматической проработки (не будут иметь привязки к доюрской поверхности, будут окружены породами-неколлекторами).

На примере разреза скважины Северо-Калиновой 21 (рис. 3) видно, что горизонт НГГЗК здесь представлен зоной повышения значений пористости (до 70 м), которые сопровождаются повышенными значениями проницаемости только в отдельных зонах, значительно удаленных от доюрской поверхности. Логично предположить трещинную природу сформированных пород-коллекторов. При этом трещинно-метасоматические зоны наложены на зону повышения значений пористости, отражающую гипергенное выщелачивание зоны НГГЗК. Для данных отложений можно сделать вывод о трещинно-метасоматической природе сфор-

мированного коллектора с включением отдельных участков НГГЗК в формируемое пустотное пространство в виде участков повышенной пористости. При этом по значениям проницаемости в нашем распоряжении имеются данные, характеризующие как матричную, так и трещинную проницаемость. И те и другие значения позволяют говорить о наличии пород-коллекторов, и те и другие равно удалены от доюрской поверхности.

Таким образом, для нормально осадочных кремнисто-глинистых отложений бассейнового комплекса установлено значительное влияние на формирование пустотного пространства пород процессов гипергенного выщелачивания, связанного с формированием горизонта НГГЗК, в то же время установлено и значительное проявление

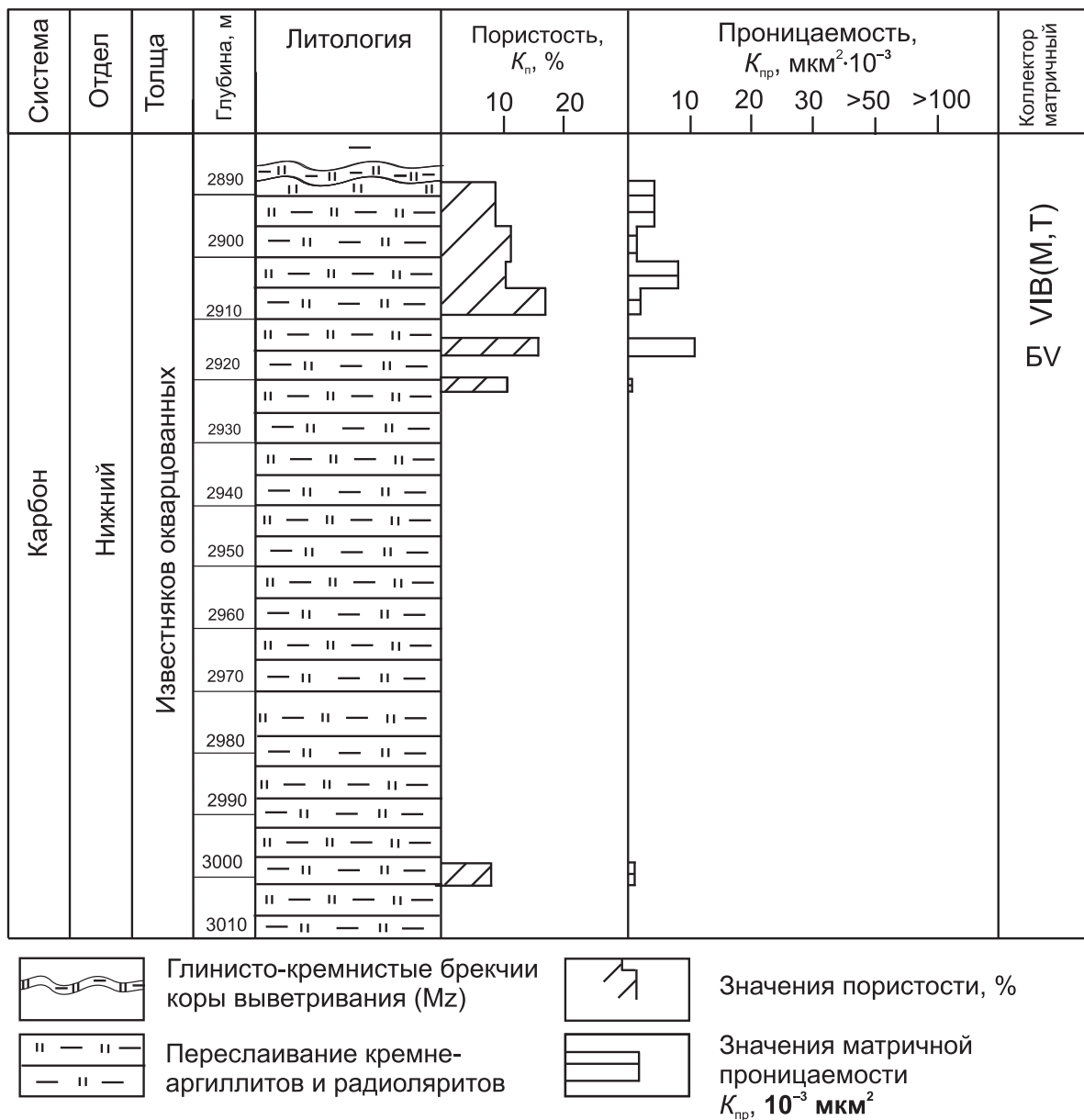


Рис. 4. Литология и коллекторские свойства толщи известняков окварцованных (скважина Герасимовская 14)

процессов гидротермальной трещинной проработки пород.

Формирование пустотного пространства диагенетически окремненных известняков

Диагенетически окремненные известняки раннекарбонатового возраста характеризуются тем, что при их формировании в результате проявления процесса окварцевания значительная часть первоначального карбонатного состава породы в диаге-

незе была замещена кварцем. Данными образованиями сложена толща известняков окварцованных раннекарбонатового возраста.

При формировании горизонта НГТЗК в данных отложениях весь оставшийся в породе биогенный кальцит и весь имеющийся в породе при формировании осадка биогенных кварц были вынесены процессами гипергенного выщелачивания и сформировался очень плотный субстрат, содержащий поры и каверны на месте участков существовав-

| Система | Отдел | Толща | Глубина, м | Литология | Пористость, $K_p, \%$ | | Проницаемость, $K_{пр}, \text{мкм}^2 \cdot 10^{-3}$ | | | | | Коллектор трещинный | Коллектор матричный |
|-------------|--------|--|------------|-----------|-----------------------|----|---|----|----|-----|------|---------------------|---------------------|
| | | | | | 10 | 20 | 10 | 20 | 30 | >50 | >100 | | |
| Карбонатная | Нижний | Турфогенно-глинистая с прослоями известняков | 2760 | | | | | | | | | | |
| | | | 2770 | | | | | | | | | | |
| | | | 2780 | | | | | | | | | | |
| | | 2790 | | | | | | | | | | | |
| | | 2800 | | | | | | | | | | | |
| | | 2810 | | | | | | | | | | | |
| | | 2820 | | | | | | | | | | | |
| | | 2830 | | | | | | | | | | | |
| | | 2840 | | | | | | | | | | | |
| | | 2850 | | | | | | | | | | | |
| | | 2860 | | | | | | | | | | | |
| | | 2870 | | | | | | | | | | | |

| | | | |
|--|--|--|---|
| | Глинисто-кремнистые брекчии коры выветривания (Mz) | | Линия переслаивания |
| | Аргиллизированные туфы | | Значения пористости, % |
| | Известняк глинистый | | Значения матричной проницаемости $K_{прм}, 10^{-3} \text{мкм}^2$ |
| | Известняк: окварцованный; трещиноватый | | Значения трещинной проницаемости $K_{пртр}, 10^{-3} \text{мкм}^2$ |
| | Микрокварцит кавернозный; спонголит | | |
| | Аргиллит | | |

Рис. 5. Литология и коллекторские свойства толщи известняков окварцованных (скважина Герасимовская 5)

ших ранее биогенных кальцита и кварца. Отложения толщи в доюрском рельефе занимают повышенное положение, что позволяет предположить большую глубину их проработки процессами гипергенеза в период континентального стояния региона при формировании зоны НГГЗК.

Чтобы установить время формирования в данных отложениях пород-коллекторов, рассмотрим разрезы скважин Герасимовских 14 и 5. По скважине Герасимовская 14 (рис. 4) видно, что повышенные значения пористости и проницаемости показывают явную их приуроченность к доюрской поверхности, что, вероятно, является отражением процессов гипергенного выщелачивания, проявившихся по окремненным породам толщи.

Более сложную картину мы наблюдаем по разрезу скважины Герасимовская 5. Здесь отложения толщи известняков окварцованных отделены от доюрской поверхности образованиями толщи туфогенно-глинистой с прослоями известняков. По образованиям данной толщи породы-коллекторы не формируются даже в зоне проявления гипергенных процессов ввиду их преимущественно глинистого состава. В толще же известняков окварцованных повышенные значения пористости и проницаемости формируются в участке развития микрокварцитов кавернозных (рис. 5). Здесь установлена пачка известняков окварцованных, часть которых преобразована в микрокварциты кавернозные. Подобное преобразование пород, вероятно, связано с процессами гидротермального выщелачивания, сопровождаемого выносом из породы остаточного кальцита с образованием в породе каверн.

Здесь при отсутствии видимого проявления горизонта НГГЗК отчетливо устанавливается трещинная зона, по которой проявились процессы выщелачивания с формированием пород-коллекторов.

Таким образом, для кремнисто-карбонатных пород установлено значительное влияние на формирование пустотного пространства пород процес-

сов гипергенного выщелачивания. Установлено развитие трещинных гидротермально-метасоматических зон, значительно улучшающих коллекторские свойства пород при удалении от доюрской поверхности.

Выводы

1. Формирование пород-коллекторов в палеозойских отложениях Западно-Сибирской геосинеклизы происходило в два этапа: первому соответствует формирование кор выветривания пермо-триасового возраста, проявившихся по повышенным участкам доюрского рельефа, второму – вторично-катагенетические процессы гидротермальной природы.
2. Повышенные участки доюрского рельефа соответствуют развитию толщ кремнеаргиллитовой с радиоляритами и известняков окварцованных, пониженные – зонам развития известняков.
3. В известняках породы-коллекторы формируются в результате проявления гидротермальных процессов трещинной природы при незначительном участии гипергенных процессов, ведущих к образованию кор выветривания. В кремнисто-глинистых породах и во вторичных микрокварцитах по известнякам породы-коллекторы сформированы как в зоне коры выветривания, так и по трещинным зонам, которые объединяют пустотное пространство пород в единую систему.
4. С горизонтом НГГЗК связано формирование пород-коллекторов в кремнисто-глинистых и кремнисто-карбонатных отложениях, для карбонатных пород такая связь незначительна.

Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН и УрО РАН № 50 «Геологическое строение, тектоника, история формирования и перспективы нефтегазоносности палеозоя Западно-Сибирской геосинеклизы и ее складчатого обрамления».

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., Недоливко Н.М. Коры выветривания доюрских отложений Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 77–81.
4. Ковешников А.Е. Породы-коллекторы доюрских карбонатно-кремнисто-глинистых отложениях Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 132–137.
5. Ковешников А.Е. Формирование пород-коллекторов в доюрских карбонатных отложениях Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 138–142.
6. Ковешников А.Е. Источник поступления нефти и газа в палеозойские отложения Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 111–116.
7. 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.
8. 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.

Поступила 26.10.2012 г.

УДК 553.984;552.54;551.253

ИСТОЧНИК ПОСТУПЛЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА В ПАЛЕОЗОЙСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ГЕОСИНЕКЛИЗЫ

А.Е. Ковешников

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

Палеозойские отложения при формировании и последующих преобразованиях прошли три этапа: диагенез и первичный катагенез; орогенез и формирование кор выветривания; вторичный катагенез и формирование трещинных гидротермально-метасоматических по происхождению пород-коллекторов. При прохождении первичного катагенеза палеозойские породы прошли главную стадию нефтеобразования. В орогенный этап развития региона в зоне формирования кор выветривания нефть, сформированная в первичном катагенезе, была рассеяна. Формирование пород-коллекторов в виде единой системы и заполнение части из них нефтью и газом происходило во вторично-катагенетический этап преобразования пород. Нефть мигрирует в месторождения, сосредоточенные в палеозойских отложениях, в результате диффузионного переноса в пластовых водах высокой температуры, из которых она выделяется в капельной форме на участках глубинных разломов в результате прохождения нефти «точки росы» и подъема затем силами гравитации в породы-коллекторы, сформированные в палеозойских отложениях.

Ключевые слова:

Вторично-катагенетические преобразования, доюрские отложения, Западно-Сибирская геосинеклиза, метасоматоз, трещинообразование, порода-коллектор, перегретые пластовые воды, диффузионный перенос.

Key words:

Secondary catagenetic transformations, prejurassic deposits, Western-Siberian geosineclise, metasomatism, formation of cracks, reservoir rock, overheated stratal water, diffusion transfer.

Палеозойские отложения юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы изучены нами на примере Чузикско-Чижапской зоны нефтегазо-накопления [1], имеющей в литературе также наименование Нюрольского осадочного бассейна [2], объединены нами в литолого-петрографические толщи с близким литологическим составом пород и близкими петрофизическими свойствами, которые соответствуют выделенным по палеонтологическим данным свитам и толщам (табл. 1). Они претерпели [3] последовательно три этапа преобразований: стадию диагенеза и первичного катагенеза; орогенный этап и формирование кор выветривания, вторично-катагенетические преобразования на фоне первичного катагенеза, проходимого мезозойско-кайнозойскими отложениями, перекрывшими палеозойский комплекс. Первичный катагенез проявился тем сильнее, чем глубже были погружены палеозойские отложения, и чем более мощной толщей вышележащих отложений они были перекрыты. Палеозойские отложения подразделяются на образования рифогенного и бассейнового комплексов.

Собственно, интерес в плане формирования пород-коллекторов представляют отложения, характеризующиеся карбонатным или кремнисто-карбонатным и кремнисто-глинистым составом, так как к ним приурочены открытые до настоящего времени месторождения нефти и газа. Это толщи: рифогенного комплекса — доломито-известняковая; известняков с биогермами и биостромами; карбонатная; известняков окварцованных, и толщи бассейнового комплекса — кремнеаргиллитовая с радиоляритами.

Для оценки степени первично-катагенетических преобразований нами проанализированы имеющиеся данные по мощности вскрытых буре-

нием палеозойских пород (табл. 2). При этом обращает на себя внимание тот факт, что отложения герасимовской свиты среднего девона, накапливающиеся в рифогенной зоне, имеют мощность более 1100 м, в то время как накапливающиеся параллельно отложения бассейнового комплекса вскрыты бурением на 470 м, что, возможно, связано либо с неполнотой вскрытого бурением разреза, либо с меньшей мощностью накапливающихся в бассейновых условиях отложений.

Итак, суммарная мощность палеозойских отложений составляет от 3600 до 5000 м. При этом необходимо понимать, что выделенные литолого-стратиграфические подразделения палеозойского разреза вскрыты не на полную мощность и приведенные нами данные получаются несколько заниженными.

При анализе мощностей отдельных литолого-петрографических толщ получается, что палеозойские отложения при своем формировании в палеозойском море при погружении под весом вышележащих пород уже прошли главную зону нефтеобразования и нефть, которую они могли генерировать в этот период, вероятно, рассеялась в последующие этапы преобразования палеозойских отложений, особенно в орогенный этап развития региона.

Следовательно, рассматривая в настоящее время палеозойские отложения, мы должны сказать, что почти вся нефть в них будет обязательно вторично-мигрировавшей в данные отложения.

Тот факт, что палеозойские отложения, оказавшиеся в нижней части мезозойского разреза (глубина вскрытия скважинами составляет 1500...3000 м), вновь попали на уровень главной зоны нефтеобразования, только на несколько меньшие глубины,

Таблица 1. Доюрские отложения Чузиковско-Чижалпской зоны нефтегазоаккумуляции (рифогенный (Р) и бассейновый (Б) комплексы)

| Литолого-петрографические толщи | | Свиты (толщи) в метрах | |
|---|--|---|--|
| Р | Б | Р | Б |
| Горизонт НГГЗК: коры выветривания, Калиновая свита, бокситы (Р-Т) | | | |
| Терригенная с прослоями туфов (C ₅ s ³ -C ₂ b ¹) | | Елизаровская (C ₂ b ¹) Средневазюганская (C ₅ s ³ -C ₂ b ₁) | |
| Известняков окварцованных со спонголитами (C ₁ t-s ₁) | Туфогенно-глинистая с прослоями известняков (C ₁ t-s ¹⁻²) | Табаганская (C ₁ t-s ₁) | Кехоргерская (C ₁ t-s ¹⁻²) |
| Карбонатная (D ₃) | Кремнеаргиллитовая с радиоляритами (D ₃ f ³ -fm) | Лугинецкая (D ₃) | Верхняя подсвита чагинской (D ₃ f ³ -fm) |
| | Карбонатно-глинистая битуминозная (D ₃ f ¹⁻²) | | Нижняя подсвита чагинской (D ₃ f ¹⁻²) |
| Известняков с биостромами и биостромами (D ₂) | Известняково-глинисто-гравелитовая (D ₂) | Верхняя подсвита Герасимовской (D ₂ žv ²) | Верхняя подсвита Чузиковской (D ₂ žv ²) |
| | | Нижняя, средняя подсвиты Герасимовской (D ₂ ef-žv ¹) | Нижняя подсвита Чузиковской (D ₂ ef-žv ¹) |
| Глинисто-карбонатная псефитолитовая (D ₁ p-e) | Глинисто-карбонатная ритмически построенная (S ₂ -D ₁ e) | Надеждинская (D ₁ e ⁰) и Солоновская (D ₁ e ⁰) | Мирная толща (D ₁ e) |
| | | Армичевская (D ₁ p) | Лесная (D ₁ l-p) |
| Кыштовская (D ₁ l) | | | |
| Межовская (S ₂) | | Майзасская (S ₁₋₂ p) | |
| Доломито-известняковая (S ₁ -D ₁ l) | | Ларинская (S ₁) | |
| Терригенная (ε ₂ -ε ₃)-(O ₂ k-O ₃ aš) | | Павловская толща (O ₂ k-O ₃ aš) Жигаловская толща (ε ₂ -ε ₃) | |

указывает на то, что в настоящий момент во вторичном катагенезе они еще не достигли той степени метаморфизма, которую имели в первичном катагенезе и ожидать от этих отложений генерации нефти невозможно.

Как нами показано в [4], основным процессом, контролирующим размещение месторождений нефти и газа в палеозойских отложениях Западно-Сибирской геосинеклизы, являются гидротермальный метасоматоз, которому соответствует система трещинных зон северо-западного и северо-восточного простирания, по которым в юго-восточную часть Западно-Сибирской геосинеклизы и пришла нефть с севера или востока.

Картина формирования месторождений нефти и газа в палеозойских отложениях изученной территории представляется в следующем виде. После формирования отложений палеозойского моря, первоначальное залегание которых имело близкое к горизонтальному положение, и прекращения существования моря в конце карбона последовал длительный период континентального стояния региона, во время которого происходило сближение таких крупных тектонических блоков, как Русская платформа и Восточная Сибирь. В результате до этого близко горизонтально залегающие палеозойские отложения были смяты в складки северо-западного и в меньшей степени северо-восточного простирания, разбиты на блоки, часть из которых испытала воздымание, а часть – опускание.

Те блоки, которые были приподняты в рельефе, претерпели интенсивное выветривание. Карбонатные породы растворялись, и слагающий их материал выносился в виде растворов, а породы кремнисто-глинистого и карбонатно-кремнистого состава механически разрушались, формируя плащобразно залегающую кору выветривания. По вы-

ходам магматических пород основного состава формировались бокситы. Вся территория Западно-Сибирской геосинеклизы в этот период представляла собой всхолмленную равнину в условиях полупустынного климата.

Таблица 2. Мощность палеозойских отложений: Рифогенного (Р) и бассейнового (Б) осадочных комплексов

| | | Мощность, м | | |
|--|--|-------------|----------|------------|
| Свиты (толщи) | | Комплексы | Суммарно | |
| Р | Б | Р | Б | |
| Горизонт НГГЗК: коры выветривания, Калиновая свита, бокситы (Р-Т) | | | | |
| Елизаровская (C ₂ b ¹) | | -120 | | 320 |
| Средневазюганская (C ₅ s ³ -C ₂ b ₁) | | -200 | | |
| Табаганская (C ₁ t-s ₁) | Кехоргерская (C ₁ t-s ¹⁻²) | -464 | -430 | 430...460 |
| Лугинецкая (D ₃) | Верхняя подсвита Чагинской (D ₃ f ³ -fm) | -650 | -180 | 480...650 |
| | Нижняя подсвита Чагинской (D ₃ f ¹⁻²) | -300 | | |
| Верхняя подсвита Герасимовской (D ₂ žv ²) | Верхняя подсвита Чузиковской (D ₂ žv ²) | 615 | -70 | 470...1135 |
| Нижняя, средняя подсвиты Герасимовской (D ₂ ef-žv ¹) | Нижняя подсвита Чузиковской (D ₂ ef-žv ¹) | -520 | -400 | |
| Надеждинская (D ₁ e ⁰) и Солоновская (D ₁ e ⁰) | Мирная толща (D ₁ e) | -220 | -400 | 400...420 |
| Армичевская (D ₁ p) | | -200 | | |
| Кыштовская (D ₁ l) | Лесная (D ₁ l-p) | -630 | -480 | 480...1030 |
| Межовская (S ₂) | | -400 | | |
| Майзасская (S ₁₋₂ p) | | -360 | -410 | 360...410 |
| Ларинская (S ₁) | | >360 | | 360 |
| Павловская толща (O ₂ k-O ₃ aš) | | -65 | | 315 |
| Жигаловская толща (ε ₂ -ε ₃) | | >250 | | |

В результате по выходам кремнисто-глинистых и карбонатно-кремнистых пород сформировались коры выветривания, именуемые в литературе горизонтом НГГЗК (нефтегазоносный горизонт зоны контакта палеозойских и юрских отложений). По известнякам такой зоны не сформировано, но отмечается увеличение значений пористости при приближении к доюрской поверхности.

Во время формирования юрско-палеогенового моря палеозойские отложения были перекрыты мощной (до 3000 м) толщей терригенно-глинистого состава. Отдельные останцы палеозойского палеорельефа были перекрыты даже в конце юрского периода (запад Западно-Сибирской геосинеклизы, район Предуралья).

В процессе перекрытия палеозойских отложений чехлом мезозойско-кайнозойских пород последние постепенно включились в диагенетические и катагенетические преобразования, которые проходили юрско-меловые отложения. Диагенетические процессы вряд ли сильно повлияли на данные породы, уже в значительной степени преобразованные в зоне НГГЗК процессами гипергенеза. Подобные изменения если и осуществлялись, то только в узкой зоне контакта палеозойских пород с дном юрского моря.

Другое дело — процессы катагенеза. После полной литификации юрских и меловых отложений они составили с палеозойскими отложениями единый каркас пород, изменения которого происходили при подъеме и опускании отдельных блоков палеозойской части этого каркаса. В это время палеозойские отложения проходили эпоху вторично-катагенетических преобразований, проявившихся как гидротермальный метасоматоз (доломитизация и выщелачивание известняков; каолинизация и сидеритизация кремнисто-глинистых отложений бассейнового комплекса; выщелачивание остаточного биогенного кальцита и кварца из нижнекарбонатных отложений кремнисто-карбонатного состава) [5].

Эти преобразования проявились по единой системе сопряженных разломов северо-западного и северо-восточного простирания, которые объединяют те участки кор выветривания, бокситы, плащеобразно залегающие переотложенные коры выветривания горизонта НГГЗК, которые в противном случае выступали бы в качестве самостоятельных разрозненных объектов, в которые нефть не могла бы попасть.

Именно указанная система разломов является как природным резервуаром, по которому нефть мигрирует в месторождения, расположенные в измененных палеозойских отложениях, так и системой, которая контролирует подъем или опускание тех или иных блоков палеозойского фундамента.

Формы миграция нефти и газа в ловушки палеозойского фундамента

По современным воззрениям миграция нефти и газа в недрах осуществляется либо в свободной

фазе в форме капель [6], либо в растворенном водой состоянии [7, 8]. Такое состояние раствора наступает в интервале температур 200...250 °С и до температур свыше 300 °С [7, 8].

Если принять за источник нефти погружающиеся на большие глубины на севере Западно-Сибирской геосинеклизы битуминозные аргиллиты баженовской свиты, то при прохождении уровня, соответствующего главной фазе нефтеобразования, из них будет генерироваться нефть как в форме капель, так и в растворенном водой или природным газом (на больших глубинах) состоянии.

Нефть, находящаяся в капельной форме, подчиняясь законам гравитации, устремляется вверх. Относительно растворенной в пластовой воде нефти можно представить следующую картину: начиная от участков баженовской свиты, генерирующих нефть на всю толщу пород на соответствующих глубинах, в пластовой воде будет содержаться растворенная нефть. Начиная с определенной температурной отметки (изотерма около 200...250 °С) и до 350 °С, растворимость нефти в воде будет значительно возрастать.

Таким образом, будет существовать определенная зона, протяженная как по латерали, так и по вертикали, в пределах которой в пластовой воде будет содержаться растворенная нефть. Внутри этой зоны будет проходить рубеж, ниже которого растворимость нефти в воде, и, как следствие, количество в воде растворенной нефти будет значительно возрастать. Такая двухслойная система растворенной в пластовой воде нефти будет являться и, несомненно, является постоянным источником поступления нефти из растворенного состояния в капельную форму. При этом такой переход осуществляется по всей площади распространения пластовых вод, содержащих нефть в растворенном состоянии. В этом случае при уменьшении содержания в перегретых пластовых водах растворенной нефти через проявление процесса диффузии происходит растворение новых порций нефти, до этого входившей в состав нефтематеринских пород, и возвращение концентрации растворенной нефти к прежней концентрации.

Таким образом, можно представить постоянно действующий конвейер, который поставляет нефть от погружающихся участков баженовской свиты в участки, где по той или иной причине нефть переходит из растворенного в пластовых водах состояния в капельную форму и поднимается согласно законам гравитации вверх. Ввиду уменьшения концентрации растворенной в пластовой воде нефти новые порции через процессы диффузии растворяются в пластовой воде, концентрация растворенной нефти в воде восстанавливается, и новые порции нефти снова выделяются в капельную форму, и вновь эти капли удаляются вверх. Пределы работы данного конвейера простираются от погружающихся на большую глубину на севере Западно-Сибирской геосинеклизы отложений баженовской свиты до пределов значительной части



Рис. 1. Прохождение палеозойскими отложениями различного возраста стадий первичного катагенеза (до времени прекращения существования палеозойского моря). (Интенсивность генерации битумов и углеводородных газов по А.Э. Конторовичу и др. с добавлениями). Интенсивность генерации битумоидов и углеводородных газов в зоне катагенеза: Подстадии: АПО – апокатагенез; МЕЗО – мезокатагенез; ПРОТО – протокатагенез; ВЗГ – верхняя зона интенсивного газообразования; ГЗН – главная зона нефтеобразования (подэтапы: Б – бурые; Д – длиннопламенные; Г – газовые; Ж – жирные; К – коксующиеся; ОС – отоценные спекающиеся; Т- тощие; ПА – полуантрациты

территории геосинеклизы. Эта система в верхней своей части будет иметь переходную зону, где нефть по принципу прохождения «точки росы» будет переходить в капельное состояние и, как следствие, уходить из этой зоны вверх, подчиняясь законам гравитации и, тем самым, освобождая пространство для выделения новых капель нефти.

Получается постоянно действующая система, которая для своего функционирования не требует перемещения пластовых вод. Только диффузия растворенной нефти, даже при невысоком содержании растворенной нефти в воде, при ее постоянном выделении в верхней зоне перехода пластовых вод к температурам ниже «точки росы» для растворенной в воде нефти, будет поддерживать приблизительно равную концентрацию растворенной в воде нефти, несмотря на ее выпадение в капли.

При удалении растворенной нефти в каком-то участке Западно-Сибирской геосинеклизы диффузионные процессы поставят туда новые порции нефти. И этот процесс, несомненно, идет в недрах и будет идти, пока аргиллиты баженовской свиты не отдадут все те порции нефти, которые они способны отдать.

Потребляя такую нефть, мы активизируем процессы диффузии, которые приведут к пополнению запасов в разрабатываемых нами месторождениях нефти и газа, источником нефти в которых является диффундируемая в растворенном в воде состоянии нефть. Такая нефть, несомненно, слагает месторождения нефти в палеозойских отложениях,

наиболее близко расположенных к глубине «точки росы» нефти.

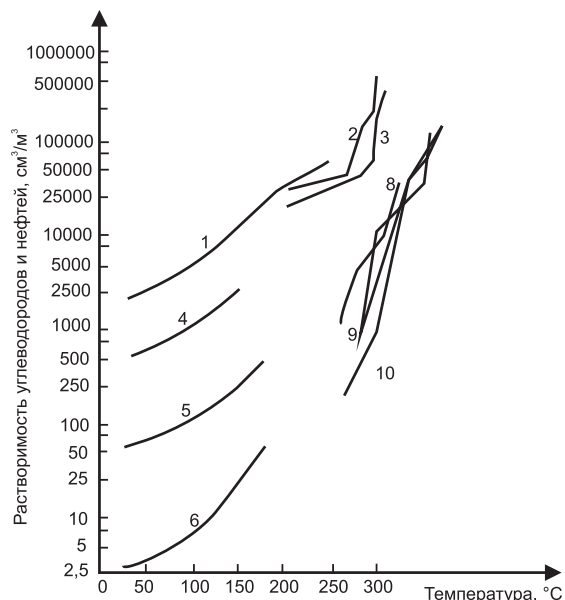


Рис. 2. Молекулярная растворимость бензола, толуола и дегазированных нефтей в дистиллированной воде (по В.В. Колодию, 1982 г.): 1 – бензол; 2 и 3 – то же при давлении 30 и 50 МПа соответственно; 4 – толуол-нефти; 5 – месторождение Лос-Анжелес (США); 6 – Вайоминг Фармерс (США); 7 и 8 – Должна (Прикарпатье, Украина) при 30 и 70 МПа соответственно; 9 и 10 – месторождение Октябрьское (Украина, Крым) при 30 и 70 МПа соответственно

Зоны перехода растворенной нефти в капельную форму

Зонами активного перехода нефти из растворенного в капельное состояние будут, несомненно, разломы, вдоль которых происходит утечка тепла, они будут представлять участки с пониженной относительно смежных участков температурой пластовых вод, где температурное воздействие таких разломов ослабевает. Исходя из вышеизложенного, следует, что вокруг зон нефтеобразования на глубинах от 6 до 10 км могут существовать зоны пластовых вод, в которых нефть будет диффундировать от места генерации, стремясь создать равную концентрацию во всем объеме пластовых вод, находящихся в этом объеме пород.

Переход нефти в капельную форму может осуществляться в участках понижения температуры, каковыми могут быть: разломы, доходящие с глубины 10...12 км до небольших (1...2 км) глубин; участки регионального охлаждения недр, к которым приурочены породы-коллекторы; локальные участки, на которых ввиду изменения электрических или магнитных свойств пород могут создаваться аномальные условия для перехода нефти из растворенного в капельное состояние даже при температурах более высоких, чем нижняя температурная граница растворимости нефти в воде.

Выводы

1. Палеозойские отложения юго-восточной части Западно-Сибирской геосинеклизы (Чузикско-Чижапской зоны нефтегазонакопления) во время своего накопления в палеозойском море прошли главную зону нефтеобразования, а во вторично-катагенетический этап преобразования еще не достигли глубин, на которые они погружались ранее при своем формировании, поэтому даже если среди них и присутствуют нефтематеринские толщи, то они уже отдали нефть при формировании палеозойского моря. Следовательно, большая часть нефти в месторождениях, приуроченных к измененным палеозойским отложениям, мигрировала в них во вторично-катагенетический этап развития территории.
2. Одним из возможных источников нефти, поступившей в измененные палеозойские отложения во вторично-катагенетический этап их преобразования, являются битуминозные аргиллиты баженовской свиты, которые погружаются на большие глубины в северной части Западно-Сибирской геосинеклизы, проходят все зоны нефтегенерации до самых глубоких.
3. Нефть от этих погруженных на большие глубины участков перемещается растворенной в природных водах в слабых концентрациях при температуре пластовых вод менее 200...250 °С и

в достаточно высоких концентрациях при диапазоне температур пластовых вод 200...350 °С. Механизм поступления нефти в палеозойские измененные отложения – диффузия растворенной в пластовой воде нефти, выделившейся в результате проявления процессов катагенеза на больших глубинах. В недрах существует определенная поверхность, ниже которой пластовая вода прогрета выше 200...250 °С, где нефть растворена в достаточно высоких концентрациях, а выше этой поверхности содержание нефти в пластовых водах ничтожно мало. Вдоль этой поверхности (изотерма 200...250 °С) происходит переход нефти из растворенного состояния в капельную форму. Это своеобразная «точка росы», выше которой нефть в пластовых водах почти не растворима и может существовать только в капельной форме. Такой переход будет происходить по всей изотерме 200...250 °С в участках, где осуществляется отток тепла, и создаются условия понижения температуры пластовых вод. Такими участками оттока тепла могут являться и, несомненно, являются глубинные разломы.

4. Система разломов северо-западного и северо-восточного простирания, густой сетью разбивающая палеозойские отложения на тектонические блоки, достигающая глубин 10...12 км и простирающаяся вверх до глубин 1...2 км, является природным лифтом, переводящим нефть из растворенного в перегретых пластовых водах состояния в капельную форму. Капли, поднимаясь вверх по разломам, уменьшают концентрацию нефти в перегретых свыше 200...250 °С пластовых водах, что приводит к растворению новых порций нефти, генерированной погружающимися на большие глубины и проходящими процессы катагенеза отложениями баженовской свиты. Эта растворенная в перегретых пластовых водах нефть благодаря диффузионному переносу восполняет потери концентрации в участках разломов, где нефть из растворенной перешла в капельную форму, и там формируются новые капли нефти, и таким образом процесс перехода нефти из растворенного в капельное состояние продолжается и постоянно возобновляется.
5. Поднимающиеся вдоль разломов, пересекающих палеозойские отложения, капли нефти, в конечном итоге формируют палеозойские залежи нефти, часть же нефти, минуя палеозойские отложения, может попадать и в залежи мезозойского осадочного чехла.

Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН и УрО РАН № 50 «Геологическое строение, тектоника, история формирования и перспективы нефтегазонасыщенности палеозоя Западно-Сибирской геосинклинали и ее складчатого обрамления».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конторович В.А. Сейсмогеологические критерии нефтегазоносности зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений Западной Сибири (на примере Чузикско-Чижапской зоны нефтегазоаккумуляции) // 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., Недоливко Н.М. Кобы выветривания доюрских отложений Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 77–81.
4. Ковешников А.Е. Месторождений нефти и газа трещинно-метасоматического генезиса в доюрских отложениях Западно-Сибирской геосинеклизы // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 1. – С. 105–110.
5. 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.
6. Губкин М.И. Учение о нефти. – М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1932. – 443 с.
7. Колодий В.В. Роль подземных вод в формировании залежей нефти // Гидрогеология и нефтегазоносность. – Минск: Наука и техника, 1982. – С. 25–42.
8. Нестеров И.И. Тайны рождения нефти. – М.: Знания, 1969. – 48 с.

Поступила 26.10.2012 г.

УДК 622.279.23: 519.688

ОЦЕНКА ИЗВЛЕКАЕМЫХ ЗАПАСОВ ГАЗОВЫХ И ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИНТЕГРИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ

В.В. Журавский, В.Л. Сергеев

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

Рассматривается проблема определения извлекаемых запасов газовых и газоконденсатных месторождений по промысловым данным, и предлагается метод ее решения, основанный на интегрированной системе моделей материального баланса с учетом априорной информации. Приводятся результаты анализа точности предлагаемого и традиционного методов падения давления на основе данных показателей разработки Анастасиевско-Троицкого газоконденсатного месторождения.

Ключевые слова:

Извлекаемые запасы, газовые и газоконденсатные месторождения, интегрированные системы моделей, метод падения давления, априорная информация.

Key words:

Recoverable reserves, gas and condensate fields, integrated system of models, method of pressure drop, a-priori information.

Введение

В настоящее время актуальной проблемой в области рационального использования природных ресурсов является задача мониторинга и контроля извлекаемых запасов месторождений углеводородов на ранних этапах их разработки, когда объем промысловых данных мал. Традиционным методом определения извлекаемых запасов газовых и газоконденсатных месторождений является метод падения пластового давления (МПД), основанный на уравнении материального баланса, точность которого зависит от режима работы залежи [1]. Как правило, на газовых и газоконденсатных месторождениях имеют место два режима: короткий газовый и упруговодонапорный. При газовом режиме работы залежи зависимость пластового давления от накопленной добычи газа носит прямолинейный характер, что обеспечивает приемлемую точность определения запасов газа при полном вовлечении залежи в разработку и однородной ее

структуре по емкостным и фильтрационным параметрам. Упруговодонапорный режим характеризуется вторжением в газовую залежь воды, что приводит к отклонению зависимости давления и отборов газа от прямолинейной и значительным ошибкам в определении извлекаемых запасов.

В данной работе для определения извлекаемых запасов газовых и газоконденсатных месторождений, повышения точности оценок предлагается использовать метод интегрированных моделей, позволяющий учитывать дополнительную априорную информацию [2].

Модифицированный метод падения давления с учетом априорной информации

Основу модифицированного метода падения давления составляет интегрированная система моделей материального баланса, представленная в виде двух дискретных стохастических систем уравнений [2]

$$\begin{cases} V_z^* = V_z + \xi = F_z(P, \alpha) + \xi, \\ \bar{Z} = Z + \eta = F_a(P, \alpha) + \eta. \end{cases} \quad (1)$$

Первая система моделей отражает зависимость накопленных отборов газа от пластового давления. Вторая система представляет дополнительные априорные данные и экспертные оценки технологических показателей разработки (ТПР). Здесь V_z^* , $P=(v_{z,i}, p_i, i=\overline{1, n})$ – векторы фактических значений накопленных отборов газа и пластового давления, вычисленные в моменты времени t_i ; $\bar{Z}=(\bar{z}_1, \bar{z}_2, \dots, \bar{z}_n)$ – вектор дополнительных априорных данных и экспертных оценок ТПР; V_z, Z – векторы накопленных отборов газа и дополнительных априорных данных, вычисленные на основе моделей F_z, F_a , заданных с точностью до параметров $\alpha_n=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$; $\xi_n=(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$, $\eta_n=(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)$ – векторы случайных величин, представляющих погрешности измерений накопленных отборов газа, пластового давления и, соответственно, ошибки дополнительных данных и экспертных оценок.

Для получения оценки извлекаемых запасов по аналогии с методом падения давления используем линейную зависимость накопленных отборов от пластового давления. В данном случае интегрированная система моделей материального баланса (1) состоит из двух систем линейных дискретных стохастических уравнений вида

$$\begin{cases} V_z^* = F_z \alpha + \xi, \\ \bar{Z} = F_a \alpha + \eta \end{cases} \quad (2)$$

и задача ее идентификации по определению неизвестных параметров α сводится к решению следующей системы линейных уравнений [2]

$$(F_z^T F_z + F_a^T W_\beta F_a) \cdot \alpha_n(\beta) = (F_z^T V_z^* + F_a^T W_\beta \bar{Z}), \quad (3)$$

где $F_z^T = \begin{bmatrix} 1, & 1, \dots, 1 \\ p_1, & p_2, \dots, p_n \end{bmatrix}$, $F_a^T = \begin{bmatrix} 1, 0 \\ 0, 1 \end{bmatrix}$ – матрицы размерности (2×2) ; $\bar{Z}=(\bar{V}_u, \bar{p}_n/\bar{V}_u)$ – вектор экспертных оценок извлекаемых запасов \bar{V}_u и начального пластового давления \bar{p}_n ; $W = \text{diag}(\beta_1, \beta_2)$ – диагональная матрица управляющих параметров $\beta_n=(\beta_1, \beta_2)$, определяющих значимость (вес) дополнительных данных \bar{Z} ; T – символ транспонирования.

Оценку извлекаемых запасов определяем по формуле

$$V_{u,n}^*(\beta_n^*) = \alpha_{1,n}^*(\beta_n^*), \quad (4)$$

где оценку $\alpha_{1,n}^*(\beta_n^*)$ находим из решения системы уравнений (3), а оценку вектора управляющих параметров β_n^* – путем решения оптимизационной задачи [2]

$$\beta_n^* = \arg \min_{\beta_n} \|V_z^* - F_z \alpha_n^*(\beta_n)\|^2, \quad (5)$$

запись $\|X\|^2$ означает норму вектора X ; n – объем данных отборов газа и пластового давления.

Алгоритм определения извлекаемых запасов модифицированным методом падения давления

заключается в формировании и решении системы линейных уравнений (3), решении оптимизационной задачи (5), вычислении оценок извлекаемых запасов по формуле (4) и, при необходимости, корректировке экспертных оценок начальных извлекаемых запасов пластового давления.

Следует отметить, что оценка извлекаемых запасов оптимальна, поскольку получена путем решения оптимизационной задачи

$$\alpha_{1,n}^*(\beta_n) = \arg \min_{\alpha_n} \Phi(\alpha_n, \beta_n),$$

при использовании комбинированного показателя

$$\begin{aligned} \Phi(\alpha_n, \beta_n) &= J_0(\alpha_n) + J_1(\alpha_n, \beta_n) = \\ &= \|V_z^* - F_z \alpha\|^2 + \|\bar{Z} - F_a \alpha_n\|_{W(\beta_n)}^2, \end{aligned}$$

где запись $\|X\|_W^2$ означает квадратичную форму $X^T W X^T$. Для получения оценки (4) достаточно взять производные от функционала $\Phi(\alpha_n, \beta_n)$ по α_n и приравнять их к нулю. Однако, несмотря на оптимальность оценки извлекаемых запасов (4), ее свойства существенным образом зависят от выбора управляющих параметров β_n и экспертных оценок \bar{Z} . Так, например, при $\beta_{1,n}^* = \beta_{2,n}^* = 0$ из (4) следует оценка МПД

$$V_{u,n}^*(0) = \alpha_{1,n}^*(0), \quad (6)$$

а при $\beta_{1,n}^* = \beta_{2,n}^* = \beta_n^*$ и $\bar{V}_u = 0, \bar{p}_n/\bar{V}_u = 0$ следует регуляризованная оценка метода падения давления (РМПД)

$$V_{u,n}^*(\beta_n^*) = \alpha_{1,n}^*(\beta_n^*). \quad (7)$$

Результаты исследования точности оценок

Результаты исследования точности оценок извлекаемых запасов по промысловым данным отражены в табл. 1, 2.

В табл. 1 приведены прогнозные оценки извлекаемых запасов, полученные традиционным методом падения давления – МПД (6), регуляризованным методом падения давления – РМПД (7) и модифицированным методом падения давления – ММПД (4), начиная с четвертого года разработки. В качестве дополнительных априорных сведений использовались данные об извлекаемых запасах, полученные на основе объемного метода $\bar{V}_u = 10,5 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ и начальном пластовом давлении $\bar{p} = 10 \text{ МПа}$, с последующей корректировкой \bar{Z} в модели (2) по схеме

$$\bar{Z}_{n+1} = (V_{u,n}^*(\beta_n^*), p_n, /V_{u,n}^*(\beta_n^*)), \quad n = 1, 2, 3, \dots, n_k - 1.$$

Для определения оценок управляющих параметров $\beta_{1,n}^* = \beta_{2,n}^* = \beta_n^*$ использовался метод дихотомии. В табл. 2 приведены промысловые данные показателей разработки Анастасиевско-Троицкого газоконденсатного месторождения, взятые из работы [1], где авторами показано, что, начиная с 9-го года разработки, происходят значительные отклонения зависимости пластового давления и накопленных отборов газа от прямолинейной и использование метода падения вызывает значительные трудности.

Таблица 1. Оценки извлекаемых запасов Анастасиевско-Троицкого газоконденсатного месторождения, 10^9 м^3

| Номер года разработки | Методы | | |
|-----------------------|--------|-------|-------|
| | МПД | РМПД | ММПД |
| 4 | 8,210 | 5,242 | 7,122 |
| 5 | 7,796 | 6,682 | 7,122 |
| 6 | 7,872 | 7,323 | 7,128 |
| 7 | 8,217 | 7,870 | 7,146 |
| 8 | 8,273 | 8,053 | 7,166 |
| 9 | 8,582 | 8,415 | 7,206 |
| 10 | 8,834 | 8,702 | 7,254 |
| 11 | 8,992 | 8,886 | 7,306 |
| 12 | 9,149 | 9,061 | 7,364 |
| 13 | 9,311 | 9,235 | 7,429 |
| 14 | 9,422 | 9,356 | 7,494 |
| 15 | 9,493 | 9,436 | 7,558 |

Из табл. 1 видно, что оценки извлекаемых запасов, полученные модифицированным методом падения давления, более точные и устойчивые по сравнению с традиционными оценками метода падения давления, особенно с девятого года разработки, когда наблюдаются отклонения пластового давления и накопленных отборов газа от прямолинейной зависимости. Так, например (см. табл. 2), относительная ошибка извлекаемых запасов модифицированным методом падения давления на 15-м году разработки составляет порядка 7 %, а методом падения давления – порядка 33 %. Отметим, что реально извлекаемые запасы Анастасиевско-Троицкого газоконденсатного месторождения за все годы разработки составили $6,91 \cdot 10^9 \text{ м}^3$.

Выводы

1. Для оценки извлекаемых запасов газовых и газоконденсатных месторождений предложен мо-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирзаджанадзе А.Х., Кузнецов О.Л., Басниев К.С., Алиев З.С. Основы технологии добычи газа. – М.: ОАО «Издательство «Недра», 2003. – 880 с.: ил.

Таблица 2. Промысловые данные годовых показателей разработки Анастасиевско-Троицкого газоконденсатного месторождения

| Номер года разработки | Отборы газа, 10^9 м^3 | Пластовое давление, МПа |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 1 | 0,08 | 9,6 |
| 2 | 0,36 | 9,1 |
| 3 | 0,76 | 8,6 |
| 4 | 1,42 | 8,0 |
| 5 | 2,14 | 6,9 |
| 6 | 2,93 | 6,1 |
| 7 | 3,51 | 5,6 |
| 8 | 4,18 | 4,9 |
| 9 | 4,53 | 4,8 |
| 10 | 5,06 | 4,4 |
| 11 | 5,37 | 4,1 |
| 12 | 5,52 | 4,0 |
| 13 | 5,93 | 3,8 |
| 14 | 6,14 | 3,6 |
| 15 | 6,36 | 3,4 |

дифицированный метод падения давления, основанный на интегрированной системе моделей материального баланса, позволяющий учитывать и корректировать дополнительную априорную информацию о начальных извлекаемых запасах и пластовом давлении.

2. На примере Анастасиевско-Троицкого газоконденсатного месторождения показано, что модифицированный метод падения давления позволяет существенно повысить точность оценок извлекаемых запасов, особенно на упруговодонапорном режиме работы залежи, когда происходит отклонение пластового давления и накопленных отборов газа от прямолинейной зависимости.

2. Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 198 с.

Поступила 22.06.2012 г.

ВЛИЯНИЕ БАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВЯЗИ ДЛЯ КОЛЛЕКТОРОВ СЕВЕРО-ВЕНИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Д.Н. Мезенцев, Ю.А. Щемелинин, Т.И. Ледовская, Г.Г. Войков*

ОАО «ТомскНИПИнефть», г. Томск
*ООО «Венинефть», г. Южно-Сахалинск
E-mail: MezentsevDN@nipineft.tomsk.ru

Рассматриваются результаты лабораторных экспериментов по определению фильтрационно-емкостных и петрофизических свойств пород: пористости, проницаемости, скорости пробега упругих волн, удельного электрического сопротивления в атмосферных и барических условиях для коллекторов Северо-Венинского месторождения Сахалинской области. Получены корреляционные связи исследуемых характеристик.

Ключевые слова:

Коллектор, пористость, проницаемость, барические условия, упругие характеристики, параметр пористости пласта.

Key words:

Reservoir, porosity, permeability, pressure conditions, elastic characteristics, formation porosity factor.

В статье впервые приведены результаты экспериментальных исследований по изучению влияния барического фактора на петрофизические характеристики керна терригенного разреза Северо-Венинского месторождения. При анализе экспериментальных данных получены зависимости, которые могут быть использованы при уточнении интерпретации данных геофизических исследований скважин (ГИС), подсчета запасов, создании гидродинамической модели [1].

Массовые измерения на керне, необходимые для петрофизического обеспечения интерпретации материалов геофизических исследований скважин, проводятся при поверхностных условиях. При термобарических и барических условиях исследуется намного меньшее количество керна. Вопрос стоит об уточнении поправок для приведения петрофизических характеристик и возможных связей между ними к пластовым условиям [2].

В лаборатории физики пласта ОАО «ТомскНИПИнефть» помимо стандартных петрофизических исследований на керновом материале проводятся специальные петрофизические исследования в барических условиях. Полученные данные позволяют изучить влияние барического фактора на определяемые параметры и корреляционные связи между ними.

На рис. 1 представлены сопоставления коэффициента открытой пористости по гелию в поверхностных (атмосферных) и барических условиях. Видно, что изменение величины коэффициента открытой пористости в барических $K_{по}^{бар}$ и атмосферных $K_{по}^{атм}$ условиях несколько отличается. Для объекта разработки эти изменения составляют: 0,8 % – среднее; 0,5 % – минимальное и 1,44 % – максимальное значение. Относительное изменение пористости для объекта разработки составляет 6,2 %.

Таким образом, при пересчете пористости в барические условия для образцов объекта разработки Северо-Венинского месторождения Сахалинской

области рекомендуется использовать зависимость с высокой степенью корреляции R :

$$K_{по}^{бар} = 1,1135 K_{по}^{атм1,0886}, \quad R = 0,996.$$

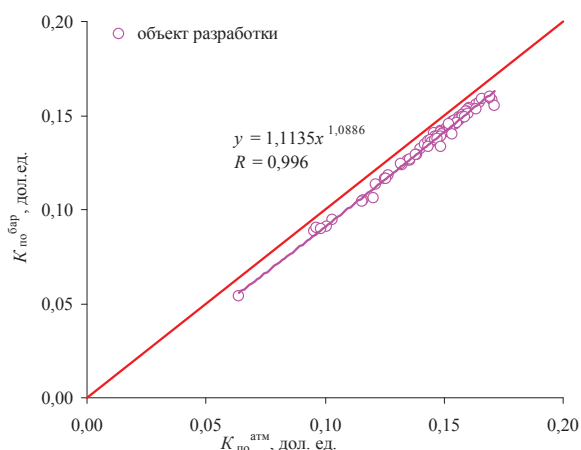


Рис. 1. Сопоставление коэффициента открытой пористости в пластовых и поверхностных условиях для образцов объекта разработки

Для количественного определения пористости широко используются данные ГИС. Что касается проницаемости, то надежных количественных геофизических методов для ее оценки пока нет. Поэтому как в петрофизике, так и при гидродинамическом моделировании часто проницаемость принимается как функция пористости, вычисленной по ГИС-оценкам.

На рис. 2 приведено сопоставление между значениями проницаемости в поверхностных $K_{пр}^{атм}$ и барических условиях $K_{пр}^{бар}$ для коллекторов Северо-Венинского месторождения по всему диапазону полученных проницаемостей. Получено уравнение регрессии, коэффициент корреляции в котором составляет 0,997.

Знание связи физических свойств горных пород в значительной степени повышает качество интер-

претации полевого материала. Электрические свойства и упругие параметры являются основой двух наиболее распространенных геофизических методов. При калибровке данных ГИС по данным, полученным на керне в поверхностных условиях, вводят поправочные коэффициенты на пластовые условия. Экспериментальные данные, полученные в условиях, приближенных к пластовым даже в относительно небольшом количестве, уменьшают неоднозначность зависимостей, позволяют уточнить поправочные коэффициенты.

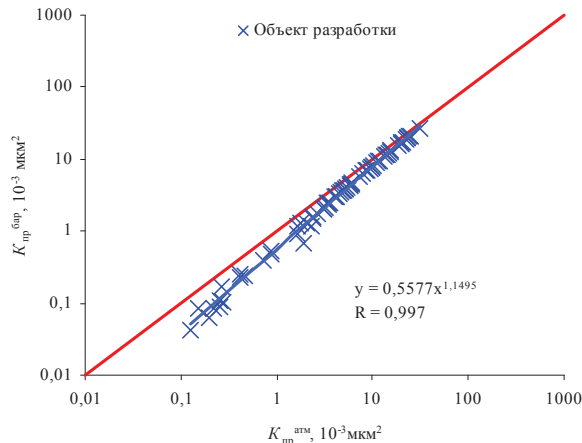


Рис. 2. Сопоставление коэффициента проницаемости в пластовых и поверхностных условиях для образцов объекта разработки

Для изучения зависимости изменений удельного сопротивления водонасыщенных песчано-глинистых пород от давления используют формулу, связывающую величины параметра пористости и коэффициента пористости породы – формулу Дахнова [1–4]

$$P_n = \frac{a_n}{K_{по}^m},$$

где P_n – параметр пористости; $K_{по}$ – коэффициент открытой пористости, a_n и m – постоянные для определенного типа породы.

Постоянную m называют структурным показателем или показателем цементирования. Показатель m зависит от множества факторов, в том числе: формы, сортированности и упаковки частиц матрицы породы, конфигурации и размера пор, сужения поровых каналов, их извилистости, присутствия глинистых материалов, уплотнения под действием горного давления, пластовой температуры. Установить зависимость этой величины от многообразных факторов в настоящее время невозможно, ее можно оценить только на образцах горных пород.

Электрическое сопротивление в атмосферных условиях определяли по двухэлектродной схеме на установке AERS-702, в которой ячейкой для измерения электрических свойств в атмосферных условиях служит кернодержатель АЕР-710. Для определения электрического сопротивления при бариче-

ских условиях использовали установку ОЕР-705. Относительная погрешность измерения не превышает 4 %.

Образцы насыщали моделью пластовой воды – раствором хлорида натрия минерализацией 14 г/л. Для определения параметра пористости была выбрана коллекция из 20 образцов. На каждом был замерен параметр пористости в атмосферных $P_n^{атм}$ и барических $P_n^{бар}$ условиях. Пористость образцов в выборке изменялась от 0,106 до 0,173 д.ед. Моделирование пластовых условий для данного месторождения обеспечивалось давлением обжима 35 МПа.

Коэффициент увеличения сопротивления параметра пористости $P_n^{бар}/P_n^{атм}$ для изученных образцов составил в среднем 2,6. Другими словами, под действием давления удельное сопротивление образцов Северо-Венинского месторождения возрастает на 160 % по сравнению с удельным сопротивлением, измеренным в атмосферных условиях. Под действием давления в породе происходит не только уменьшение коэффициента пористости, но и усложнение геометрии порового пространства, т. е. изменение структурного коэффициента m , значение которого возрастает.

На рис. 3 приведена зависимость параметра пористости от пористости, замеренной при атмосферных и барических условиях. Показатель цементации увеличивается с 1,24 до 1,35. Полученные экспериментальные данные позволили построить зависимость для определения параметра пористости от коэффициента пористости с учетом обжима, что увеличит точность интерпретации геофизических исследований.

$$P_n^{бар} = 2,9315 K_{по}^{бар-1,3484}, \quad R=0,893.$$

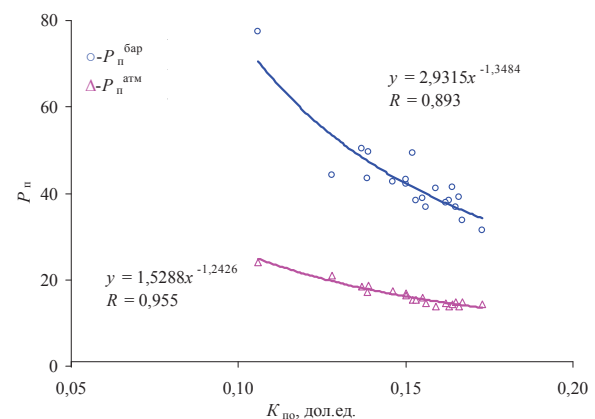


Рис. 3. Корреляционные зависимости параметра пористости от пористости для образцов объекта разработки

Для измерения скорости распространения упругих волн в образцах использовали специальную импульсную аппаратуру. При атмосферных условиях – прибор УК-10ПМС. Эксперимент при барических условиях проводили на установке AutoLab-500 компании «New England Research Inc».

Метод предусматривает определение скорости распространения продольной и двух поляризованных поперечных упругих волн при возбуждении ультразвуковых колебаний в образце породы. Направление вибрации для двух поперечных волн ориентируется на 90° друг к другу. Система позволяет проводить измерения в зависимости от давления обжима (горного) и внутриволнового давления [5]. Эксперимент проводился на полностью водонасыщенных образцах. Выборка для акустических исследований объекта разработки составила 50 образцов.

На рис. 4 приведено сопоставление скорости пробега продольной волны V_p при атмосферных и барических условиях. Соотношения характеризуются хорошей корреляцией.

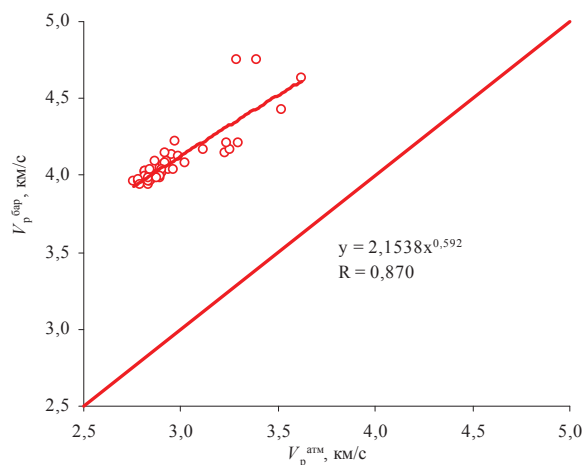


Рис. 4. Сопоставление скорости пробега продольной волны в поверхностных и барических условиях для образцов объекта

На рис. 5 приведены скорости пробега продольной волны от пористости при атмосферных и барических условиях. В обоих случаях наличествует тесная связь между этими параметрами. Во всем изученном интервале пористости в поверхностных условиях скорость волны значительно ниже, чем в приближенных к пластовым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудок Н.С., Богданович Н.Н., Мартынов В.Г. Определение физических свойств нефтесодержащих пород. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 592 с.
2. Дахнов А.В. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов. – М.: Недра, 1982. – 448 с.
3. Денисов С.Б., Евдокимов И.В., Ставинский П.В. Влияние термобарических условий на оценку запасов в терригенных и карбонатных отложениях // НТВ Каротажник. – 2009. – № 5 (182). – С. 3–13.

Кроме того построена зависимость скорости пробега волны при барических условиях $V_p^{\text{бар}}$ от коэффициента пористости при барических условиях, полученных для этих же образцов на установке АР-608.

Уравнения

$$V_p^{\text{бар}} = 2,3379K_{\text{по}}^{\text{атм}-0,2936}, \quad R=0,86;$$

$$V_p^{\text{бар}} = 2,3365K_{\text{по}}^{\text{бар}-0,2827}, \quad R=0,87;$$

$$V_p^{\text{бар}} = 2,1538V_p^{\text{атм}0,592}, \quad R=0,87$$

можно рекомендовать для пересчета измерений, полученных в поверхностных условиях, к барическим условиям.

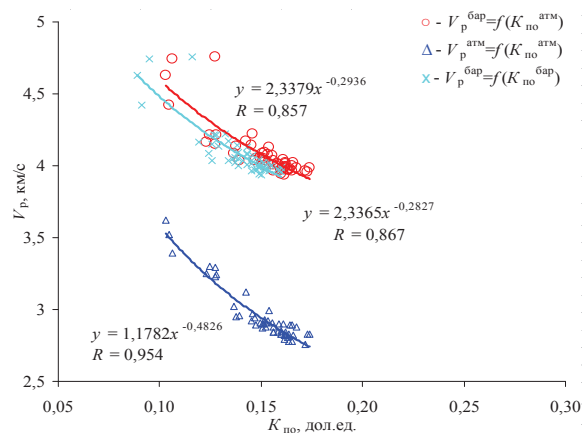


Рис. 5. Корреляционные зависимости скорости пробега продольной волны от пористости

Выводы

Впервые для терригенных коллекторов Северовенинского месторождения установлены тесные ядерные корреляционные зависимости пористости – как основной структурной и емкостной характеристики горных пород – с коэффициентом проницаемости, параметром пористости, скоростью пробега продольной волны с учетом барических условий. Приведены уравнения пересчета физических характеристик, замеренных в поверхностных условиях, на пластовые условия.

4. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. – М.: Наука, 1965. – 164 с.
5. Аноп А.А., Шемелин Ю.А., Раздобрева Н.И., Ледовская Т.И. Упругие характеристики коллекторов Крапивинского месторождения Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 106–108.

Поступила 31.05.2012 г.

УДК 622.276.6

ОЦЕНКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ГЛУШЕНИЯ

Д.Н. Мезенцев, Н.Г. Квеско

Томский политехнический университет,
E-mail: MezentsevDN@nipineft.tomsk.ru

Для образцов керна терригенного коллектора нефтяного месторождения Томской области выполнено лабораторное исследование изменения проницаемости по нефти при воздействии жидкостей глушения. Установлено, что применение воды сеноманского горизонта приводит к наибольшему падению проницаемости образцов. Применение добавки в составе жидкости глушения «Нефтенол-К» позволяет нивелировать отрицательный эффект и сохранить проницаемость.

Ключевые слова:

Жидкость глушения, продуктивный пласт, проницаемость, эксперимент.

Key words:

Sealing fluid, oil reservoir, permeability, lab test.

Актуальность работы связана с ухудшением фильтрационных характеристик околоскважинной зоны при проведении текущего ремонта скважин нефтяных месторождений с их предварительным глушением. Результаты лабораторных исследований, наряду с промысловыми данными, являются важным дополнением при изучении пластовых процессов и принятии решений для повышения эффективности разработки месторождений. Положительным фактором лабораторного эксперимента является возможность повторения опытов с одной и той же моделью пласта при различных условиях его проведения [1]. Достоверность результатов обусловлена применением образцов естественного керна и лабораторных установок, позволяющих моделировать пластовые условия [2–5]. Целью работы является оценка эффективности наиболее широко применяемых жидкостей глушения на территории Томской области.

Методика проведения эксперимента

Моделирование процессов глушения в пластовых условиях проводилось на специальных установках. Подготовительные этапы исследований проводятся согласно РД 39-0147710-218-86 [6] и заключаются в создании остаточной водонасыщенности в образце керна, загрузке в кернодержатель и формировании модели пласта.

По завершении подготовительных этапов образец выдерживается в течение 16–24 ч. при пластовых условиях. После выдержки определяется проницаемость K_0^i образца по нефти при прямой фильтрации на устанавливаемых последовательно перепадах давления 0,5; 1 и 3 атм.

Жидкость глушения фильтруется в обратном направлении при расходе до 0,1 см³/мин, в количестве не менее 3 поровых объемов и максимальном перепаде давления до 3 МПа. Затем образец выдерживается не менее 24 ч., после чего вновь определяется проницаемость K^i по нефти при прямой фильтрации на перепадах давления 0,5; 1 и 3 атм. Коэффициент восстановления проницаемости $K_{восст}$ рассчитывается по формуле:

$$\beta_i = \frac{K_1^i}{K_0^i},$$

где β_i – коэффициент восстановления проницаемости при ΔP_i ; K_0^i – проницаемость для нефти до воздействия жидкости глушения, мкм²; K_1^i – проницаемость для нефти после воздействия жидкости глушения, мкм².

В совокупности этапы «воздействие жидкости глушения», «вызов притока и измерение проницаемости» можно назвать циклом. Повторяя эти операции, можно моделировать процесс многоциклового глушения.

Объектом исследования служила коллекция из шести образцов керна с характерными для данного месторождения Томской области значениями пористости (16,8 %) и проницаемости ($36 \cdot 10^{-3}$ мкм²). В качестве базовой жидкости глушения использовалась чистая сеноманская вода и ряд добавок, наиболее широко применяемых на месторождениях Томской области. В качестве добавок применяли концентрат ГФ-1, РМД-5 и Нефтенол К.

При моделировании одного цикла глушения установлено, что оптимальными свойствами обладает жидкость глушения с добавкой «Нефтенол К» (рис. 1). Жидкость глушения с добавкой РМД-5 показала хорошие результаты по сохранению проницаемости независимо от перепада давления. Жидкость глушения с добавкой ГФ-1 восстанавливает проницаемость с ростом перепада давления.

Для моделирования многоциклового глушения для сравнения использовалась сеноманская вода с добавкой «Нефтенол К» и чистая сеноманская вода. Установлено, что проницаемость околоскважинной зоны при глушении сеноманской водой восстанавливается до первоначальных значений только после третьего цикла, а с применением добавки «Нефтенол К» восстановление и улучшение проницаемости наблюдается уже после первого цикла глушения (рис. 2, 3). Восстановление проницаемости также наблюдается с повышением перепада давления. Практически это означает, что при

повышенной депрессии на пласт возможно более быстрое восстановление проницаемости околоскважинной зоны.

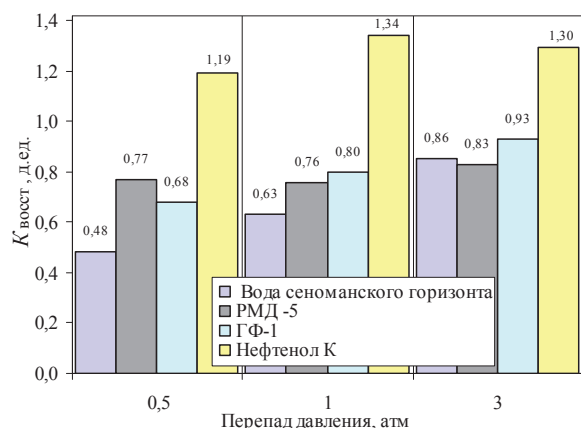


Рис. 1. $K_{восст}$ проницаемости по нефти при моделировании одного цикла глушения

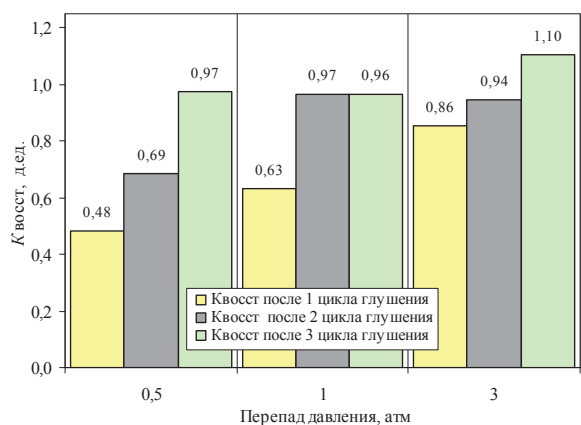


Рис. 2. $K_{восст}$ проницаемости по нефти при моделировании нескольких операций глушения водой сеноманского горизонта

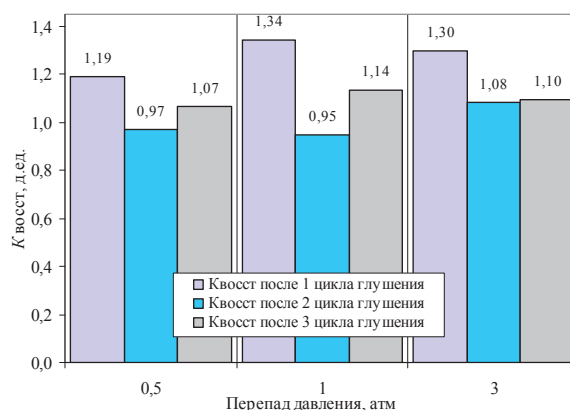


Рис. 3. $K_{восст}$ проницаемости по нефти при моделировании нескольких операций глушения водой сеноманского горизонта с добавкой Нефтенол К 0,5 %

Выводы

Наилучшие результаты из рассмотренных добавок к жидкости глушения для восстановления проницаемости околоскважинной зоны по нефти показал «Нефтенол К». Применение добавок РМД-5 и ГФ-1 также позволяет получить коэффициент восстановления проницаемости продуктивного горизонта на уровне 75 % по отношению к начальной проницаемости по нефти. Наихудшие результаты восстановления проницаемости околоскважинной зоны были получены применением чистой сеноманской воды. При увеличении депрессии негативный эффект глушения снижается, коэффициент восстановления проницаемости околоскважинной зоны составляет около 85 %. Суммируя вышесказанное, для снижения негативного влияния жидкости глушения на проницаемость околоскважинной зоны рекомендуется применять в качестве добавки «Нефтенол К».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиматулинов Ш.К. Физика нефтяного и газового пласта. – М.: Недра, 1971. – 312 с.
2. Амис Дж., Басс Д., Уайтинг Р. Физика нефтяного пласта. – М.: Госгостехиздат, 1962. – 572 с.
3. Рябоконт С.А. Технологические жидкости для заканчивания и ремонта скважин. – Краснодар: ООО «Просвещение-Юг», 2002. – 274 с.
4. Тиаб Дж., Доналдсон Эрл Ч. Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения

пластовых флюидов. – М.: ООО «Премиум Инжиниринг», 2007. – 868 с.

5. Мусабиров М.Х. Сохранение и увеличение продуктивности нефтяных пластов. – Казань: Изд-во «Фэн», 2007. – 422 с.
6. Единая отраслевая методика по определению в лабораторных условиях параметров, характеризующих коллекторские свойства пласта РД 39–0147710–218–86. – Москва, 1986. – 110 с.

Поступила 28.05.2012 г.

УДК 622.276

ОЦЕНКА ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ И ВНУТРИПЛАСТОВОГО ПЕРЕТОКА В ВЕРТИКАЛЬНО НЕОДНОРОДНОМ ПО ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫМ СВОЙСТВАМ ПЛАСТЕ

М.Е. Мартынов, Б.Б. Квеско, Е.Г. Карпова, А.Р. Квеско

Томский политехнический университет

* Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

E-mail: kveskobb@gmail.com

На основании анализа результатов гидродинамических исследований рассмотрен механизм оценки вертикальной проницаемости. При расчете параметров пласта использовалось классическое аналитическое решение для двухпластовых систем с допущением о псевдоустановившемся внутрипластовом перетоке. Оценены значения проницаемостей для каждого из пропластков при их совместном испытании.

Ключевые слова:

Фильтрационно-емкостные свойства, проницаемость, коллектор, анизотропия, кривая восстановления давления.

Key words:

Porosity and permeability properties, permeability, reservoir, anisotropy, pressure build-up curve.

Отложения мелководных и прибрежно-морских фаций характеризуются крайне неоднородным вертикальным строением. Для них свойственна вертикальная зональность в распределении фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС). При формировании регрессивных циклитов в песчаных отложениях наблюдается тренд увеличения зернистости/проницаемости вверх по разрезу. Распространена ситуация, когда продуктивный пласт можно условно разделить на 2 слоя: верхний – наиболее продуктивный, с повышенными ФЕС; и нижний – менее продуктивный, с проницаемостью в 10–15 раз меньше, чем у верхнего, который сформировался в более глубоководных, удаленных от береговой линии обстановках осадконакопления. Разработка таких пластов характеризуется тем, что основной приток флюида идет по наиболее проницаемому пропластку, а менее проницаемый, который может содержать значительную часть запасов, практически не вовлечен в работу. Извлечение этих запасов происходит в основном за счет внутрипластового вертикального перетока из нижнего пропластка в верхний. Очевидно, что в этом случае вертикальная проницаемость будет являться одним из ключевых факторов, влияющих на нефтеотдачу [1, 2].

Аналитические решения по оценке вертикальной проницаемости на неустановившихся режимах фильтрации были рассмотрены зарубежными авторами в работах [3–8]. К сожалению, в данных работах были рассмотрены только теоретические аспекты решения поставленной задачи. В работах [2, 9] приводятся реальные примеры интерпретации гидродинамических исследований с определением вертикальной проницаемости и внутрипластовых перетоков. Целью данной работы является обобщение опыта и имеющихся математических моделей внутрипластовых перетоков, применение математической модели к реальным данным, полученным на одном из месторождений Западной Сибири, и сравнение полученных результатов с данными, рассчитанными по другой методике.

Модель двухпластового коллектора

В двухпластовом коллекторе (рис. 1) каждый из пропластков характеризуется собственными параметрами: мощностью, пористостью, насыщенностью, сжимаемостью поровой системы, горизонтальной и вертикальной проницаемостями, скин-фактором. Верхний и нижний пропластки гидродинамически связаны между собой через проницаемый экран мощностью h_e и вертикальной проницаемостью k_{ve} . Проницаемый экран вводится с целью получения аналитического решения данной модели, в которой используются два основных допущения:

1. Горизонтальный поток флюида в каждом пропластке.
2. Псевдоустановившийся вертикальный переток между пропластками.

При совместной эксплуатации двух пропластков давление в верхнем просаживается быстрее, возникает перепад давления в вертикальном направлении и происходят внутрипластовые перетоки.

Описываемая модель является аналогом модели двойной пористости, которая используется для описания трещиноватых карбонатных коллекторов: две взаимодействующие между собой системы с различными характеристиками (система пор и трещин – для модели двойной пористости, верхний и нижний пропласток – для модели двухпластового коллектора). Переток из одной системы в другую происходит в псевдоустановившемся режиме. Существенное различие заключается в том, что в модели двойной пористости сделано допущение, что проницаемость одной из систем (пористый скелет породы) незначительна по сравнению с другой (проницаемость системы трещин). Это допущение необязательно для модели двухпластового коллектора, поэтому описываемую модель также называют моделью двойной пористости и двойной проницаемости. Основные параметры модели двухпластового коллектора:

1. Общая проводимость пласта: $kh = k_1 h_1 + k_2 h_2$.

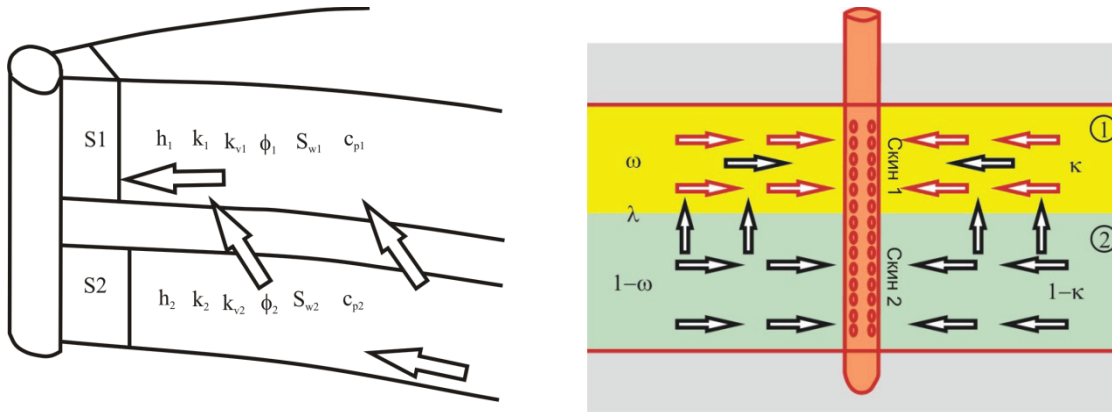


Рис. 1. Модель двухпластового коллектора. Верхний пропласток характеризуется повышенными ФЭС. 1, 2 – верхний и нижний пропластки соответственно; S_1, S_2 – скин-факторы верхнего и нижнего пропластков соответственно; h_1, h_2 – мощности верхнего и нижнего пропластков соответственно; k_1, k_2 – горизонтальные проницаемости верхнего и нижнего пропластков соответственно; k_{v1}, k_{v2} – вертикальные проницаемости верхнего и нижнего пропластков соответственно; ϕ_1, ϕ_2 – пористость верхнего и нижнего пропластков соответственно; c_{p1}, c_{p2} – сжимаемость верхнего и нижнего пропластков соответственно; ω – отношение проводимости верхнего пропластка к общей приводимости пласта; λ – отношение упругоэластичности верхнего пропластка к общей упругоэластичности пласта; κ – параметр течения в межслойном пространстве

2. Отношение проводимости верхнего пропластка к общей проводимости пласта:

$$\kappa = \frac{k_1 h_1}{k_1 h_1 + k_2 h_2}.$$

3. Скин-фактор для каждого из пропластков: S_1 и S_2 .
4. Общая упругоэластичность пласта:

$$(\varphi c_t) = \frac{(h \varphi c_t)_1 + (h \varphi c_t)_2}{h_1 + h_2}.$$

5. Отношение упругоэластичности верхнего пропластка к общей упругоэластичности пласта:

$$\omega = \frac{(h \varphi c_t)_1}{(h \varphi c_t)}.$$

6. Параметр течения в межслойном пространстве, который описывает фильтрационные свойства между пропластками:

$$\lambda = \frac{r_w^2}{kh} \cdot \frac{2}{\frac{2h_e}{k_{ve}} + \frac{h_1}{k_{v1}} + \frac{h_2}{k_{v2}}}.$$

Если проницаемый экран между двумя пропластками ограничивает переток, то h_e/k_{ve} принимает большее значение по сравнению с h_1/k_{v1} и h_2/k_{v2} , и параметр λ в этом случае используется для оценки вертикальной проницаемости экрана:

$$k_{ve} = \frac{kh}{r_w^2} h_e \lambda.$$

Для оценки вертикальной проницаемости пласта рассмотрим частный случай, когда $h_e=0$. Принимая равным $k_{v1}=k_{v2}=k_v$, λ используется для оценки анизотропии проницаемости пласта [2]:

$$\frac{k_v}{k_h} = \frac{1}{2} \frac{h^2}{r_w^2} \lambda,$$

Аналитические решения данной модели с учетом введенных параметров, допущений, различных начальных и граничных условий были получены многими авторами [3–8] и в данной статье не рассматриваются. Полученные решения успешно реализованы в современных компьютерных программах интерпретации гидродинамических исследований скважин (ГДИС). Пример интерпретации рассмотрен далее.

Пример интерпретации гидродинамических исследований скважин

На скважине К41 одного из месторождений Западной Сибири были проведены гидродинамические исследования на неустановившемся режиме фильтрации путем записи кривой восстановления давления. Перед проведением исследований скважина работала на установившемся режиме с дебитом нефти 229 м³/сут. без водопроявлений. Скважина перфорирована практически на всю мощность ($h_{перф}=13,8$ м) продуктивного пласта Ю₁². Анализируя априорную геологическую информацию в разрезе пласта Ю₁² васюганской свиты, были выделены два пропластка (рис. 2), которые существенно различаются по характеристикам ФЭС и гранулометрическому составу.

Продуктивный пласт Ю₁² формировался на фоне общей регрессии моря. Верхняя часть пласта представлена отложениями приливно-отливных отмелей и дельт, нижняя – приливных каналов. В последних двух колонках на рис. 2 приведена проницаемость, рассчитанная по петрофизическим зависимостям и по керну.

Верхний пропласток Ю₁^{2a}, на основе проведенного литолого-фациального анализа, сформировался в условиях приливно-отливных дельт и отмелей. Его отложения представлены средне-мелкозернистыми светло-серыми песчаниками, значе-

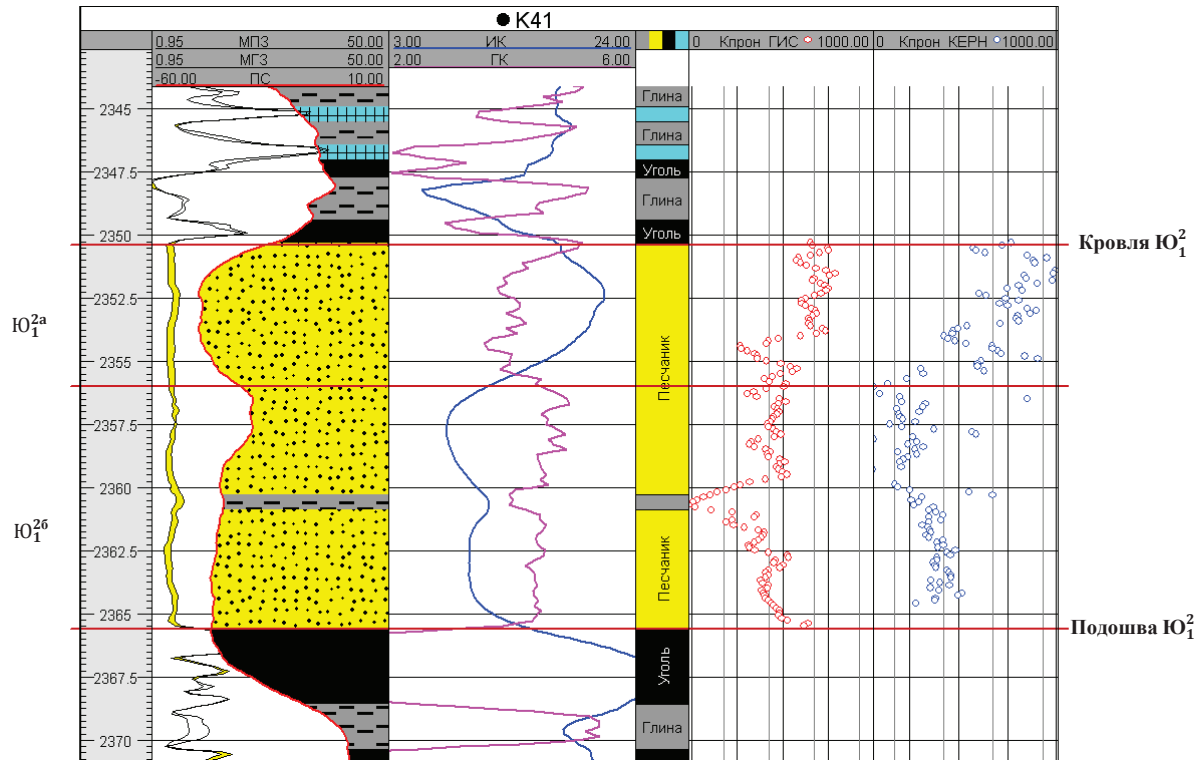


Рис. 2. Фрагмент геолого-геофизического разреза (скважина K41, Западная Сибирь) продуктивного пласта Ю₁². ИК – индукционный каротаж, ГК – гамма-каротаж, ПС – кривая самопроизвольной поляризации, МГЗ – микроградиент зонд, МПЗ – микропотенциал зонд

ния открытой пористости 16...22 %, газопроницаемость по керну изменяется в пределах от 121 до 499 мД, карбонаты отсутствуют, остаточная водонасыщенность изменяется в диапазоне от 18 до 26 %. Нижний пропласток Ю₁²⁶ сформировался в условиях приливных каналов. Его отложения представлены мелкозернистыми, массивными, среднесцементированными песчаниками с пониженными и низкими фильтрационно-емкостными свойствами. Для пропластков с пониженными ФЕС открытая пористость изменяется в пределах от 16 до 19 %, газопроницаемость по керну 13–58 мД, карбонаты отсутствуют, остаточная вода составляет 47...52 %. В песчаниках с низкими параметрами значения открытой пористости изменяются от 12 до 16 %, а коэффициент проницаемости по газу составляет 1–10 мД. В этих коллекторах отмечается наличие карбонатов от 1 до 3 %, остаточной воды в них содержится от 50 до 57 %.

Выделенная вертикальная неоднородность пласта подтверждена также и результатами промыслово-геофизических исследований. Исследования по записи профиля-притока показывают, что 84 % основного притока в скважину идет по наиболее проницаемому верхнему пропластку. При запуске такой скважины в работу в начальный момент времени отсутствия перепада давления между пропластками система действует как два однородных пласта при отсутствии перетока между ними. При дальнейшей работе скважины более проницаемый

пропласток работает активнее, начинает проявляться перепад давления между пропластками и, соответственно, переток между ними. Этот переходный процесс характеризуется отклонением кривой производной давления вниз на диагностическом графике. Выделение переходного процесса (так называемая «седловина» или «яма» на кривой производной давления) является основной сложностью при интерпретации.

Наиболее четко переходный процесс проявляется при большом контрасте ФЕС пропластков (рис. 3). Когда $\kappa=1$, проницаемость нижнего пропластка равна 0 и поведение системы полностью соответствует модели двойной пористости. Менее проницаемый пропласток представляет матрицу, приток из которой возможен при вскрытии наиболее проницаемого пропластка – трещины. Значение $\kappa=0$ соответствует поведению однородного пласта. Также глубину отклонения производной вниз контролируют еще 2 параметра системы двойной проницаемости – λ и ω , которые были описаны выше. Аналогичный отклик давления наблюдается и при остановке скважины после работы [10, 11].

Исторический график, отображающий давление в призабойной зоне скважины K41 во время проведения исследований, представлен на рис. 4. Время записи кривой восстановления давления (КВД) составило 72 часа. Перед закрытием на КВД-2 скважина работала с устойчивым дебитом нефти 229 м³/сут на штуцере $d=10$ мм без водопрото-

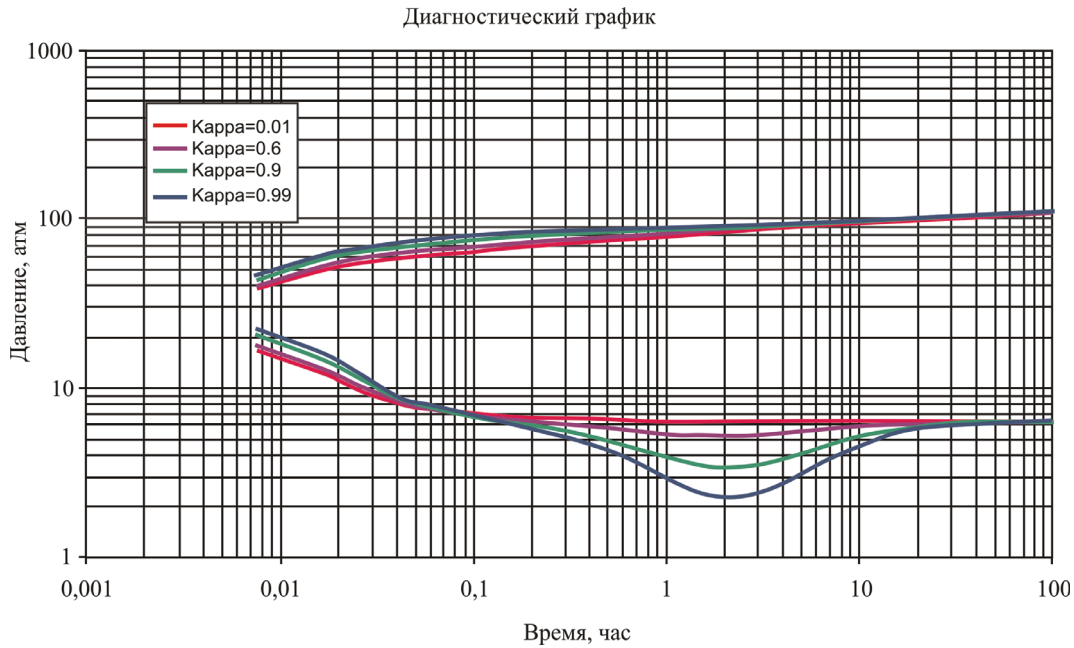


Рис. 3. Анализ чувствительности модели двухпластового коллектора при различных значениях параметра k

явлений. Интерпретация представляла собой подбор адекватных моделей пласта и призабойной зоны исследуемой скважины, последующее их сопоставление и настройку на фактические данные. В рассматриваемом случае на основании имеющейся исходной геологической информации использовалась модель двухпластового коллектора (модель двойной пористости и двойной проницаемости).

Исходные данные для интерпретации ГДИС приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для интерпретации ГДИС

| | |
|---|----------|
| Перфорированная мощность пласта, м | 13,8 |
| Мощность верхнего пропластка, м | 4 |
| Радиус скважины, м | 0,108 |
| Пористость | 0,155 |
| Вязкость нефти, сП | 0,15 |
| Объемный коэффициент нефти, м ³ /м ³ | 1,8 |
| Общая сжимаемость системы «флюид-порода», 1/(кг/см ²) | 4,44E-04 |

Диагностический график КВД-2 с выделенными характерными режимами течения представлен на рис. 5.

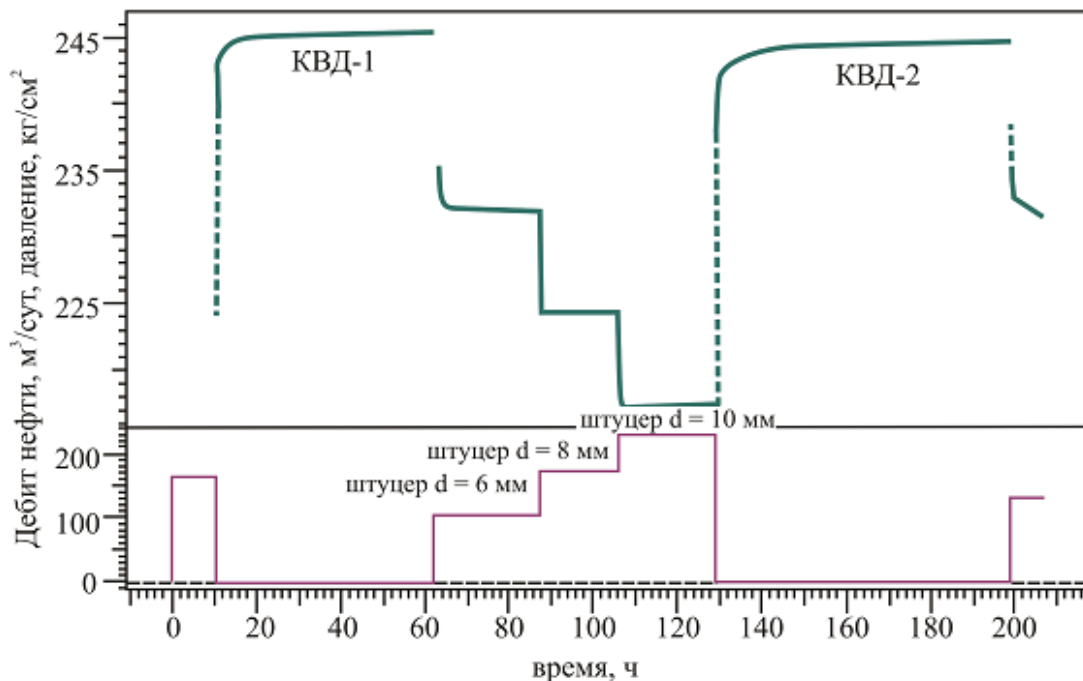


Рис. 4. Исторический график изменения забойного давления и дебита при проведении ГДИС на скважине К41

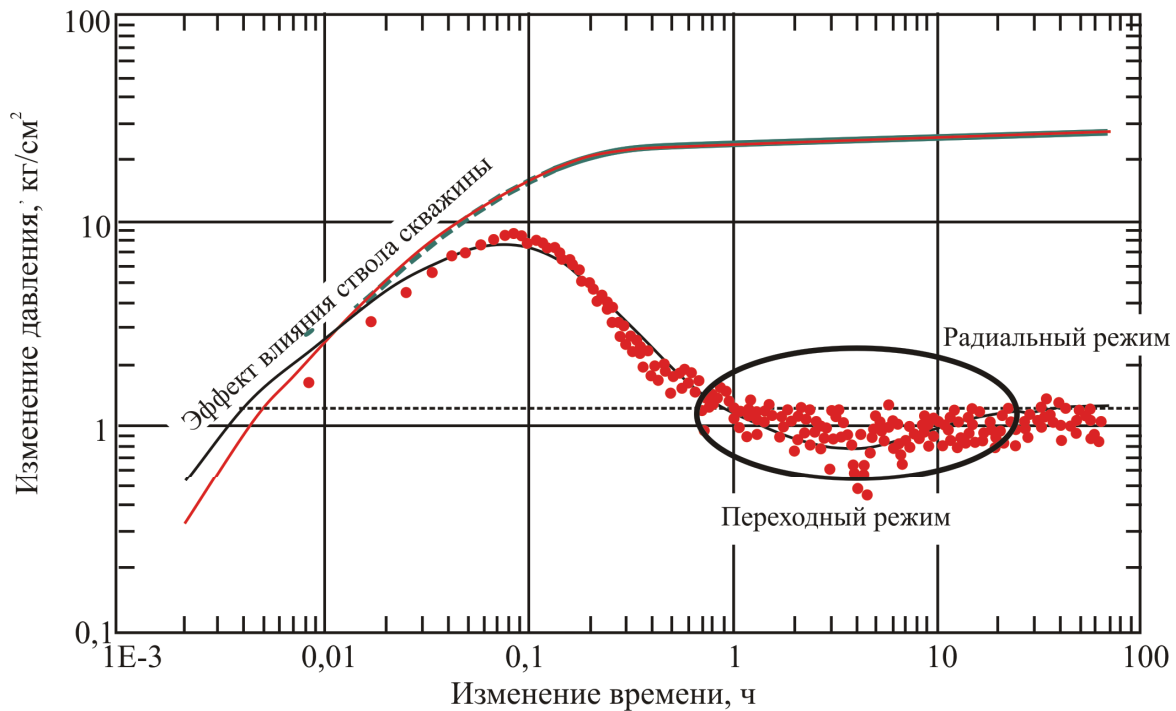


Рис. 5. Диагностический график кривой восстановления давления (верхняя кривая) и ее производной (нижняя кривая)

В начальный период времени наблюдается эффект влияния ствола скважины (ВСС), так как закрытие скважины осуществлялось на устье. После окончания эффекта ВСС на графике производной давления можно выделить характерную «яму» или «седловину», соответствующую переходному режиму, когда происходит перераспределение давления из верхнего пропластка в нижний. Времени закрытия скважины – 72 ч – достаточно для выхода на радиальный режим.

Результаты интерпретации представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты интерпретации ГДИС

| | | |
|--|------------|--------|
| Коэффициент влияния ствола скважины, C , $\text{м}^3/(\text{кг}/\text{см}^2)$ | 0,06 | |
| Отношение проводимости верхнего пропластка к общей проводимости пласта, ω | 0,11 | |
| Отношение упругости верхнего пропластка к общей упругости пласта, λ | 1,3E-06 | |
| Параметр течения в межслойном пространстве, κ | 0,75 | |
| Интерполированное пластовое давление, P_i , $\text{кг}/\text{см}^2$ | 245,4 | |
| | Пропластки | |
| | Верхний | Нижний |
| Скин-фактор, S | 6,8 | 2,0 |
| Проницаемость, k , мД | 148,0 | 20,8 |
| Вертикальная проницаемость, k_v , мД | 1,5 | 0,2 |

Полученные значения горизонтальных проницаемостей хорошо согласуются с результатами лабораторных измерений ФЕС на керне. По результатам статистических расчетов среднеарифметическая проницаемость по керну для верхнего пропластка

составляет 162 ± 27 мД (с учетом доверительного интервала на основании необходимого количества образцов), для нижнего – 15 ± 7 мД. Лабораторные измерения вертикальной проницаемости не проводились. Если в гидродинамической модели при расчетах не учитывать вертикальные перетоки или использовать значения вертикальной проницаемости, рассчитанной по коэффициенту анизотропии (как отношение арифметической проницаемости к гармонической), то это может привести к существенным ошибкам. Так, рассчитанные вертикальные проницаемости по коэффициенту анизотропии составляют 4 и 2,5 мД для верхнего и нижнего пропластков соответственно, и они гораздо больше полученных по ГДИС значений 1,5 мД и 0,2 мД.

Заключение

Используя модель двухпластового коллектора при интерпретации, удалось оценить проницаемости каждого из пропластков вертикально неоднородного по ФЕС пласта. Для сравнения полученная проницаемость при интерпретации с использованием модели однородного пласта равна 67 мД. Если посчитать среднеарифметическую взвешенную по мощности проницаемость для двух пропластков с $k_1=148$ мД, $h_1=4$ м и $k_2=20,8$ мД и $h_2=9,8$ м, то $k_{cp}=57$ мД. Полученные результаты хорошо согласуются между собой. Использование селективных значений проницаемости позволяет более корректно описать ФЕС пласта как для петрофизических зависимостей «пористость–проницаемость» и последующего распределения проницаемости в геологической модели, так и при сравнении с результатами измерения проницаемости по керну.

Также включение в модель вертикальных проницаемостей, оцененных по ГДИС, позволит корректно учесть вертикальные внутрипластовые перетоки, которые значительно влияют на поведение пласта при гидродинамическом моделировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bourdarot G. Well Testing: Interpretation Methods. – Paris: Editions Technip, 1998. – 337 p.
2. Boutaud J.L., Deboaisne R.M., Thibeau S. Heterogeneous Formation: Assessment of Vertical Permeability Through Pressure Transient Analysis – Field Example // Paper SPE 36530. – 1996. – 10 p.
3. Ehlig-Economides C.A., Joseph J.A. A New Test for Determination of Individual Layer Properties in a Multilayered Reservoir // Paper SPE 261. – 1987. – 6 p.
4. Sun H., Liu L., Zhou F., Gao C. Exact Solution of Two Layer Reservoir with Crossflow under Constant Pressure Condition // Paper SPE 81043. – 2003. – 12 p.
5. Al-Ajmi N.M., Kazemi H., Ozkan E. Estimation of Storativity Ratio in a Layered Reservoir with Crossflow // Paper SPE 84294. – 2003. – 8 p.
6. Gomes E., Ambastha A.K. An Analytical Pressure-Transient Model for Multilayered, Composite Reservoirs with Pseudosteady-State Formation Crossflow // Paper SPE 26049. – 1993. – 14 p.
7. Larsen L. Determination of Skin Factors and Flow Capacities of Individual Layers in Two-Layered Reservoirs // Paper SPE 11138. – 1982. – 12 p.
8. Eissa M., Joshi S., Singh K., Bahuguna A., Elbadri M. Identifying Layer Permeabilities and Skin Using a Multi-Layer Transient Testing Approach in a Complex Reservoir Environment // Paper SPE 116969. – 2008. – 9 p.
9. Bidaux P., Whittle T.M., Coveney P.J., Gringarten A.C. Analysis of Pressure and Rate Transient Data From Wells in Multilayered Reservoirs: Theory and Application // Paper SPE 24679. – 1992. – 17 p.
10. Узе О., Витура Д., Фьярэ О. Анализ динамических потоков: Теория и практика интерпретации данных ГДИС и анализа добычи, а также использование данных стационарных глубинных манометров. – М.: КАРРА, 1998. – 359 с.
11. Мангазеев П.В., Панков М.В., Кулагина Т.Е., Камарудинов М.Р. Гидродинамические исследования скважин. – Томск: Центр профессиональной переподготовки специалистов нефтегазового дела, 2003. – 811 с.

За оказанную помощь и содействие при написании данной статьи авторы выражают огромную благодарность кандидату геолого-минералогических наук, доценту кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Томского политехнического университета Александре Викторовне Ежовой, а также директору ООО «Полигон-ТЭ» Любови Юрьевне Зубовой.

Поступила 22.11.2011 г.

УДК 543.38:543.51

УГЛЕВОДОРОДЫ И КИСЛОРОДООРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР АЛТАЯ И ХАКАСИИ

О.В. Серебренникова^{1,2}, И.В. Русских¹, Е.В. Гулая¹, Е.Б. Стрельникова¹, П.Б. Кадычагов¹

¹Институт химии нефти СО РАН, г. Томск

²Томский политехнический университет

E-mail: rus@ipc.tsc.ru

Методами ИК- и хроматомасс-спектрометрии исследовано распределение органических соединений в донных отложениях озер Алтая и Хакасии. Состав и содержание отдельных групп углеводородов и кислородсодержащих соединений свидетельствуют не только о природных, но и об антропогенных факторах образования органической составляющей донных отложений.

Ключевые слова:

Органические соединения, донные отложения, ИК-спектрометрия, хроматомасс-спектрометрия, нефтяные углеводороды, n-алканы, полициклические ароматические углеводороды, кислородорганические соединения.

Key words:

Organic compounds, bottom sediments, IR-spectrometry, gas chromatography mass spectrometry, oil hydrocarbons, n-alkanes, polycyclic aromatic hydrocarbons, organic compounds of oxygen.

Введение

Промышленное развитие юга Сибири, а также существенный рост количества автотранспорта, расширение сети автодорог вблизи населенных пунктов и мест отдыха значительно увеличили поступление загрязненных стоков в реки и озера этого региона. Различные загрязняющие вещества, в том числе органические соединения, оказывают влияние на экологическое состояние водоемов, снижают способность вод к насыщению кислородом. Кроме того, органические вещества, содержащиеся в сточных водах, попадая в водоёмы или скапливаясь в почве, могут проникать в живые организмы, способствуя возникновению различных заболеваний. В связи с вышесказанным необходимость исследования экологического состояния водных объектов с последующим их мониторингом очевидна. Особое внимание при этом следует направить на объекты окружающей среды, обладающие лечебными свойствами и, таким образом представляющие большую ценность для человека. К таким объектам относятся многочисленные солёные и пресные озера Республик Алтай и Хакасия. Известно, например, что минеральная вода озера Шира используется в медицинской практике для лечения многих хронических заболеваний, од-

нако за последние десятилетия отмечается ухудшение естественного режима всех компонентов озера под воздействием антропогенных факторов.

В литературе приводятся результаты детального изучения органической составляющей водных объектов некоторых регионов России. Так, в статье [1] авторы определяют основные нефтяные компоненты (углеводороды и смолистые вещества), парафиновые углеводороды ($C_{14}-C_{36}$) и полициклические ароматические углеводороды в воде и донных отложениях юго-восточного района Азовского моря. Существуют допустимые уровни концентраций загрязняющих веществ в донных отложениях водоемов [2], превышение которых опасно для жизнедеятельности биологических объектов. Исследован состав органических примесей в водных объектах Сибири: в пресных природных водах бассейнов рек Томи, Верхней и Средней Оби [3–5], в воде озер Хакасии [6, 7]. В работе [8] предложена классификация донных отложений рек Томской области по содержанию нефтепродуктов, предназначенная для проведения оценки антропогенного воздействия на окружающую среду. Органические соединения, входящие в состав донных отложений озер Сибири, мало изучены, что определяет актуальность представленной работы.

Объекты и методы исследования

Пробы донных отложений озер горного Алтая и Хакасии были отобраны в 2010 г. Схема отбора проб приведена на рис. 1. Для определения суммарного содержания углеводов в донных отложениях озер использовали метод ИК-спектрометрии. Спектры регистрировали на ИК-Фурье спектрометре Nicolet 5700 (разрешение 4 см^{-1} , число сканов пробы 64) в диапазоне $3100...2700 \text{ см}^{-1}$ в кюветах из NaCl с толщиной поглощающего слоя 10 мм. Экстракцию углеводов из донных осадков осуществляли CCl_4 непосредственно сразу после отбора проб по методике [9]. Концентрацию углеводов для каждой пробы определяли по двум параллельным измерениям.

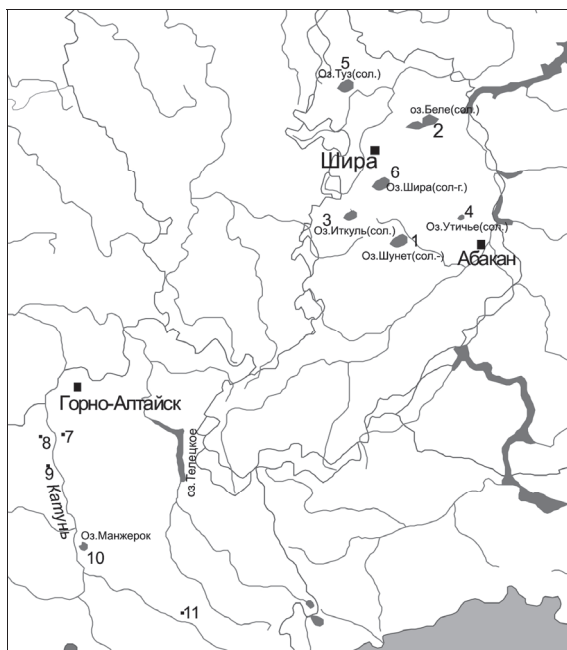


Рис. 1. Схема отбора проб донных отложений озер Алтая и Хакасии: цифрами обозначены номера проб. Масштаб 1:4000000

Состав органических соединений, выделенных трёхкратной последовательной экстракцией хлороформом из донных осадков, анализировали методом хроматомасс-спектрометрии. Работа выполнена с использованием магнитного хроматомасс-спектрометра DFS фирмы «Thermo Scientific» (Германия) с кварцевой капиллярной хроматографической колонкой фирмы «Thermo Scientific» внутреннего диаметром 0,25 мм, длиной 30 м, неподвижной фазой TR-5MS толщиной 0,25 мкм. Режим работы хроматографа: газ-носитель – гелий, температуры испарителя и интерфейса – $250 \text{ }^\circ\text{C}$; программа нагрева термостата: $t_{\text{нач}}=80 \text{ }^\circ\text{C}$, изотерма – в течение 2 мин, нагрев со скоростью 4 град/мин до $t_{\text{макс}}=300 \text{ }^\circ\text{C}$. Режим работы масс-спектрометра: метод ионизации – электронный удар; энергия ионизирующих электронов 70 эВ; температура ионизационной камеры $250 \text{ }^\circ\text{C}$; диапазон регистрируемых масс 50–500 Да; длительность развертки спектра 1 с.

Индивидуальные соединения идентифицировали по полным масс-спектрам, для этого использовали данные, имеющиеся в литературе, а также компьютерную библиотеку масс-спектров NIST-5, насчитывающую более 163 тыс. наименований.

Результаты и их обсуждение

Поступление органических веществ со стоками и из атмосферы, перенос твердых частиц течением, процессы сорбции и десорбции, а также диссипация под действием речной биоты, солнечной радиации и т. д., которые происходят в озерах, в большей степени отражаются на составе донных отложений, чем на составе воды. Поскольку водная среда является очень динамичной системой, то состав органических компонентов в ней может быстро меняться в широких пределах как качественно, так и количественно. Озерные отложения по сравнению с водной средой и речными осадками находятся в относительном покое, в этом случае процессы аккумуляции того, что попадает в воду с промышленными и бытовыми стоками, а также воздушным переносом, значительно превалируют над процессами вымывания. Донные осадки способны накапливать различные примеси как антропогенного, так и биогенного характера.

Суммарное содержание углеводов в донных отложениях, определенное методом [9] без разделения их на антропогенные и продуцируемые живыми организмами, лежит в диапазоне $0,024...0,124 \text{ г/кг}$. В семи пробах из одиннадцати их содержание превышает ДК в 1,2...2,5 раз. Результаты определения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Концентрации углеводов в донных отложениях озер

| Номер пробы | Озеро | Концентрация*, г/кг |
|-------------|----------------------------|---------------------|
| Хакасия | | |
| 1 | Шунет | $0,061 \pm 0,015$ |
| 2 | Белё | $0,033 \pm 0,008$ |
| 3 | Иткуль | $0,024 \pm 0,006$ |
| 4 | Утичьё | $0,094 \pm 0,023$ |
| 5 | Тус | $0,124 \pm 0,031$ |
| 6 | Ши́ра | $0,024 \pm 0,006$ |
| Алтай | | |
| 7 | Каимское | $0,070 \pm 0,018$ |
| 8 | Ая | $0,050 \pm 0,013$ |
| 9 | Сорокинское | $0,110 \pm 0,028$ |
| 10 | Манжерок | $0,090 \pm 0,023$ |
| 11 | Озеро 2 км западнее оз. Ая | $0,038 \pm 0,010$ |

*Допустимая концентрация составляет $0,050 \text{ г/кг}$ [2].

Низкий уровень загрязнения донных отложений оз. Иткуль объясняется как ограничениями по его использованию, так и характером и дисперсностью донной подложки этого озера – каменистой, обладающей слабой способностью к сорбции органических компонентов. Каменистое и песчаное дно характерно также для озер Белё и Ши́ра, уровень загрязнения в которых тоже невысокий. Кроме того, все эти три озера являются достаточно большими по площади водного зеркала

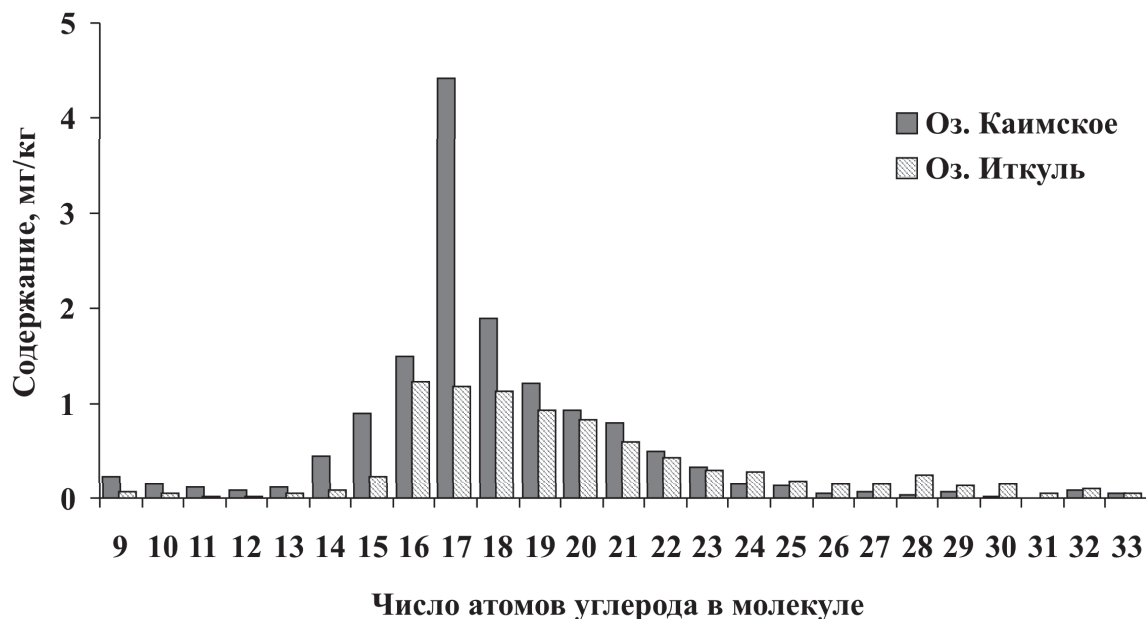


Рис. 2. Молекулярно-массовое распределение n-алканов в донных отложениях озер Каимское и Иткуль

(23...75 км²) и глубокими (максимальная глубина 17...48 м), что также способствует сносу и рассредоточению загрязнений. Остальные исследуемые озера небольшие по площади, глубина их не превышает 2...3 м, что способствует прогреву толщи воды в летний период, а это, в свою очередь, ведет к росту и размножению биопродуцентов. Глинистое дно озер, характеризующееся высокой адсорбционной способностью, также благоприятствует накоплению в донных осадках органических компонентов. Этим объясняется повышенное количество углеводородов в озерах Шунет, Утичье, Каимское, Сорокинское, Манжерок и Тус.

Результаты анализа группового состава органических соединений, присутствующих в донных отложениях исследуемых озер, приведены в табл. 2.

Содержание углеводородов по сравнению со всеми остальными идентифицированными органическими соединениями больше как по качественному, так и по количественному составу. Наибольший вклад в общее количество органической составляющей донных отложений вносят нормальные алканы, содержание в исследуемых пробах этих углеводородов находится в интервале 1,235...7,060 мг/кг. Максимальное содержание n-алканов в донных отложениях исследуемой тер-

Таблица 2. Групповой состав органических соединений в пробах донных отложений озер, мг/кг

| Соединения | Озеро | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|----------|-------|-------------|----------|-----------------------------|--|
| | Шунет | Белё | Иткуль | Утичье | Тус | Шира | Каимское | Ая | Сорокинское | Манжерок | Озеро, 2 км западнее оз. Ая | |
| Ал | 2,362 | 2,926 | 4,346 | 2,118 | 3,693 | 1,235 | 7,06 | 3,916 | 2,481 | 2,95 | 3,709 | |
| ЦГ | 0,259 | 1,203 | 0,194 | 0,214 | 0,036 | 0,01 | 0,304 | 0,102 | 0,173 | 0,147 | 0,267 | |
| Ст | 0 | 0 | 0,016 | 0 | 0 | 0,005 | 0,004 | 0 | 0,009 | 0,004 | 0 | |
| Г | 0 | 0,003 | 0,055 | 0 | 0 | 0,005 | 0,004 | 0 | 0,016 | 0,005 | 0 | |
| n-АБ | 0,048 | 0,054 | 0,036 | 0,055 | 0,061 | 0,031 | 0,117 | 0,101 | 0,092 | 0,105 | 0,158 | |
| Н | 0,107 | 0,317 | 0,008 | 0,06 | 0,312 | 0,021 | 0,257 | 0,281 | 0,138 | 0,139 | 0,236 | |
| БФ | 0,031 | 0,221 | 0,004 | 0,031 | 0,058 | 0,015 | 0,08 | 0,106 | 0,045 | 0,081 | 0,021 | |
| Фе | 0,026 | 0,201 | 0,031 | 0,056 | 0,027 | 0,022 | 0,065 | 0,06 | 0,047 | 0,098 | 0,081 | |
| ПАУ* | 0,013 | 0,022 | 0,013 | 0,009 | 0,013 | 0,004 | 0,015 | 0,022 | 0,012 | 0,053 | 0,014 | |
| КК | 0,756 | 0,508 | 0,279 | 1,552 | 2,216 | 0,468 | 1,982 | 2,496 | 2,283 | 1,667 | 2,735 | |
| МЭ | 0,054 | 0,069 | 0,101 | 0,147 | 0,176 | 0,048 | 0,132 | 0,207 | 0,129 | 0,079 | 0,229 | |
| ИпЭ | 0,029 | 0,038 | 0,024 | 0,043 | 0,054 | 0,026 | 0,052 | 0,051 | 0,032 | 0,033 | 0,015 | |
| Ке | 0,178 | 0,036 | 0,029 | 0,196 | 0,305 | 0,066 | 0,139 | 0,244 | 0,138 | 0,161 | 0,335 | |
| Т | 0,063 | 0 | 0 | 0,069 | 0,375 | 0 | 0,005 | 0,069 | 0,048 | 0,018 | 0,035 | |
| С | 0,079 | следы | 0 | 0,128 | 0,22 | следы | 0,004 | 0,101 | 0,055 | 0,033 | 0,056 | |
| Фо | 0,019 | 0,024 | 0,025 | 0,018 | 0,038 | 0,01 | 0,032 | 0,021 | 0,017 | 0,011 | 0,009 | |

Ал – алканы; ЦГ – циклогексаны; Ст – стераны; Г – гопаны; n-АБ – n-алкилбензолы; Н – нафталины; БФ – бифенилы; Фе – фенантроны; ПАУ* – полициклические ароматические углеводороды; КК – карбоновые кислоты; МЭ – метиловые эфиры; ИпЭ – изопропиловые эфиры; Ке – кетоны; Т – эфиры и спирты терпеноидного строения; С – эфиры и спирты стероидного строения; Фо – фосфаты. * Допустимая концентрация составляет 1 мг/кг [2].

ритории обнаружено в пробах Каимского озера, а минимальная концентрация определена в донных отложениях озера Шира. В качестве примера на рис. 2 приведено молекулярно-массовое распределение *n*-алканов в донных отложениях Каимского озера, характерное для всех проб, за исключением озера Иткуль.

Достаточно высокие количества *n*-алканов обнаружены в пробе, отобранной на озере Иткуль (4,347 мг/кг), в то же время в нем обнаружены минимальные количества ароматических углеводородов и кислородных соединений, отсутствуют биологические стероиды и терпеноиды (табл. 2). Это можно объяснить тем, что в пресном глубоком озере с каменистой подложкой отсутствует растительность, затруднена жизнедеятельность микроорганизмов. Одновременно высокое содержание углеводородов терпанового и стеранового ряда и в первую очередь их состав, характерный для нативных нефтяных систем, позволяют предположить глубинный источник флюидов, поставляющий углеводороды в осадки этого озера.

Отличительной особенностью донных отложений соленого озера Тус является высокая концентрация алканов и кислородсодержащих соединений, в частности стероидов, включающих станолы, стеролы и станоны состава C_{27} – C_{29} , и терпеноидов C_{29} – олеаненонов, олеаненолов и лупенона (рис. 3). Содержание кислот в осадках озера близко к количеству алканов. Это может объясняться тем, что в неглубоком соленом глинистом водоеме с илистым дном высока степень консервации попадающих в осадок биомолекул и органические компоненты осадка имеют преимущественно биогенный источник. Аналогичный вывод можно сделать также по донным отложениям озера Утичь и Ая.

Максимальная концентрация циклогексанов зафиксирована в донных отложениях озера Белё (1,203 мг/кг), что характерно для свежего нефтяного загрязнения. Известно, что циклогексаны входят в состав бензинов и топлив, источником которых является автомобильный и водный транспорт.

В донных отложениях озер среди ароматических соединений были идентифицированы моноарены, изоалкилбензолы, биарены (нафталины), триарены (фенантрены) и тетрациклические углеводороды (флуорантены, пирены и хризены), табл. 2. В большинстве исследуемых проб среди аренов преобладают нафталины, фенантрены, алкилбензолы. Максимальной концентрацией ароматических углеводородов характеризуется озеро Манжерок, тогда как минимальное их количество содержится в озере Шира. Повышенной концентрацией ароматических углеводородов характеризуются озера Тус и Белё, в них в равном с нафталинами количестве присутствуют фенантрены и полициклические ароматические углеводороды. Минимальное содержание таких углеводородов было обнаружено в донных отложениях озера Утичь, основными представителями ароматических углеводородов в нем являются фенантрены.

В составе ароматических соединений не обнаружены перилен и бензпирен, которые в значительных количествах входят в состав промышленных выбросов находящихся рядом предприятий Кузбасса и являются основными загрязнителями канцерогенного действия. Это объясняется благоприятной для данного региона розой ветров и относительно высоким его расположением над уровнем моря. В исследованных донных отложениях концентрации ретена, флуорантена и пирена малы (0,0003...0,04 мг/кг), что также свидетельствует о незначительном техногенном загрязнении водое-

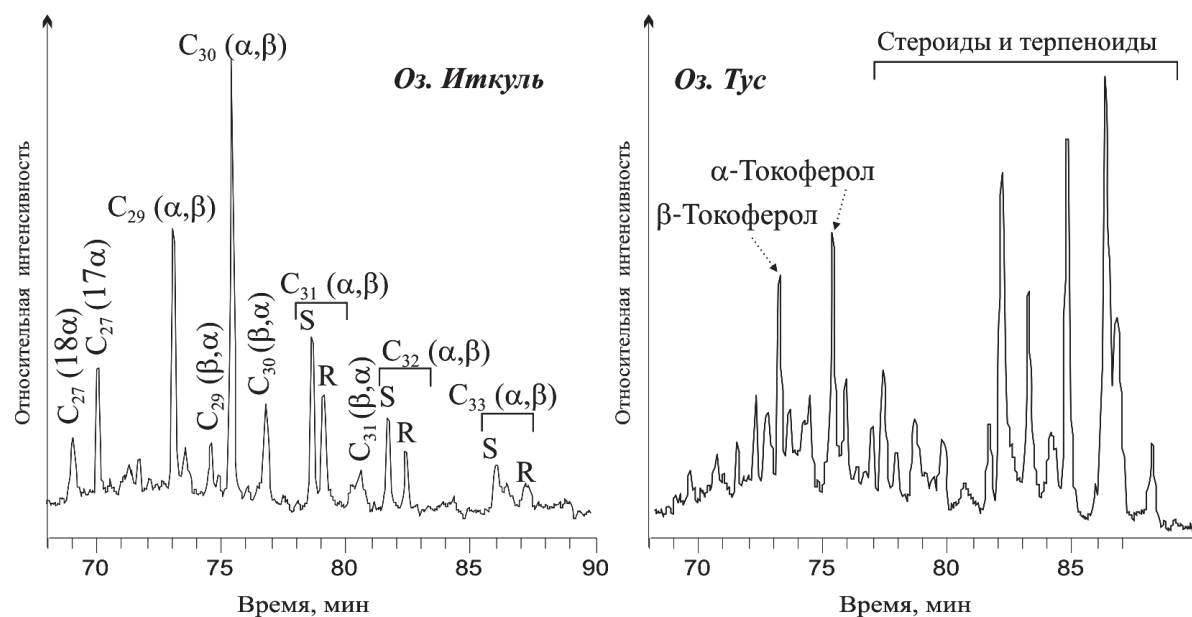


Рис. 3. Участок масс-фрагментограммы по $m/z=191$ органических соединений, экстрагированных из донных осадков озер Иткуль и Тус: C_{27} , C_{29} – C_{33} – гопаны нефтяного ряда

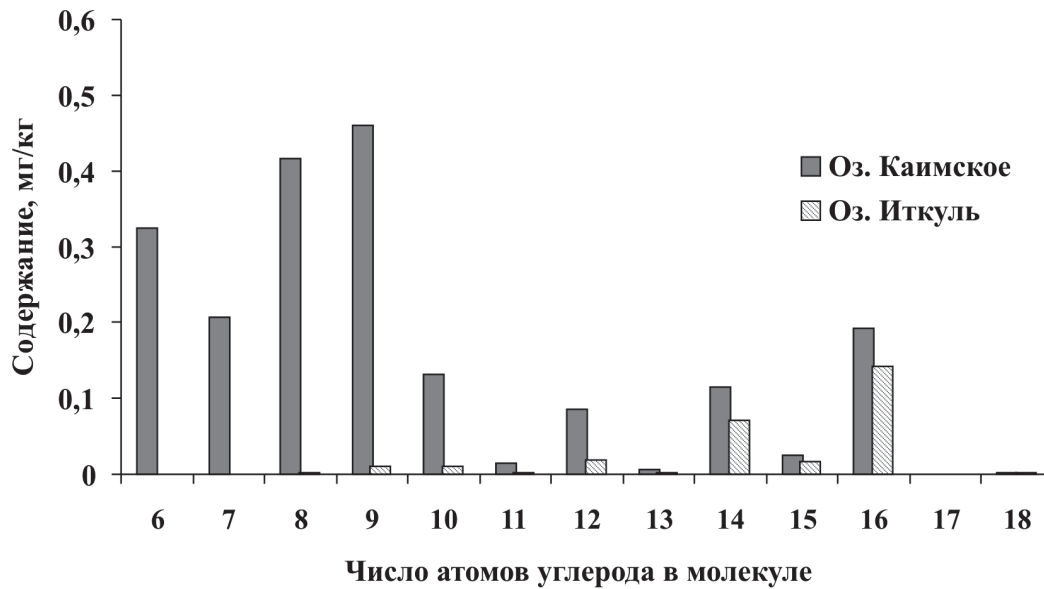


Рис. 4. Молекулярно-массовое распределение жирных кислот в донных отложениях озер Каимское и Иткуль

мов [10]. Суммарное содержание полициклических ароматических углеводородов значительно ниже ДК, табл. 2.

Количественный и качественный составы кислородорганических соединений в пробах донных отложений озер Сибири сопоставимы с содержанием и разнообразием углеводов. Среди кислородных соединений доминируют жирные кислоты, их содержание составляет 0,3...2,7 мг/кг. Для донных осадков озер Хакасии характерно более низкое содержание этих соединений по сравнению с озерами Алтая, за исключением озер Тус и Утичь, табл. 2. Ряд жирных кислот представлен соединениями C_6-C_{20} , причем их распределение бимодально, рис. 4. Наличие первой моды C_6-C_{10} с максимумом, приходящимся на C_8-C_9 , объясняется биodeградацией парафинов.

Вторая мода $C_{12}-C_{20}$ с ярко выраженным преобладанием четных гомологов и максимумом, приходящимся на пальмитиновую кислоту (C_{16}), своим происхождением обязана гидролизу животных жиров и растительных масел. Известно также, что насыщенные жирные кислоты широко используются в производстве моющих и косметических средств, смазочных масел и пластификаторов и могут попадать в водоемы вместе с промышленными и бытовыми стоками. Для всех проб озер Алтая характерно схожее распределение гомологов жирных кислот, в котором соединения первой моды являются преобладающими. В подтверждение этому на рис. 3 в качестве примера представлено молекулярно-массовое распределение жирных кислот в донных отложениях озера Каимское. В донных отложениях озер Хакасии количества кислот первой и второй мод со-

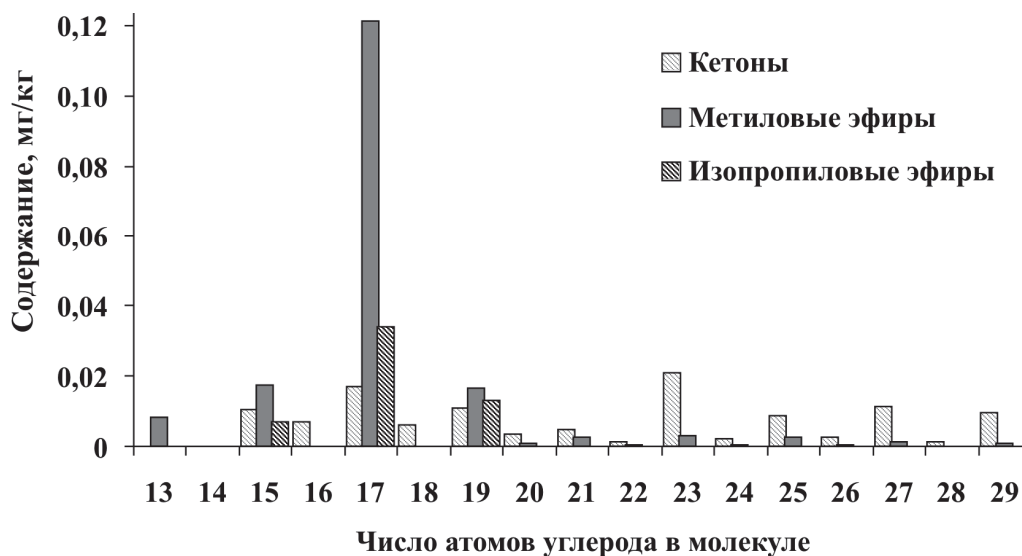


Рис. 5. Молекулярно-массовое распределение кетонов и эфиров жирных кислот в донных отложениях озера Тус

поставимы между собой, лишь в пробе озера Иткуль доминируют соединения второй моды, рис. 4.

Следующими по распространенности среди кислородорганических соединений в донных отложениях являются метиловые эфиры и метилкетоны, однако их содержание почти на порядок меньше, чем кислот. Молекулярно-массовое распределение их гомологических рядов сдвинуто по сравнению с кислотами в высокомолекулярную область. Так, метиловые эфиры представлены соединениями ряда C_{13} – C_{29} с ярко выраженным преобладанием нечетных гомологов во всем ряду. Во всех образцах доминируют метиловые эфиры миристиновой (C_{15}), стеариновой (C_{19}) и особенно пальмитиновой (C_{17}) кислот, рис. 5. Ряд метилкетонов представлен соединениями C_{15} – C_{29} , среди которых также доминируют нечетные гомологи – C_{15} и C_{17} , однако в отличие от жирных кислот и их метиловых эфиров во всех исследованных пробах в значительных количествах присутствуют также гомологи C_{23} , C_{25} , C_{27} .

На третьем месте по распространенности среди кислородорганических соединений находятся трифенилфосфаты, представленные самим трифенилфосфатом, его метил- и диметилпроизводными, а также изопропиловые эфиры лауриновой, миристиновой и пальмитиновой кислот.

Заключение

Методами ИК- и хроматомасс-спектрометрии исследован качественный и количественный состав органических соединений донных отложений озер юга Сибири. Основными классами являются *n*-алканы, алкилциклогексаны, стераны, гопаны, ароматические и полициклоароматические углеводороды, карбоновые кислоты и их эфиры, спирты и кетоны стероидного и терпеноидного ряда. Установленный уровень содержания органических компонентов в осадках свидетельствует о благоприятной экологической обстановке в регионе, а их качественный состав – об отсутствии опасных примесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павленко Л.Ф., Корпакова И.Г., Темердашев З.А., Скрипник Г.В., Клименко Т.Л., Анохина Н.С., Евеева А.И., Ларин А.А. Характеристика загрязнения лицензионного участка ООО «НК «Приазовнефть» в юго-восточном районе Азовского моря нефтяными компонентами в многолетнем аспекте // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2010. – № 9. – С. 53–60.
2. Коршенко А.Н., Матвейчук И.Г., Плотникова Т.И., Лучков В.П., Кирьянов В.С. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник-2004. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. – 200 с.
3. Конторович А.Э., Шварцев С.Л., Зуев В.А., Рассказов Н.М., Туров Ю.П. Органические микропримеси в пресных природных водах бассейнов рек Томи и Верхней Оби // Геохимия. – 2000. – № 5. – С. 533–542.
4. Туров Ю.П., Пирогова И.Д., Гузьяева М.Ю., Ермашова Н.А. Органические примеси в природных водах в районе г. Стрежевого // Водные ресурсы. – 1998. – Т. 25. – № 4. – С. 455–461.
5. Шварцев С.Л., Савичев О.Г., Вертман Г.Г., Зарубина Р.Ф., Наливайко Н.Г., Трифонова Н.Г., Туров Ю.П., Фризен Л.Ф., Янковский В.В. Эколого-геохимическое состояние речных вод Средней Оби // Водные ресурсы. – 1996. – Т. 23. – № 6. – С. 723–731.
6. Парначев В.П., Вишневецкий В.П. О целевой программе по оздоровлению экологической обстановки природного комплекса «Озеро Шира» // Медико-биологические и экологические проблемы курортного комплекса «Озеро Шира»: Матер. научно-практ. конф., посвященной 100-летию организации курорта «Озеро Шира». – Томск: ЦНТИ, 1997. – С. 114–124.
7. Водные ресурсы Ширинского района Республики Хакасия / под ред. В.П. Парначева. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. – 171 с.
8. Савичев О.Г., Льготин В.А. Пространственные изменения химического состава донных отложений рек Томской области // География и природные ресурсы. – 2008. – № 3. – С. 46–51.
9. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии. ПНД Ф 16.1:2.2.22–98. – М.: Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1998. – 16 с.
10. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Флоровская В.Н., Алексеева Е.А., Козин И.С., Оглоблина А.И., Раменская М.Е., Теплицкая Т.А., Шурубор Е.И. Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах. – М.: Изд-во МГУ, 1996. – 192 с.

Поступила 26.03.2012 г.

УДК 556.314

ФОРМЫ МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОДАХ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КОЛЫВАНЬ-ТОМСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ЗОНЫ

Ю.В. Колубаева

Томский политехнический университет

E-mail: Kolubaeva@inbox.ru

Изучены неорганические формы миграции химических элементов природных вод северной части Колывань-Томской складчатой зоны (Томский район Томской области) с использованием программного комплекса HydroGeo. Показано, что химические элементы, играющие основную роль в солевом составе вод, мигрируют преимущественно в ионной форме или нейтральных недиссоциирующих молекул, микроэлементы, наряду с ионной формой миграции, образуют значительное количество комплексов различной прочности.

Ключевые слова:

Колывань-Томская складчатая зона, подземные воды, формы миграции.

Key words:

Kolyvan-Tomsk folded zone, ground waters, patterns of migration.

К основным достижениям в области геохимии природных вод за последние 40 лет относится открытие многообразных форм существования химических элементов в них. Разные соединения одного и того же элемента имеют различные термодинамические, физико-химические и гидродинамические параметры и характеристики. Поэтому процессы миграции элементов и их распределение при взаимодействии воды и пород невозможно правильно интерпретировать и прогнозировать, не зная их миграционных форм в природных водах с различным химическим составом. Установление миграционных форм элементов необходимо для решения многих гидрогеохимических задач. Уравнения закона действующих масс, с помощью которых изучают равновесия, выражены через активности индивидуальных веществ – форм их существования. Использование же в этих уравнениях аналитически определенных концентраций элемента, часто представляющих собой сумму концентраций многих его форм существования, может привести к грубым последствиям. Иначе говоря, игнорируя комплексообразование, невозможно будет правильно оценить степень насыщенности вод по отношению к тем или иным минералам.

При исследованиях в области охраны окружающей среды первостепенное значение имеет то обстоятельство, что разные миграционные формы одного и того же элемента имеют иногда резко различную токсичность. Биохимический эффект сложных состояний элементов не адекватен эффекту их простых форм. Незаконкомплексованные ионы тяжелых металлов являются в большинстве случаев токсичными. Связывание же металлов в комплексы, особенно с комплексообразующими веществами естественного происхождения, приводит к образованию, как правило, нетоксичных соединений [1]. Из всего сказанного вытекает актуальность данных исследований применительно к территории северной части Колывань-Томской складчатой зоны. В административном отношении

район исследований расположен в юго-восточной части Западной Сибири, в пределах Томского района Томской области (рисунок).

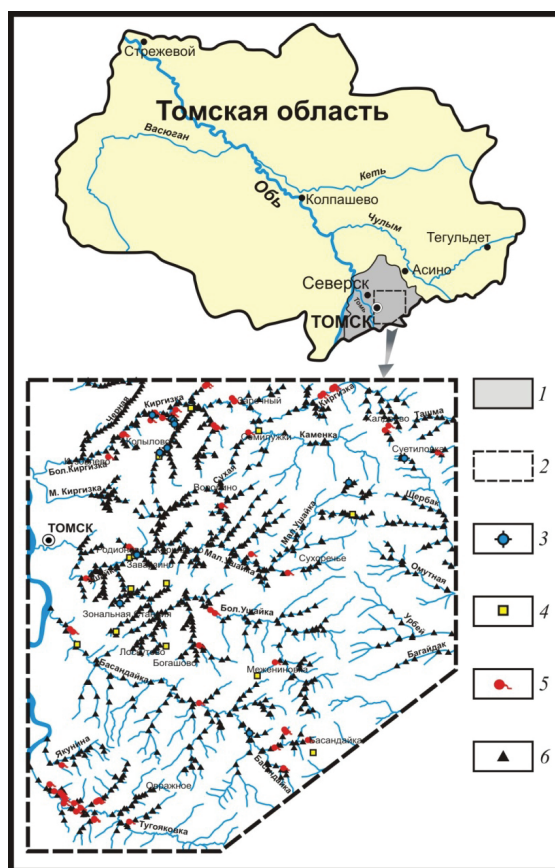


Рисунок. Обзорная карта изучаемого района с нанесением точек фактического материала: 1 – Томский район, 2 – участок исследований. Места опробования: 3 – скважин, 4 – колодцев, 5 – родников, 6 – рек

Материалом для проводимых исследований послужили данные, полученные проблемной научно-исследовательской гидрогеохимической лабораторией Национального исследовательского Томского

политехнического университета в разные годы (1992–1993 гг., 1998–2000 гг. и в 2008 г. с участием автора). При интерпретации и обобщении данных использовались химические анализы из более чем 1000 точек опробования: родники, колодцы, скважины и реки (Киргизка, Каменка, Ушайка, Басандайка, Якунина, Тугояковка, Ташма, Щербак, Омутная и их притоки) [2].

Формирующиеся в этих условиях подземные и поверхностные воды являются близкими по составу, что, вероятно, обусловлено особенностями химического состава подземных вод палеозойского фундамента, выходящего на дневную поверхность и обеспечивающего родниковое питание рек. По условиям формирования подземные воды района исследований представляют собой воды выщелачивания с активной циркуляцией и сравнительно невысокой минерализацией гидрокарбонатного типа. Так, подземные воды района являются нейтральными (рН – 7,1), пресными, со средней минерализацией 523 мг/л, по составу преимущественно гидрокарбонатными кальциевыми и магниевыми-кальциевыми. Общая минерализация вод изменяется от 215 до 784 мг/л, рН – от 6,4 до 7,8. Речные воды по химическому составу являются преимущественно гидрокарбонатными кальцие-

выми, слабощелочными – среднее значение рН – 7,6, умеренно пресными при средней минерализации 490 мг/л. Общая минерализация вод изменяется от 121 до 775 мг/л, рН – от 6,0 до 8,2.

Как известно, растворенное состояние химических элементов в водах чрезвычайно разнообразно. Среди истинно растворенных форм элементов различают нейтральные молекулы, простые и комплексные ионы [1], в том числе с органическими лигандами. Основные формы миграции элементов зависят не только от свойств самого элемента (катионы, элементы-гидролизаты или анионы), но и от внешних факторов миграции (рН-Eh среды, активных концентраций ионов-комплексобразователей).

Не останавливаясь на методике физико-химических исследований комплексобразования, отметим, что она достаточно подробно изложена в источниках [1, 3–5]. Добавим только, что комплексные соединения образуются при взаимодействии иона-комплексобразователя и лигандов (заряженных или нейтральных неорганических или органических частиц, т. е. ионов или молекул органического и неорганического происхождения), а характеристикой комплексного соединения служит мера устойчивости комплекса, называю-

Таблица 1. Примеры данных по химическому составу природных вод территории исследований, использованных в расчетах

| Параметр | Пункты отбора проб | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| | Т. н. 1098 (колодец) | Т. н. 1277 (родник) | Т. н. 1555 (колодец) | Т. н. 1560 (колодец) | Т. н. 1821 (родник) | Т. н. 1051 (р. Якунина) | Т. н. 1243 (р. Басандайка) | Т. н. 1388 (р. Киргизка) | Т. н. 1516 (р. Басандайка) | Т. н. 1537 (р. М. Ушайка) |
| рН | 6,9 | 7,0 | 6,8 | 6,8 | 7,2 | 7,4 | 7,9 | 7,4 | 7,4 | 7,8 |
| Ионная сила раствора, моль/л | 0,010 | 0,010 | 0,007 | 0,01 | 0,007 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 |
| HCO ₃ ⁻ | 442,0 | 422,0 | 296,0 | 478,0 | 260,0 | 378,2 | 403,0 | 394,0 | 368,0 | 386,0 |
| SO ₄ ²⁻ | 24,0 | 13,68 | 9,98 | 12,3 | 9,31 | 5,5 | 3,2 | 2,66 | 2,0 | 7,05 |
| Cl ⁻ | 13,5 | 1,4 | 7,1 | 2,84 | 2,84 | 2,92 | 1,4 | 2,84 | 2,1 | 7,1 |
| NO ₂ ⁻ | 0,002 | 0,002 | 0,028 | 0,018 | 0,018 | 0,060 | 0,008 | 0,018 | 0,029 | 0,025 |
| NO ₃ ⁻ | 1,92 | 0,36 | 0,05 | 0,614 | 0,46 | – | 3,8 | 0,921 | 1,44 | 0,614 |
| NH ₄ ⁺ | 0,48 | 0,55 | 0,21 | 0,259 | 0,331 | 0,37 | 0,037 | 0,36 | 0,89 | 0,19 |
| F ⁻ | 0,16 | 0,24 | 0,16 | 0,19 | 0,11 | 0,30 | 0,30 | 0,23 | 0,27 | 0,17 |
| Ca ²⁺ | 126,0 | 84,0 | 84,0 | 128,0 | 96,0 | 102,0 | 104,0 | 110,0 | 82,0 | 100,0 |
| Mg ²⁺ | 9,70 | 25,6 | 3,66 | 8,54 | 0,50 | 13,42 | 9,80 | 3,66 | 15,90 | 9,76 |
| Na ⁺ | 13,5 | 15,0 | 7,0 | 15,0 | 7,0 | 7,0 | 8,5 | 9,5 | 15,0 | 10,0 |
| K ⁺ | 1,5 | 0,7 | 3,0 | 0,8 | 1,5 | 1,2 | 2,1 | 0,6 | 1,3 | 1,3 |
| Fe ²⁺ | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,3 |
| Fe ³⁺ | 0,2 | 0,3 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,3 | 0,8 | 0,8 | 0,4 |
| Si | 6,8 | 3,31 | 7,38 | 9,67 | 5,63 | 5,92 | 9,13 | 7,0 | 4,88 | 7,29 |
| Al ³⁺ | 0,07 | 0,089 | 0,122 | 0,005 | 0,014 | 2,65 | 0,124 | 0,067 | 0,018 | 0,04 |
| Ba ²⁺ | 87,0 | 68,0 | 32,1 | 75,1 | 18,8 | 98,0 | 98,0 | 28,2 | 50,0 | 2,5 |
| Sr ²⁺ | 470,0 | 770,0 | 170,0 | 590,0 | 196,0 | 964,0 | 780,0 | 340,0 | 580,0 | 310,0 |
| Li ⁺ | 18,0 | 24,0 | 9,0 | 16,0 | 10,0 | 15,5 | 11,0 | 14,0 | 14,0 | 12,5 |
| Zn ²⁺ | 58,0 | 1,2 | 69,2 | 10,0 | 70,0 | 8,5 | 2,2 | 13,5 | 4,5 | 25,6 |
| Cd ²⁺ | 0,13 | 0,05 | 0,1 | 0,1 | 0,05 | 0,1 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,15 |
| Pb ²⁺ | 1,1 | 0,05 | 0,3 | 0,3 | 2,3 | 1,2 | 0,2 | 0,6 | 0,2 | 0,8 |
| Cu ²⁺ | 2,0 | 0,05 | 1,8 | 1,0 | 4,0 | 1,3 | 1,2 | 1,3 | 0,05 | 2,5 |
| Минерализация, мг/л | 634 | 569 | 413 | 648 | 403 | 517 | 540 | 527 | 503 | 524 |

шаяся константой устойчивости (наиболее устойчивые в растворах комплексные ионы имеют наибольшие значения этого показателя). Расчет кон-

центраций различных форм миграции элементов в природных водах производился автором с применением программного модуля HydroGeo (автор –

Таблица 2. Результаты расчетов основных форм миграции химических элементов в природных водах исследуемой территории, в % от валового содержания

| Компонент | Подземные воды | | | Поверхностные воды | | | Компонент | Подземные воды | | | Поверхностные воды | | |
|---|----------------|----------|-----------|--------------------|----------|-----------|--|----------------|----------|-----------|--------------------|----------|-----------|
| | мини-мум | сред-нее | макси-мум | мини-мум | сред-нее | макси-мум | | мини-мум | сред-нее | макси-мум | мини-мум | сред-нее | макси-мум |
| HCO ₃ ⁻ | 75,17 | 86,09 | 93,62 | 81,02 | 91,40 | 94,46 | H ₂ SiO ₃ | 2,465 | 2,639 | 2,654 | 2,559 | 2,636 | 2,654 |
| SO ₄ ²⁻ | 99,97 | 99,98 | 99,99 | 99,98 | 99,99 | 99,99 | (HSiO ₃) ⁻ | 0,077 | 0,620 | 7,155 | 0,054 | 0,720 | 3,645 |
| Cl ⁻ | 99,88 | 99,90 | 99,94 | 99,89 | 99,90 | 99,92 | Al³⁺ | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| NO ₂ ⁻ | 99,79 | 99,91 | 99,99 | 99,86 | 99,96 | 99,99 | (AlO ₂) ⁻ | 6,711 | 30,25 | 47,90 | 17,92 | 42,69 | 47,72 |
| NO ₃ ⁻ | 98,52 | 98,86 | 99,61 | 98,66 | 98,90 | 99,09 | Al(OH) ₃ | 0,484 | 3,499 | 6,796 | 0,851 | 3,104 | 6,442 |
| F ⁻ | 98,08 | 98,74 | 99,23 | 98,48 | 98,72 | 99,23 | (AlO(OH)) ₂ ⁻ | 7,233 | 32,60 | 51,62 | 19,31 | 46,00 | 51,43 |
| NH₄⁺ | 48,61 | 75,16 | 97,10 | 40,67 | 50,63 | 72,06 | Al ₂ (CO ₃) ₃ | 0,000 | 33,66 | 83,36 | 0,001 | 8,204 | 57,95 |
| NH ₄ HCO ₃ | 0,159 | 0,245 | 0,351 | 0,124 | 0,172 | 0,255 | Ba²⁺ | 85,93 | 88,22 | 93,33 | 86,90 | 88,24 | 90,27 |
| (NH ₄ CO ₃) ⁻ | 0,001 | 0,006 | 0,034 | 0,003 | 0,010 | 0,017 | (BaHCO ₃) ⁺ | 6,31 | 10,52 | 12,54 | 8,62 | 10,56 | 11,87 |
| (NH ₄) ₂ CO ₃ | 2,205 | 22,72 | 47,90 | 22,90 | 46,31 | 57,42 | Ba(HCO ₃) ₂ | 0,201 | 0,678 | 1,003 | 0,417 | 0,669 | 0,865 |
| NH ₄ OH | 0,209 | 0,933 | 5,047 | 0,436 | 1,435 | 2,629 | BaCO ₃ | 0,019 | 0,244 | 2,831 | 0,021 | 0,279 | 1,427 |
| NH ₃ ⁰ | 0,210 | 0,936 | 5,064 | 0,437 | 1,440 | 2,638 | BaSO ₄ | 0,088 | 0,336 | 0,968 | 0,094 | 0,257 | 0,476 |
| Ca²⁺ | 89,67 | 94,91 | 97,70 | 92,36 | 94,54 | 95,81 | Sr²⁺ | 90,36 | 94,47 | 97,03 | 92,61 | 94,42 | 95,49 |
| (CaHCO ₃) ⁺ | 2,110 | 3,828 | 4,796 | 3,030 | 3,810 | 4,191 | (SrHCO ₃) ⁺ | 2,882 | 4,951 | 6,003 | 3,997 | 4,962 | 5,635 |
| Ca(HCO ₃) ₂ | 0,071 | 0,259 | 0,404 | 0,155 | 0,253 | 0,304 | Sr(HCO ₃) ₂ | 0,013 | 0,045 | 0,068 | 0,027 | 0,045 | 0,058 |
| CaCO ₃ | 0,098 | 0,971 | 6,387 | 0,279 | 1,343 | 3,707 | SrCO ₃ | 0,032 | 0,425 | 4,890 | 0,038 | 0,490 | 2,492 |
| Ca(CO ₃) ₂ ²⁻ | 0,000 | 0,006 | 0,082 | 0,000 | 0,005 | 0,026 | SrSO ₄ | 0,028 | 0,110 | 0,319 | 0,031 | 0,083 | 0,154 |
| (CaNO ₃) ⁺ | 0,000 | 0,013 | 0,064 | 0,005 | 0,039 | 0,297 | Li⁺ | 8,103 | 43,19 | 70,18 | 11,32 | 39,97 | 70,04 |
| CaCl ⁺ | 0,001 | 0,004 | 0,011 | 0,001 | 0,010 | 0,039 | LiHCO ₃ | 0,270 | 1,425 | 2,298 | 0,375 | 1,332 | 2,456 |
| CaF ⁺ | 0,002 | 0,004 | 0,007 | 0,002 | 0,003 | 0,005 | Li ₂ CO ₃ | 27,52 | 55,37 | 91,58 | 27,50 | 58,68 | 88,28 |
| Mg²⁺ | 93,62 | 95,97 | 97,85 | 94,82 | 95,80 | 96,68 | (LiCO ₃) ⁻ | 0,002 | 0,008 | 0,043 | 0,002 | 0,014 | 0,030 |
| (MgHCO ₃) ⁺ | 2,029 | 3,448 | 4,192 | 2,787 | 3,454 | 3,761 | Zn²⁺ | 4,999 | 58,63 | 83,41 | 9,774 | 44,37 | 78,08 |
| Mg(HCO ₃) ₂ | 0,039 | 0,134 | 0,202 | 0,081 | 0,131 | 0,157 | (ZnHCO ₃) ⁺ | 0,395 | 4,682 | 6,937 | 0,776 | 3,579 | 6,364 |
| MgCO ₃ | 0,045 | 0,420 | 2,839 | 0,117 | 0,579 | 1,631 | Zn(HCO ₃) ₂ | 0,320 | 3,942 | 7,234 | 0,624 | 2,960 | 5,272 |
| MgCl ⁺ | 0,002 | 0,005 | 0,015 | 0,002 | 0,014 | 0,054 | ZnCO ₃ | 6,985 | 24,74 | 67,72 | 7,751 | 37,32 | 65,84 |
| MgF ⁺ | 0,008 | 0,018 | 0,032 | 0,009 | 0,015 | 0,021 | (Zn(CO ₃) ₂) ²⁻ | 0,001 | 0,179 | 2,427 | 0,002 | 0,169 | 1,127 |
| MgOH ⁺ | 0,001 | 0,004 | 0,025 | 0,001 | 0,005 | 0,014 | ZnOH ⁺ | 2,855 | 7,403 | 20,46 | 2,293 | 11,26 | 20,07 |
| Na⁺ | 99,06 | 99,26 | 99,62 | 99,18 | 99,25 | 99,42 | Zn(OH) ₂ | 0,005 | 0,269 | 3,658 | 0,003 | 0,264 | 1,775 |
| NaHCO ₃ | 0,377 | 0,735 | 0,936 | 0,569 | 0,733 | 0,809 | ZnF ⁺ | 0,000 | 0,004 | 0,009 | 0,001 | 0,003 | 0,005 |
| NaCl | 0,001 | 0,002 | 0,005 | 0,001 | 0,004 | 0,017 | ZnSO ₄ | 0,003 | 0,149 | 0,480 | 0,013 | 0,080 | 0,228 |
| NaH ₃ SiO ₄ | 0,000 | 0,002 | 0,019 | 0,000 | 0,003 | 0,007 | Cd²⁺ | 0,575 | 24,06 | 51,36 | 1,437 | 14,54 | 43,06 |
| NaHSiO ₃ | 0,000 | 0,004 | 0,030 | 0,001 | 0,005 | 0,012 | (CdHCO ₃) ⁺ | 0,264 | 10,93 | 18,89 | 0,663 | 6,802 | 20,41 |
| K⁺ | 99,03 | 99,23 | 99,61 | 99,16 | 99,23 | 99,40 | Cd(HCO ₃) ₂ | 0,043 | 1,841 | 3,993 | 0,108 | 1,137 | 3,427 |
| KHCO ₃ | 0,389 | 0,759 | 0,966 | 0,587 | 0,757 | 0,835 | CdCO ₃ | 32,51 | 58,34 | 77,86 | 32,31 | 71,35 | 82,37 |
| (KCO ₃) ⁻ | 0,001 | 0,008 | 0,055 | 0,002 | 0,011 | 0,031 | (Cd(CO ₃) ₂) ²⁻ | 0,094 | 3,635 | 38,99 | 0,152 | 4,728 | 23,12 |
| Fe²⁺ | 82,25 | 91,31 | 96,73 | 78,03 | 85,45 | 89,29 | CdOH ⁺ | 0,677 | 1,187 | 1,717 | 0,641 | 1,443 | 2,106 |
| (FeHCO ₃) ⁺ | 1,971 | 3,235 | 4,079 | 2,971 | 3,238 | 3,464 | Pb²⁺ | 0,212 | 5,333 | 12,07 | 0,420 | 3,274 | 9,147 |
| Fe(HCO ₃) ₂ | 0,202 | 0,668 | 1,046 | 0,612 | 0,692 | 0,767 | (PbHCO ₃) ⁺ | 0,815 | 20,11 | 32,00 | 1,621 | 12,81 | 36,20 |
| FeCO ₃ | 0,918 | 4,351 | 12,81 | 6,040 | 9,706 | 16,80 | Pb(HCO ₃) ₂ | 0,533 | 13,40 | 26,92 | 1,051 | 8,535 | 24,19 |
| FeCl ⁺ | 0,001 | 0,005 | 0,013 | 0,001 | 0,003 | 0,007 | PbCO ₃ | 15,50 | 27,52 | 44,15 | 13,93 | 34,12 | 43,43 |
| FeOH ⁺ | 0,141 | 0,428 | 1,206 | 0,558 | 0,911 | 1,558 | (Pb(CO ₃) ₂) ²⁻ | 0,001 | 0,063 | 0,773 | 0,002 | 0,064 | 0,363 |
| Fe³⁺ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | PbOH ⁺ | 16,68 | 33,57 | 53,52 | 16,53 | 41,20 | 54,20 |
| (FeOH) ₂ ⁺ | 0,004 | 0,145 | 0,347 | 0,002 | 0,016 | 0,025 | Cu²⁺ | 0,108 | 5,774 | 16,61 | 0,247 | 3,118 | 13,36 |
| Fe(OH) ₃ | 68,33 | 74,51 | 79,76 | 67,74 | 76,09 | 80,35 | (CuHCO ₃) ⁺ | 0,103 | 5,309 | 10,16 | 0,237 | 3,024 | 13,13 |
| (Fe(OH) ₄) ⁻ | 2,361 | 8,095 | 23,76 | 11,21 | 17,79 | 30,00 | Cu(HCO ₃) ₂ | 0,034 | 1,771 | 4,321 | 0,078 | 1,016 | 4,435 |
| (Fe(OH) ₂) ⁺ | 3,293 | 17,25 | 28,89 | 2,250 | 6,107 | 8,445 | CuCO ₃ | 71,87 | 84,45 | 93,10 | 68,56 | 89,71 | 94,05 |
| SiO₂ | 44,31 | 47,44 | 47,70 | 45,99 | 47,39 | 47,71 | (Cu(CO ₃) ₂) ²⁻ | 0,098 | 2,231 | 23,64 | 0,152 | 2,640 | 12,85 |
| H ₄ SiO ₄ | 46,06 | 49,30 | 49,58 | 47,80 | 49,25 | 49,58 | CuOH ⁺ | 0,323 | 0,469 | 0,765 | 0,365 | 0,487 | 0,657 |

М.Б. Букаты, ТФ ИГНГ СО РАН), с помощью которого вычислялись количественные соотношения между вероятными для вод данного химического состава формами элементов [6, 7]. Исследованные нами формы миграции основных макро- и микрокомпонентов без учета элемент-органических форм представлены в табл. 2, примеры по химическому составу вод, использованных при расчетах, приведены в табл. 1.

Результаты исследований процессов комплексообразования показывают, что без учета соединений с органическими радикалами преимущественно в ионной форме мигрируют HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , Fe^{2+} , F^- . Доля их составляет, как правило, более 75 %, что вполне закономерно, учитывая околонейтральные значения pH вод, низкие положительные значения окислительно-восстановительного потенциала, низкую минерализацию растворов и невысокие значения их ионной силы (0,007...0,010). Среди второстепенных форм миграции макроэлементов преобладают комплексы-ассоциаты с участием доминирующих анионов HCO_3^- , CO_3^{2-} . Металлы, относящиеся к группе главных ионов химического состава природных вод — Na^+ , K^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} , мигрируют преимущественно в ионно-растворенном виде, что обусловлено достаточно хорошей растворимостью многочисленных природных соединений макрокомпонентов. Одним из важных свойств натрия, калия, кальция и магния является то, что эти металлы характеризуются слабовыраженной склонностью к гидролизу в условиях природных вод. Комплексообразование для них также мало характерно. Ионно-растворенное состояние главных ионов, как правило, свойственно маломинерализованным водам. Так, по приведенным в табл. 2 результатам расчетов основных форм миграции химических элементов в природных водах исследуемой территории, видно, что в отсутствие органических лигандов наибольший вклад в комплексообразование в случае с кальцием и магнием вносят карбонатные и гидрокарбонатные ионы: $(\text{CaHCO}_3)^+$, $(\text{MgHCO}_3)^+$, $(\text{CaCO}_3)^0$, $(\text{MgCO}_3)^0$, однако подавляющая часть обоих металлов (более 90 %) находится в виде свободных незакомплексованных ионов. Na^+ и K^+ в этих условиях также находятся в виде свободных ионов, доля их в процентах от валового содержания составляет 99 %.

Что касается такого элемента-гидролизата как железо, то его высокий кларк обуславливает присутствие этого металла как неперменного компонента в природных водах [8]. В зависимости от окислительно-восстановительного потенциала природных вод железо проявляет характерные для него степени окисления +2 и +3. Большую роль играют щелочно-кислотные условия и биогенная миграция. Железо (II) обнаруживается в основном в водах с низкими значениями Eh [5]. Основной миграционной формой железа (II) является ионная его форма Fe^{2+} , второстепенными формами являются FeCO_3 , $(\text{FeHCO}_3)^+$. Насыщение воды кисло-

родом приводит к быстрому окислению Fe^{2+} до Fe^{3+} , поэтому в водных растворах чаще всего встречаются соединения железа (III), как термодинамически более устойчивые. Fe^{3+} характеризуется способностью к образованию устойчивых комплексных соединений с органическими веществами гумусового ряда — фульфо- и гуминовыми кислотами, а также с некоторыми неорганическими анионами, особенно с OH^- . Так, при изучении основных форм миграции Fe^{3+} были идентифицированы следующие гидроокисные формы: $(\text{FeOH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $(\text{Fe}(\text{OH})_4)^-$, $(\text{Fe}(\text{OH})_2)^+$, соотношение между которыми зависит от pH и Eh воды, а также от общей концентрации железа. При этом при значениях pH, характерных для исследуемых вод, как в случае с поверхностными, так и в случае с подземными водами, доминирует форма $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и составляет более 60 %, константа устойчивости этого соединения характеризуется очень высокими значениями ($\lg K_{\text{уст}} = 30,0$).

Для Al^{3+} в условиях околонейтральной среды растворов значимыми миграционными формами являются $(\text{AlO}(\text{OH})_2)^-$, $(\text{AlO}_2)^-$ и $\text{Al}_2(\text{CO}_3)_3$. Для кремния, как элемента, химическая связь которого с кислородом исключительно прочна и практически не нарушается, характерны две основные формы миграции: H_4SiO_4 и SiO_2 , содержащиеся в равном количестве.

Проведенные нами исследования форм миграции меди показали высокую степень ее закомплексованности, в отсутствие органических комплексообразователей, доминирующей формой которой является CuCO_3 (до 95 %) при наблюдаемых для исследуемых вод района pH. В значительных количествах присутствуют формы $(\text{CuHCO}_3)^+$, $(\text{Cu}(\text{CO}_3)_2)^{2-}$ и в небольшом — $\text{Cu}(\text{HCO}_3)_2$, гидроксокомплекс меди вносит незначительный вклад в общий баланс. Однако необходимо отметить, что в приведенных расчетах не учитывается влияние органических комплексообразующих веществ, присутствие которых существенным образом сказывается на состоянии меди. Медь образует прочные комплексы со многими органическими соединениями, причем устойчивость их значительно выше таковой с другими катионами металлов со степенью окисления +2. О высокой закомплексованности меди с органическим веществом свидетельствуют расчеты многих авторов, которыми была предпринята попытка расчетным путем определить, при каких концентрациях органического вещества наблюдается преобладающее связывание меди в органические комплексы, в частности на примере озерных вод. С этой целью авторами учитывалось влияние различных концентраций фульвокислоты. По мнению одних авторов, для полного связывания меди в комплексы достаточно, чтобы в воде содержалось всего около 1 мг/л фульвокислоты [9], по мнению других, — неорганическим комплексообразованием можно пренебречь лишь в том случае, если в системе содер-

жится не менее 15 мг/л гумусовых веществ [10]. При концентрации последних около 3 мг/л максимальное количество связанной с ними меди не превышает 3 %, доминирующей формой в этих условиях являются карбонатные комплексы меди, что и наблюдается при расчетах, полученных автором. Описанные разными авторами результаты расчетов миграционных форм меди, вероятно, объясняются выбором $\lg K_{\text{уст}}$ органических комплексов этого металла.

Цинк образует значительное количество комплексов различной прочности, но все же около половины его приходится на свободные (незакомплексованные) ионы Zn^{2+} , достигая 83,4 % от валового содержания в случае подземных вод и 78 % — в случае поверхностных. В отсутствие органических комплексообразователей доминирует карбонатный комплекс ZnCO_3 и гидроксокомплекс ZnOH^+ , остальные вносят незначительный вклад в общий баланс. Изучение комплексообразования цинка (II) в водных системах с различным содержанием гумусовых веществ, по Wilson D.E. [10], показывает, что комплексообразование в ощутимых количествах происходит при высоких концентрациях гумуса, в значительной степени зависит от кислотности среды и увеличивается с возрастанием pH. Однако при небольших количествах гуминовых кислот (порядка 3 мг/л) вод преобладают неорганические комплексы цинка, что характерно и для других металлов.

Для свинца характерным свойством является его способность к комплексообразованию. В отсутствие органических лигандов доминирующей формой свинца (II) является гидроксокомплекс PbOH^+ (до 55 %), а также его карбонатные (до 45 %) и гидрокарбонатные комплексы (до 36 %). Концентрация незакомплексованных ионов Pb^{2+} достаточно низкая. Введение в систему органических лигандов оказывает весьма существенное влияние на поведение Pb (II).

Для кадмия, также как и для других микроэлементов, хорошо выражено комплексообразование, что можно увидеть по результатам, приведенным в табл. 2. Доминирующей в рассматриваемых условиях является форма CdCO_3 (до 82 %), хотя значительная часть кадмия представлена незакомплексованными ионами Cd^{2+} . Ощутимый вклад вносят его гидрокарбонатные комплексы. Гидроксокомплекс кадмия, в отличие от свинца, вносит незначительный вклад в общий баланс. Связывание ионов Cd^{2+} гумусовыми веществами в пресных водах со средними показателями их содержания в целом мало характерно [5].

Как показывают результаты расчетов, доля незакомплексованного иона Li^+ составляет как для подземных, так и для поверхностных вод в среднем около 40 % при максимальных 70 %, наибольший же вклад в общий баланс вносит его карбонатный

комплекс Li_2CO_3 , вплоть до 91,5 %, характеризующийся слабой растворимостью.

Что касается такого катионогенного элемента как стронций, то в земной коре и подземных водах он является геохимическим аналогом кальция. Стронций, как и кальций (что было показано ранее), является слабым комплексообразователем. Расчеты показали, что основные состояния стронция в маломинерализованных водах представлены Sr^{2+} (более 90 %), $(\text{SrHCO}_3)^+$, SrCO_3 . По мнению С.Р. Крайнова и других авторов [1], последние две формы в маломинерализованных водах могут иметь значение только в карбонатных водах при pH более 8,5. Но даже в таких водах значимость этих карбонатных форм не высока и в условиях исследуемой территории не превышает 10 %.

Основной миграционной формой бария (металла, по своим свойствам особенно близкий к кальцию и стронцию) является также катионная форма (более 85 %) и небольшую долю дают гидрокарбонатные (около 10 %) и карбонатный комплексы.

Следует отметить, что не учтенные нами взаимодействия ионов раствора с органическими соединениями также могут влиять как на формирование форм миграции элементов, так и на процессы минералообразования. Так, например, экспериментально установлено, что осаждение кальцита не происходит, если в растворе присутствуют фульвокислоты в концентрациях всего 2 мг/л. Еще одним следствием присутствия в растворе органических веществ является преимущественное связывание ими микроэлементов. В общем случае введение в систему органических лигандов приводит к уменьшению концентрации незакомплексованных ионов микроэлементов раствора [5], в то время как такие макрокомпоненты как кальций и магний образуют очень слабые по прочности соединения с органикой. Необходимо также добавить, что введенные при расчетах значения $\lg K_{\text{уст}}$ органических комплексов металлов сильно меняют результаты расчета соотношения различных их форм.

Таким образом, расчет основных неорганических форм миграции химических элементов территории северной части Кольвань-Томской складчатой зоны показал, что в изучаемых пресных водах основные химические элементы солевого состава вод мигрируют преимущественно в ионной форме или в форме нейтральных недиссоциирующих молекул, среди второстепенных форм миграции макроэлементов преобладают комплексы-ассоциаты с участием доминирующих анионов HCO_3^- , CO_3^{2-} . Микроэлементы, наряду с ионной формой, мигрируют в основном с гидрокарбонатными, карбонатными и гидроксокомплексами.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы». ГК 11.519.11.6044 от 20.06.2012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
2. Колубаева Ю.В., Шварцев С.Л., Копылова Ю.Г. Геохимия вод северной части Колывань-Томской складчатой зоны // Известия вузов. Геология и разведка. – 2010. – № 2. – С. 50–58.
3. Методы геохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии / под ред. С.Р. Крайнова. – М.: Недра, 1988. – 254 с.
4. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. – М.: Мир, 1968. – 368 с.
5. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 272 с.
6. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 348–356.
7. Алексеев В.А. и др. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода. Т. 1. Система вода-порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
8. Перельман А.И. Геохимия природных вод. – М.: Наука, 1982. – 154 с.
9. Leckie J.O., Davis J.A. Aqueous environmental chemistry of copper / In: Copper in the environment. P. 1. Ecological cycling / Ed. J.O. Nriagu. – N.Y.: Wiley-Interscience publ., 1979. – P. 89–121.
10. Wilson D.E. An equilibrium model describing the influence of humic materials on the speciation of Cu^{2+} , Zn^{2+} and Mn^{2+} in freshwaters // Limnol. Oceanogr. – 1978. – V. 23. – № 3. – P. 164–170.

Поступила 09.08.2012 г.

УДК 556.314

РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ ХАКАСИИ

Н.В. Гусева, Ю.Г. Копылова, С.К. Леушина

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

Исследована распространенность редкоземельных элементов в природных водах Хакасии (Ширинский район). Выявлено влияние физико-химических показателей вод на особенности поведения редкоземельных элементов. Установлены уровни накопления элементов в озерных, речных и подземных водах. Предложен новый подход к нормированию содержаний редкоземельных элементов в водах по кларкам гидросферы.

Ключевые слова:

Редкоземельные элементы, Хакасия, озера, реки, подземные воды.

Key words:

Rare earth elements, Khakassia, lakes, rivers, groundwater.

Введение

Благодаря своим свойствам, а также согласованному химическому поведению, редкоземельные элементы (РЗЭ) считаются важными микрокомпонентами в изучении различных геологических процессов, а именно генезиса магматических горных пород, эволюции коры и мантии, основанном на предположении, что эти элементы «неподвижны» во время метаморфических процессов. Хотя ряд исследований показывает, что в некоторых условиях РЗЭ растворимы и подвижны, особенно в гидротермальной среде, а также и при процессах выветривания [1].

В настоящее время поведение редкоземельных элементов в природных водах является объектом детальных исследований. Интерес к распространности РЗЭ в природных водах связан с возможным использованием их в качестве индикаторов геохимических процессов, что требует понимания особенностей миграции и законов фракционирования отдельных редкоземельных элементов. Одной из задач интерпретации поведения РЗЭ в при-

родных водах осложняется различными процессами, такими как формирование водных комплексов, коллоидный транспорт, ионный обмен и адсорбция, что приводит к фракционированию этих элементов в водных растворах по сравнению с материнской породой [2].

Исследованию химического состава природных вод Хакасии посвящено большое количество работ [3–6], но в них практически не затронуты вопросы особенностей поведения редкоземельных элементов, что во многом связано с отсутствием на тот момент необходимой аналитической базы. Благодаря использованию современного аналитического оборудования, обладающего достаточной чувствительностью для определения даже очень низких концентраций элементов непосредственно из раствора, у исследователей появилась возможность изучать распространность широкого спектра микроэлементов, в том числе и редкоземельных.

Основной целью данной работы является исследование распространности редкоземельных элементов в природных водах Хакасии.

Объекты и методы исследований

В основу работы положены результаты гидрогеохимического опробования 6 озер, рек Кольчул и Белый Июс, 28 родников и 35 скважин Ширинского района Хакасии, рис. 1, выполненного в 2009–2011 гг. Отбор проб производился в наиболее засушливый летний меженный период, что позволило исключить влияние процессов разубоживания. В 2...3 м от берега с глубины 1...1,5 м производился отбор проб воды объемом 1 л в пластиковую посуду для выполнения общего химического анализа. На месте отбора проб производилось измерение быстро меняющихся показателей: кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных свойств, а также температуры и удельной электрической проводимости. Измерение указанных параметров выполнено посредством портативного мультипараметрового анализатора Water Test. На точке опробования производился анализ компонентов карбонатной системы CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} . Для изучения микрокомпонентного состава отбирались пробы объемом 50 мл в пластмассовые флаконы фирмы Perkin Elmer с малой сорбционной способностью поверхности. Предварительно пробы фильтровались через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм и подкислялись азотной кислотой марки ОСЧ.

Исследование макрокомпонентного состава вод выполнялось в аккредитованной проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии НОЦ «Вода» ТПУ. Содержание редкоземельных элементов определялось с использованием масс-спектрального метода с индуктивно связанной плазмой в ХАЦ «Плазма».

Результаты исследования и их обсуждение

Озерные воды в данной работе рассматриваются на примере шести озер Ширинского района Хакасии: Березового, Челас-Коль, Матарак, Красненького, Власьево и Шунет. Все озера весьма разнообразны по химическому составу, табл. 1.

Таблица 1. Химический состав озер Ширинского района

| Название озера | рН | HCO_3^- | SO_4^{2-} | Cl^- | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Na^+ | K^+ | Минерализация, г/дм ³ |
|----------------|--------|--------------------|--------------------|---------------|------------------|------------------|---------------|--------------|----------------------------------|
| | ед. рН | мг/дм ³ | | | | | | | |
| Березовое | 8,4 | 172 | 50 | 16,5 | 30 | 21 | 18 | 1,1 | 0,32 |
| Челас-Коль | 8,8 | 716 | 188 | 39 | 53 | 67 | 208 | 13 | 1,32 |
| Матарак | 8 | 887 | 128 | 50 | 56 | 80,5 | 228 | 14,4 | 1,45 |
| Красненькое | 8,7 | 725 | 614 | 206 | 43 | 103 | 456 | 22 | 2,22 |
| Власьево | 9,3 | 1022 | 1270 | 327 | 24 | 327 | 573 | 31 | 3,81 |
| Шунет | 8,6 | 537 | 2800 | 4615 | 122 | 841 | 2903 | 25 | 11,93 |

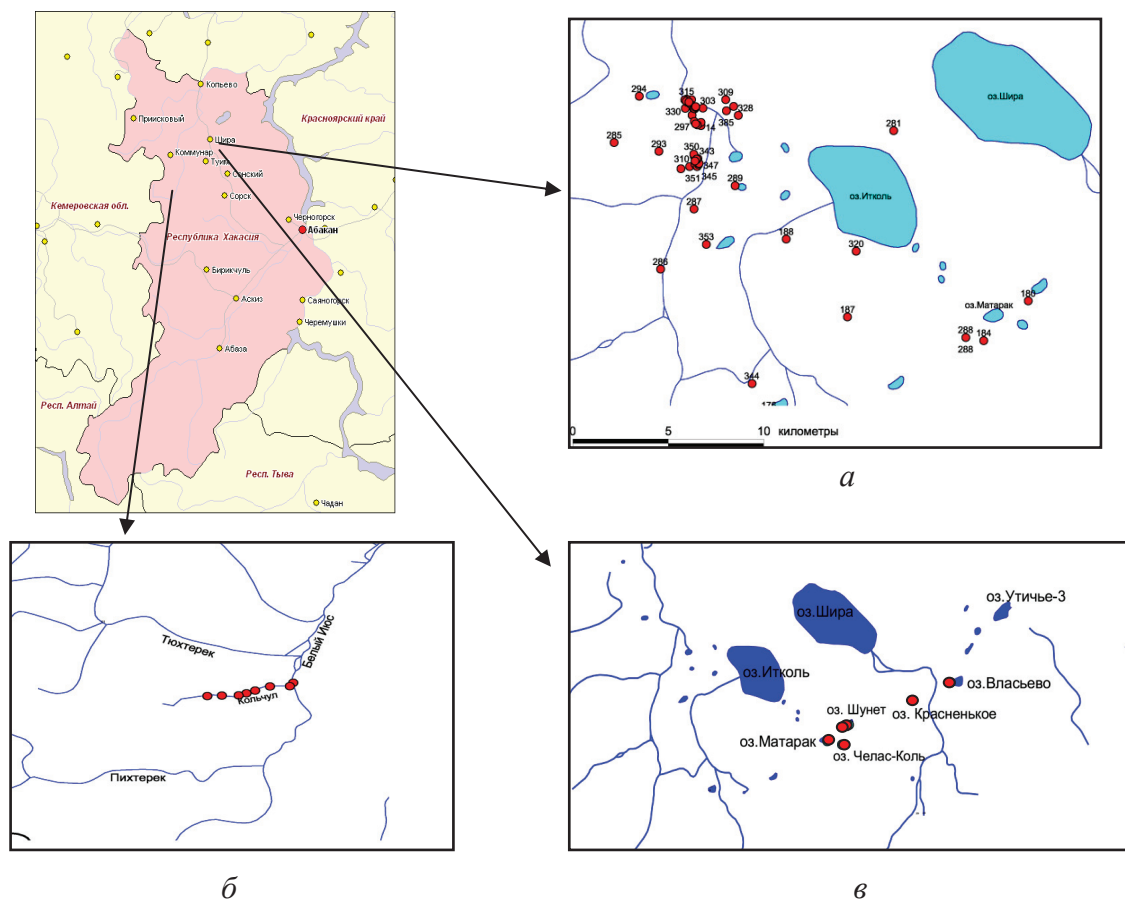
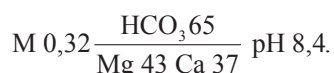


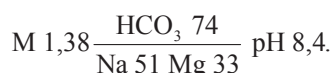
Рис. 1. Схема опробования подземных вод (а), рек Кольчул и Белый Июс (б), озер (в) Хакасии

По сумме солей озера можно разделить на 4 группы: умеренно пресные (оз. Березовое), слабосоленые (оз. Челас-Коль, Матарак, Красненькое), умеренно соленые (оз. Власьево) и слабосоленые (оз. Шунет). По кислотнo-щелочным условиям воды озер Березовое и Матарак слабощелочные, pH составляет соответственно 8,4 и 8, остальные озера щелочные. Минимальное pH наблюдается в озере Матарак, а максимальное — в озере Власьево.

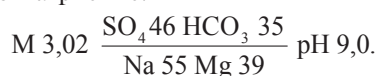
Ионный состав рассматриваемых озер весьма разнообразен. Пресное озеро Березовое, формула ионно-солевого состава которого приведена ниже, является гидрокарбонатным кальциево-магниевым:



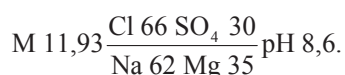
Также гидрокарбонатными являются озера Челас-Коль и Матарак, однако, как показано в формуле ионно-солевого состава, эти озера уже слабосоленые, а по катионному составу магниевонариевые:



Озера с более высокой минерализацией, Красненькое и Власьево, гидрокарбонатно-сульфатные магниевонариевые:



К хлоридному классу относится озеро Шунет. По минерализации оно резко отличается от других исследуемых озер, а следовательно, и по соотношению основных ионов:



Химический тип озера Шунет — сульфатно-хлоридный магниевонариевый.

С увеличением минерализации воды в исследуемых озерах соотношения основных ионов изменяется [7]. При малой минерализации среди анионов преобладает гидрокарбонат-ион, с ростом минерализации повышается доля сульфат-иона, а при минерализации более 10 г/дм³ преобладающим становится хлорид-ион с повышенной долей сульфат-ион. Стоит отметить, что во всех озерах, кроме Березового, преобладающими катионами являются Mg²⁺ и Na⁺.

Все исследуемые пробы речных вод были отобраны по руслу р. Кольчул, где расстояние между пробами в среднем составило 1 км, а также из реки Белый Июс в 0,1 км выше по течению от устья р. Кольчул. Реки Кольчул и Белый Июс на протяжении всего профиля по минерализации характеризуются как ультрапресные. Средний химический состав речных вод приведен в табл. 2. Наименьшей минерализацией обладает вода в реке Белый Июс (0,057 г/дм³), а наибольшей — река Кольчул в устье

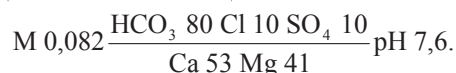
(0,1 мг/дм³). Значительное изменение минерализации вод р. Белый Июс выше места впадения р. Кольчул может быть связано с процессами разбавления [4].

Таблица 2. Химический состав подземных и поверхностных вод Ширинского района Хакасии

| Наименование объекта | Минерализация, г/дм ³ | pH | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ |
|----------------------|----------------------------------|------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
| | | | мг/дм ³ | | | | | | |
| Реки | 0,082 | 7,63 | 56,00 | 5,58 | 4,24 | 0,89 | 10,13 | 4,68 | 0,93 |
| Подземные воды: | | | | | | | | | |
| Пресные | 0,58 | 7,5 | 305,9 | 84,6 | 16,2 | 65,0 | 26,0 | 38,0 | 17,0 |
| Соленые | 2,2 | 7,5 | 386,2 | 258,2 | 164,7 | 120,3 | 90,8 | 135,8 | 17,5 |

Значение pH рассматриваемых речных вод во всех точках опробования изменяется в пределах 6,8...8,8, наиболее щелочные воды отмечаются в р. Кольчул в 2,7 км от устья выше по течению. Тем не менее, по среднему значению водородного показателя воды реки Кольчул характеризуются как слабощелочные, что не совсем характерно для речной пресной воды.

Ввиду малой минерализации речной воды преобладающим анионом является гидрокарбонат-ион, а среди катионов — кальций и магний:



Исследование химического состава подземных вод проведено по результатам опробования 63 скважин и 28 родников Ширинского района. Минерализация рассматриваемых подземных вод изменяется в пределах 0,3...8,4 г/дм³, при среднем значении 1,4 г/дм³. В этой связи было принято решение о селективном рассмотрении пресных и соленых вод.

Пресные подземные воды отмечаются в 26 родниках и 21 скважине. Минерализация этих вод изменяется в пределах 0,3...0,9 г/дм³ при среднем 0,58 г/дм³. По химическому типу эти воды гидрокарбонатные кальциевые. Значение pH изменяется в пределах 7,0...8,0 при среднем 7,6.

Соленые подземные воды встречены в 2 родниках и 14 скважинах. Минерализация этих вод изменяется в пределах 1,2...8,4 г/дм³ при среднем значении 2,2 г/дм³. Кислотно-щелочные условия характеризуются значениями pH 7,0...7,8. Ионный состав вод весьма разнообразен. Преобладающими анионами являются гидрокарбонат-ион и хлорид-ион, катионами — кальций и натрий.

Сумма РЗЭ в озерных водах изменяется от 55 до 4967 нг/дм³ при среднем 1006 нг/дм³. Воды всех исследуемых озер являются щелочными и сильнощелочными, в этой связи содержание РЗЭ в них минимально (55...300 нг/дм³), лишь в озере Красненькое наблюдается аномально высокое содержание редкоземельных элементов (сумма РЗЭ — 4967 нг/дм³) по сравнению с остальными озерными

Таблица 3. Содержание редкоземельных элементов в озерных водах

| Наименование озера | Легкие РЗЭ (нг/дм ³) | | | | | Тяжелые РЗЭ (нг/дм ³) | | | | | | | | | | ΣРЗЭ, нг/дм ³ |
|--------------------|----------------------------------|------|-----|-----|-----|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|--------------------------|
| | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | | |
| Березовое | 7 | 12 | 2 | 10 | 2,4 | 14 | 3 | 0,8 | 1,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 1,4 | 0,7 | 54,8 | |
| Челас-Коль | 55 | 120 | 19 | 68 | 12 | 0,7 | 11 | 1,7 | 1,0 | 1,3 | 0,8 | 0,3 | 1 | 1,2 | 293 | |
| Матарак | 32 | 41 | 9 | 22 | 3 | 2 | 3 | 1,1 | 3,2 | 2,0 | 0,9 | 0,4 | 1,0 | 0,7 | 121,3 | |
| Красненькое | 960 | 2200 | 220 | 830 | 210 | 54 | 190 | 31 | 120 | 28 | 59 | 8 | 48 | 9 | 4967 | |
| Власьево | 53 | 100 | 15 | 59 | 10 | 1,2 | 15 | 2,8 | 13 | 6,8 | 9,5 | 1,9 | 11 | 2,3 | 300,5 | |
| Шунет | 85 | 30 | 17 | 55 | 13 | 3 | 10 | 5 | 8 | 61 | 7 | 1,6 | 3,5 | 1,1 | 300,2 | |

ми водами, табл. 3. При этом концентрации легких РЗЭ во всех озерах в несколько раз превышают концентрации тяжелых РЗЭ, что согласуется с характером их распределения в целом в геосфере.

Сравнение содержаний РЗЭ в озерах с кларками гидросферы показало их превышение над кларком морских вод, хотя складывающиеся в озерных водах геохимические условия (щелочное значение рН и высокая минерализация) являются неблагоприятными для накопления и миграции РЗЭ в водах. Не смотря на это, в озере Красненькое отмечаются высокие концентрации РЗЭ, что, возможно, связано со значительными масштабами поступления их в воды за счет растворения пород, обогащенных этими элементами. Поэтому при анализе закономерностей поведения РЗЭ в озерных водах Ширинского района озеро Красненькое было исключено из расчетов, и как показано на рис. 2, среднее содержание РЗЭ в озерных водах значительно ниже кларка речных вод и сумма РЗЭ в среднем составляет лишь 213 нг/дм³.

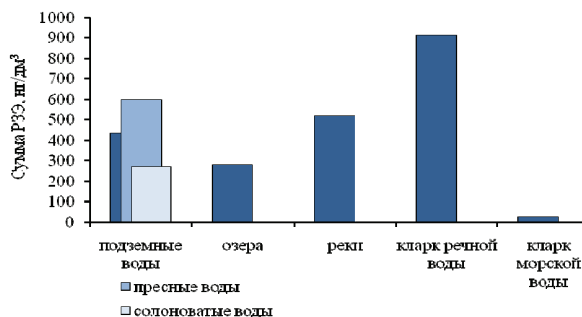


Рис. 2. Распространенность РЗЭ в природных водах Хакасии

Содержания РЗЭ в исследуемых речных водах варьируют в пределах 145...979 нг/дм³ при среднем значении 517 нг/дм³, что почти в два раза ниже кларка речных вод.

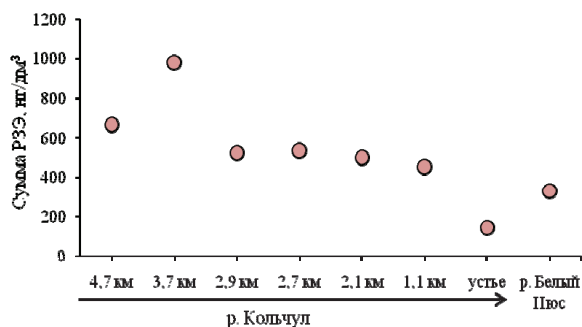


Рис. 3. Изменение суммы РЗЭ водах рек Кольчул и Белый Июс

При этом наблюдается тенденция уменьшения концентрации редкоземельных элементов от истока к устью реки Кольчул, рис. 3. Это может быть связано с активно протекающими процессами сорбции РЗЭ речной взвесью, а также с разбавлением речных вод атмосферными осадками по мере удаления от истока реки.

При этом максимальное содержание РЗЭ в водах реки Кольчул отмечается в 3,7 км от устья. Концентрация РЗЭ в данной точке составляет 979,30 нг/дм³, что больше концентрации в вышележащей точке и несколько нарушает общий тренд уменьшения содержания РЗЭ в речной воде от истока к устью.

Сумма редкоземельных элементов в подземных водах Ширинского района изменяется от 25 до 3000 нг/дм³ при среднем 435 нг/дм³, что значительно выше кларка морских вод, но меньше кларка речных вод. При этом подземные воды характеризуются наибольшими содержаниями РЗЭ среди всех рассматриваемых вод исследуемого региона, рис. 2. Это объясняется благоприятными геохимическими условиями (более низкими значениями рН, минимальными сорбционными процессами) для накопления элементов-гидролизатов, складывающимися в подземных водах.

В целом весьма низкие содержания РЗЭ в природных водах свидетельствует о неблагоприятных геохимических условиях для их накопления в растворе. Согласно анализу профиля распределения редкоземельных элементов, представленному на рис. 4, во всех исследуемых водах, кроме речных, наблюдается положительная аномалия европия. Европий способен в щелочной среде образовывать трудно растворимые и малоподвижные соединения, которые при окислении выпадают в осадок, что закономерно отражается в снижении его концентрации в растворе. Однако в рассматриваемых водах наблюдается иной характер поведения этого элемента, поскольку наибольшая положительная аномалия Eu характерна для пресных слабощелочных подземных вод, а в речных водах она отсутствует. Причину подобного поведения европия объяснить весьма сложно.

Также отмечаются незначительные положительные аномалии гольмия (Ho) и лютеция (Lu). Отрицательная аномалия церия в речных водах связана со способностью церия в окислительных условиях менять форму с двухвалентной на четырехвалентную и затем осажаться из водного раствора [8].

Таблица 4. Распространенность редкоземельных элементов в подземных водах Ширинского района Хакасии

| Наименование | Легкие РЗЭ (нг/дм ³) | | | | | | Тяжелые РЗЭ (нг/дм ³) | | | | | | | | ΣРЗЭ, нг/дм ³ |
|-----------------|----------------------------------|-------|------|------|------|------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------------|
| | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | |
| Подземные воды: | 52,9 | 100,5 | 12,1 | 45,8 | 8,9 | 9,6 | 9,9 | 1,7 | 6,5 | 1,9 | 3,4 | 0,8 | 3,7 | 1,1 | 316,56 |
| пресные | 74,9 | 133,9 | 15,9 | 57,8 | 10,1 | 5,3 | 11,5 | 1,6 | 6,1 | 1,5 | 2,9 | 0,8 | 3,6 | 1,1 | 371,8 |
| солончатые | 35,3 | 73,7 | 9,1 | 36,3 | 8,1 | 12,9 | 8,5 | 1,8 | 6,8 | 2,3 | 3,7 | 0,8 | 3,9 | 1,2 | 272,36 |

В литературе изложено большое количество возможных причин появления аномалий разных редкоземельных элементов [9–14]. На наш взгляд, часто эти аномалии возникают вследствие применения нормировки редкоземельных элементов в исследуемых водах на их содержание в стандартах горных пород – Североамериканском сланце, хондрите и т. д. Подобная нормировка используется для того, чтобы сгладить пилообразный характер профиля распределения редкоземельных элементов. Вместе с тем для нормировки могут быть использованы кларки редкоземельных элементов морских и речных вод. Применение подобного подхода позволит при нормировании учесть особенности поведения этих элементов в растворе. На рис. 5 представлены примеры нормировки со-

держаний редкоземельных элементов в водах Хакасии на кларк морских вод (а) и речных вод (б). При нормировке РЗЭ на кларк морских вод на профиле проявились все аномалии, выявленные на рис. 4.

При нормировке содержаний РЗЭ на кларк речных вод профиль имеет немного иной характер, однако на профиле остается явная аномалия европия и небольшая аномалия гольмия, при этом аномалия церия положительная. Вероятно, применение данного подхода к нормировке возможно при дифференцированном подходе к разным типам вод. Для нормирования содержаний РЗЭ в поверхностных пресных водах лучше использовать кларк речной воды, а в соленых водах лучше использовать кларк морской воды.

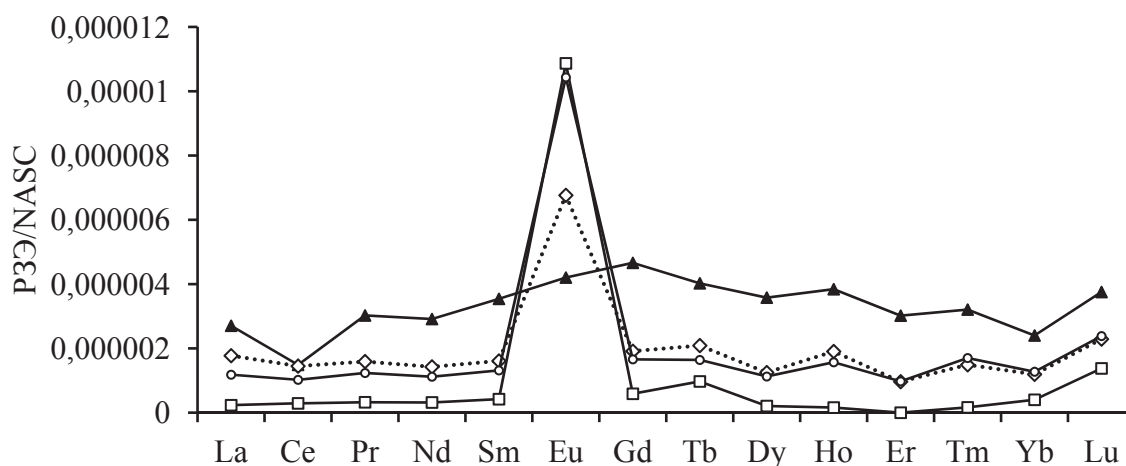


Рис. 4. Профиль распределения редкоземельных элементов в природных водах Хакасии при нормировании на североамериканский сланец (NASC)

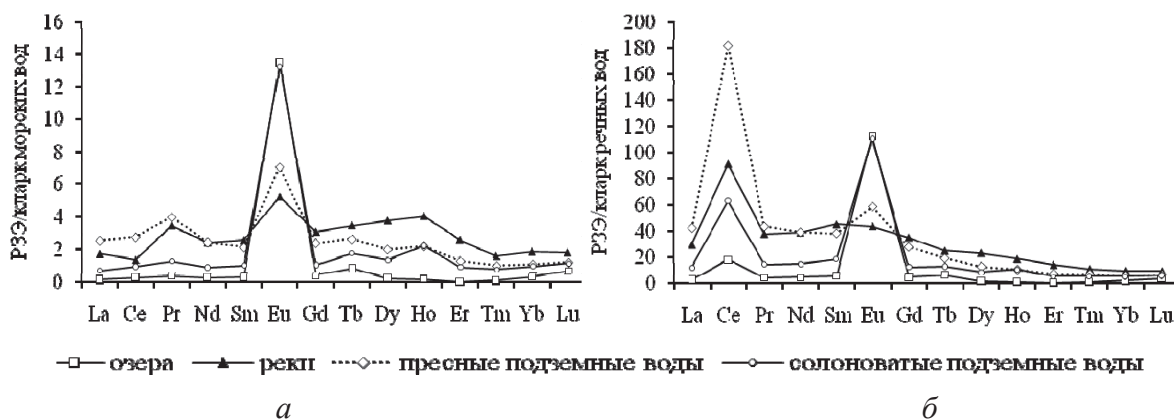


Рис. 5. Профиль распределения редкоземельных элементов в водах Хакасии при нормировании на кларк морской воды (а) и кларк речной воды (б)

Заключение

Геохимические особенности озерных, речных и подземных вод Хакасии, а именно высокие значения рН и (или) минерализации, являются неблагоприятными для накопления в растворе редкоземельных элементов. Содержания РЗЭ в рассматриваемых водах весьма низкие, значительно ниже кларка речных вод. Среди всех рассматриваемых вод максимальные содержания отмечаются в подземных водах, сумма РЗЭ составляет в среднем 435 нг/дм³, в озерных водах содержания РЗЭ минимальные, сумма РЗЭ – 280 нг/дм³. Согласно анализу профиля распределения редкоземельных элементов в водах Хакасии, выделяется несколько их положительных

аномалий практически во всех водах. Отмечается наличие значительной положительной аномалии европия, особенно в пресных щелочных водах. Кроме этого, присутствуют небольшие положительные аномалии гольмия и празеодима и отрицательная аномалия церия. Предложенный способ нормировки на кларки гидросферы также позволяет выделить аномалии тех же элементов, но при этом учитываются особенности миграции РЗЭ в растворе.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В.37.21.1152 от 14.09.2012 «Исследование влияния ландшафтно-геоморфологических условий на формирование химического состава озер Хакасии».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чудаев В.А. О соотношении химических элементов в различных фазах речного стока // Геохимия зоны гипергенеза и техническая деятельность человека. – Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1976. – С. 65–72
2. Чудаев О.В., Чудаева В.А. Микроэлементы и элементы редкоземельной группы в минеральных водах Приморья // Геология и горное дело в Приморье прошлом, настоящем и будущем. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – С. 93–96.
3. Banks D., Parnachev V.P., Frengstad B., Holden W., Karnachuk O.V., Vedernikov A.A. The evolution of alkaline, saline ground- and surface waters in the southern Siberian steppes // Applied Geochemistry. – 2004. – V. 19. – № 12. – P. 1905–1926.
4. Водные ресурсы Ширинского района Республики Хакасия / под ред. В.П. Парначева. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. – 171 с.
5. Парначев В.П., Вишневецкий И.И., Бэнкс Д., Макаренко Н.А., Копылова Ю.Г., Сметанина И.В., Архипова Н.В., Архипов А.Л. Минеральные озера Республики Хакасия (общая характеристика и состав вод) // Вопросы географии Сибири. – 2003. – Вып. 25. – С. 118–135.
6. Природные воды Ширинского района Республики Хакасия / под ред. В.П. Парначева. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. – 183 с.
7. Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Хвашевская А.А., Сметанина И.В. Химический состав соленых озер Северо-Минусинской котловины, Хакасия // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 163–168
8. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. – М: Недра, 2004. – 430 с.
9. Ronnback R., Astrom M., Gustafsson Jon-P. Comparison of the behaviour of rare earth elements in surface waters, overburden groundwaters and bedrock groundwaters in two granitoidic settings, Eastern Sweden // Applied Geochemistry. – 2008. – № 23 – P. 1862–1880.
10. Lin Chunye, He Mengchang, Li Yanxia, Yang Linsheng, Liu Ruimin, Yang Zhifeng. Rare earth element content in the SPM of Daliao river system and its comparison with that in the sediments, loess and soils in China // Journal of rare earths. – 2008. – № 3. – P. 414–420.
11. Sultan K., Shazili N.A. Rare earth elements in tropical surface water, soil and sediments of the Terengganu River Basin, Malaysia // Journal of rare earths. – 2009. – № 6. – P. 1072–1085.
12. Kulaksiz S., Bau M. Contrasting behaviour of anthropogenic gadolinium and natural rare earth elements in estuaries and the gadolinium input into the North Sea // Earth and Planetary Science Letters. – 2007. – № 260. – P. 361–371.
13. Steinmann M., Stille P. Controls on transport and fractionation of the rare earth elements in stream water of a mixed basaltic-granitic catchment basin (Massif Central, France) // Chemical Geology. – 2008. – № 254. – P. 1–18.
14. Davranche M., Pourret O., Gruau G., Dia A., Jin D., Gaertner D. Competitive binding of REE to humic acid and manganese oxide: Impact of reaction kinetics on development of cerium anomaly and REE adsorption // Chemical Geology. – 2008. – № 247. – P. 154–170.

Поступила 20.12.2012 г.

УДК 551.577.53:553.982.2

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СНЕГОТАЛОЙ ВОДЕ ИЗ РАЙОНОВ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Т.С. Большунова

Томский политехнический университет

ОАО «ТомскНИПИнефть», г. Томск

E-mail: bts26@mail.ru

Приведены данные по содержаниям химических элементов в снеготалой воде, полученные при снеговой съёмке территории влияния нефтегазодобывающего комплекса Томской области. Установлено, что для данной территории выявляются повышенные концентрации таких элементов, как Li, Be, Na, Mn, Ni, Zn, As, Mo, Th, U, что может быть обусловлено как влиянием выбросов от источников загрязнения атмосферы на нефтяных месторождениях, так и региональным атмосферным переносом загрязняющих веществ от промышленных предприятий Томской и соседних областей.

Ключевые слова:

Снеготалая вода, нефтегазодобывающий комплекс Томской области, ледники, мониторинг снегового покрова, источники выбросов загрязняющих веществ.

Kew words:

Snow melted water, oil and gas plants of Tomsk region, ice cores, snow cover monitoring, sources of pollutant emissions.

Последние десятилетия с ростом темпов нефтедобывающего производства остро встаёт вопрос о негативном воздействии нефтедобывающей промышленности на окружающую среду Западной Сибири. Важным способом оценки воздействия подобного производства и дальнейших прогнозов является экологический мониторинг. Одним из инструментов комплекса экологического мониторинга служит мониторинг состава снегового покрова. Мониторинг состава снегового покрова (снеговая съёмка) позволяет оценить влияние нефтегазодобывающих производств, наряду с влиянием трансграничных переносов за период его накопления. Фактором, обуславливающим применение снеговой съёмки на территории Томской области, является то, что данная территория находится в зоне устойчивого снегового покрова продолжительный период года. Целью данной работы является сравнение результатов проведения снеговой съёмки с опубликованными материалами по аналогичному вопросу для выявления характерных химических элементов, концентрирующихся в снеговом покрове районов нефтегазодобывающего комплекса (НГДК).

Что касается вопроса изучения геохимических особенностей компонентов природных сред Том-

ской области, и в частности районов НГДК, то по ним имеются некоторые опубликованные материалы. По данным Н.В. Барановской, при изучении живого вещества зон нефтехимического производства выявляются такие специфичные химические элементы, как Sb, Br [1]. Результаты исследований А.М. Межибор указывают на повышенные концентрации Na, Sc, Co, Fe, Rb, Sb, Cs, Ba, Hf и лантаноидов в верховых торфах района нефтедобычи Томской области [2]. Также имеется информация и по геохимическим особенностям твёрдофазного остатка снега в районах Томской области, в том числе в районах НГДК [3, 4], по результатам изучения которого Е.Г. Языковым обнаружены следующие типоморфные элементы: Ba, Br, Tb, Na, Si. По данным изучения радиогеохимических особенностей твёрдофазных выделений снегового покрова отмечается, что для районов нефтегазодобычи характерны пониженные значения радиоактивных элементов. Величина пылевой нагрузки аналогично характеризуется низкими значениями [3]. Опубликованные материалы А.Ю. Шатилова указывают, подобно исследованиям Н.В. Барановской [1], на такие характерные элементы твёрдой фазы снегового покрова районов нефтехимического производства Томской области, как Sb, Br [4].

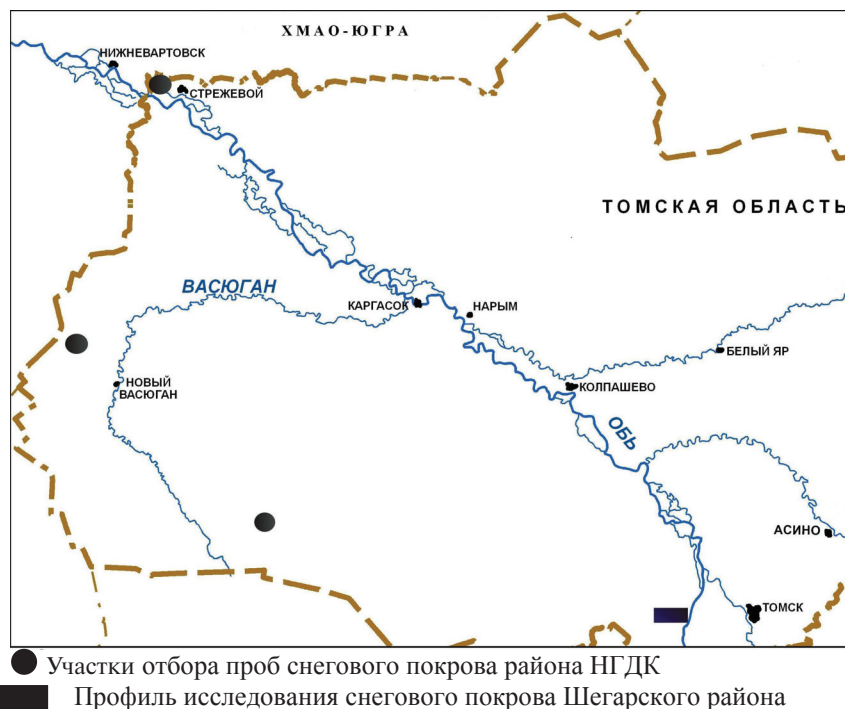


Рис. 1. Схема расположения участков отбора проб снегового покрова района НГДК и Шегарского района Томской области

На наш взгляд, снеготалая вода может оказывать также достаточно информативным показателем состояния окружающей среды в районах НГДК Томской области.

Для оценки влияния НГДК на атмосферный воздух путем изучения снеготалой воды в марте 2011 г. были отобраны пробы снега в трёх нефтедобывающих районах Томской области: Александровском, Парабельском и Кургасокском (рис. 1). Снег в этих районах лежит с ноября по май. Средняя высота снежного покрова на открытых участках составляет 53 см. Ветры преобладают юго-западные и южные.

Отбор проб снега для установления максимального и минимального загрязнения снежного покрова проводился с учетом розы ветров. Пробы отбирались в точках на потенциально загрязненных территориях с подветренной стороны от факельных установок (контрольные пункты мониторинга) на расстоянии 10–40 эффективных высот факелов и менее подверженных влиянию источников выбросов на месторождениях (условно фоновые площадки месторождений), которые находятся на наибольшем удалении от источников выбросов, чтобы исключить их влияние [5]. Пробы снега отбирались согласно ГОСТ 17.1.5.05-85.

Специфика состава выбросов нефтедобывающего комплекса такова, что многие химические элементы находятся в низких концентрациях, и в связи с этим важным является выбор метода анализа снеготалой воды. Для анализа был выбран метод масс-спектрометрии с источником ионизации

в виде индуктивно-связанной аргоновой плазмы (ИСП-МС), который характеризуется низкими пределами обнаружения, экспрессностью, широким диапазоном измеряемых показателей. Кроме того, он позволяет определять широкий спектр элементов одновременно. ИСП-МС более всего подходит для точного количественного анализа химических элементов при их низких содержаниях.

Пробы были проанализированы на содержание 63 элементов в лаборатории Аналитического центра геохимии природных систем, Томский Государственный Университет, г. Томск, на масс-спектрометре Agilent 7500 сх (аналитики Ю.В. Аношкина, Е.И. Никитина, Т.В. Трофимова).

Полученные нами результаты при проведении мониторинга снежного покрова районов НГДК были сопоставлены с информацией по химическому составу проб снеготалой воды, отобранных по профилю исследований в Шегарском районе Томской области (И.С. Соболев, 2011 г.).

Эта территория характеризуется слабым развитием промышленного производства, а основным видом деятельности населения является сельское хозяйство. Пробы снеготалой воды из Шегарского района были проанализированы также методом ИСП-МС на содержание 30 элементов в ООО Химико-аналитическом центре «Плазма» (аналитик Л.Н. Ивлева). Данные по содержаниям некоторых химических элементов снеготалой воды района НГДК, Шегарского района Томской области, а также ледника Большой Актру, речь о котором пойдет ниже, представлены для сравнения в таблице.

Таблица. Концентрация некоторых химических элементов (мкг/л) в снеготалой воде районов НГДК, Шегарского района Томской области и ледника Большой Актру (Горный Алтай)

| Элементы | Содержание в снеготалой воде районов НГДК Томской обл. (9 образцов) | | | | Кс, ед. | Среднее в снеготалой воде из Шегарского района (21 образец) | Кс**, ед. | Среднее в снеготалой воде ледника Большой Актру [8] |
|----------|---|-----------------------------------|--------|--------|---------|---|-----------|---|
| | Среднее для фоновых площадок территории НГДК | Для контрольных точек мониторинга | | | | | | |
| | | $X_{cp} \pm \sigma$ | max | min | | | | |
| Li | 0,24 | 0,31±0,1 | 0,389 | 0,126 | 1,3 | 0,079±0,04 | 3,9 | 0,34 |
| Be | 0,0005 | 0,0004±0,0001 | 0,0053 | н.п.о. | 0,08 | н.п.о. | | н.д. |
| B | н.п.о. | н.п.о. | н.п.о. | н.п.о. | | н.п.о. | 1 | н.д. |
| Na | 1187,59 | 4779±2077 | 7491,1 | 172,9 | 4,0 | 624±174 | 7,7 | 410,8 |
| Mg | 153 | 125±39 | 127,5 | 97,0 | 0,8 | 288,2±141,0 | 0,4 | 232,53 |
| Al | 0,44 | 1,2±0,9 | 1,48 | 0,208 | 2,7 | 3,71±1,8 | 0,3 | 8,94 |
| P | 0,3 | 0,45±0,15 | 19,314 | н.п.о. | 1,5 | 20,3±13 | 0,02 | н.д. |
| K | 86,8 | 133±83,0 | 151,17 | 60,5 | 1,5 | 232,6±151,0 | 0,6 | 864,32 |
| Ca | 306 | 262±157,0 | 2955,6 | 210,98 | 0,9 | 1199±326 | 0,2 | 916,28 |
| V | 0,05 | 0,05±0,01 | 0,078 | 0,038 | 1 | 0,15±0,1 | 0,3 | 0,97 |
| Cr | 0,025 | 0,12±0,05 | 0,189 | 0,063 | 4,8 | н.п.о. | 0,09 | 1,66 |
| Mn | 6,06 | 3,08±1,8 | 3,42 | 1,17 | 0,5 | 2,48±0,9 | 1,2 | 64,19 |
| Fe | 0,86 | 0,88±0,5 | 0,95 | 0,142 | 1,0 | 43,5±9,7 | 0,02 | 3540,4 |
| Co | 0,01 | 0,013±0,002 | 0,015 | 0,01 | 1,3 | 0,06±0,01 | 0,2 | 0,55 |
| Ni | 0,004 | 0,006±0,002 | 1,54 | н.п.о. | 1,5 | н.п.о. | | 1,45 |
| Cu | н.п.о. | 0,08±0,03 | 5,17 | н.п.о. | | 0,55±0,2 | 0,1 | 3,77 |
| Zn | 6,42 | 5,9±2,9 | 24,9 | 2,08 | 0,9 | 4,9±1,7 | 1,2 | 8,53 |
| As | 0,19 | 0,21±0,08 | 0,24 | 0,123 | 1,1 | 0,13±0,09 | 1,6 | 2,12 |
| Sr | 12,6 | 2,8±1,2 | 32,4 | 1,56 | 0,2 | 5,2±1,2 | 0,5 | 8,95 |
| Mo | 0,06 | 0,06±0,04 | 0,136 | н.п.о. | 1 | 0,04±0,02 | 1,5 | 0,17 |
| Cd | 0,03 | 0,004±0,002 | 0,052 | н.п.о. | 0,1 | 0,023±0,01 | 0,2 | 0,1 |
| Ba | 0,76 | 0,71±0,3 | 1,07 | 0,473 | 0,9 | 5,62±1,3 | 0,1 | 9,01 |
| Pb | 0,09 | 0,017±0,006 | 1,92 | н.п.о. | 0,2 | 0,062±0,03 | 0,3 | 1,1 |
| Th | 0,08 | 0,047±0,02 | 0,12 | 0,07 | 0,6 | 0,0016±0,00007 | 29,4 | 0,02 |
| U | 0,005 | 0,004±0,001 | 0,006 | 0,003 | 0,8 | 0,0024±0,00009 | 1,7 | 0,01 |

Кс – превышение среднего (X_{cp}) над фоном месторождения; Кс* – превышение среднего значения района НГДК над средним значением Шегарского района; σ – стандартное отклонение.

Обработка данных района НГДК и Шегарского района осуществлялась с помощью программного продукта Statistica 6, были проанализированы результаты по концентрациям 25 элементов, при сравнении которых с использованием критерия Колмогорова–Смирнова были получены достоверные отличия ($p < 0,01$). При выполнении аналитических исследований содержания некоторых элементов в образцах были определены в концентрациях ниже предела обнаружения анализа. Такие значения заменялись на половину предела обнаружения, чтобы избежать искусственного завышения среднего содержания элемента в выборке.

Поскольку в выборках по некоторым элементам наблюдаются высокие коэффициенты вариации, и средние значения завышены за счет проб с аномально высоким содержанием компонентов, была проведена выбраковка крайних сомнительных значений.

Сравнивая результаты, полученные при обработке данных фоновых площадок и мониторинговых точек из района месторождений, видно, что в большинстве проб фоновых пунктов концентрации химических элементов превышают их содержания в контрольных точках. Вероятно, на услов-

но фоновые пункты отбора проб, расположенные на наибольшем удалении от источников загрязнения атмосферы, оказывают влияние источники, находящиеся на соседних месторождениях.

При сравнении средних значений содержания химических элементов в снеготалой воде районов НГДК и Шегарского района Томской области обнаруживается превышение концентрации элементов в снеготалой воде из районов НГДК над таковыми в Шегарском районе по следующим элементам: Li, Be, Na, Ni, Mn, Ni, Zn, As, Mo, Th, U в 1,2–29 раз. В то же время превышение содержания элементов снеготалой воды Шегарского района над данными исследуемой территории НГДК наблюдается для Mg, Al, P, K, Ca, Cr, Fe, Co, Cu, Sr, Cd, Ba, Pb в 1,5–48 раз. По результатам геохимических исследований И.С. Соболева (2011 г.), аномально высокие концентрации химических элементов, зафиксированные в группе проб по профилю в Шегарском районе, вероятно, могут отражать зоны и очаги эндогенного массопереноса вещества. На это указывает их пространственная связь с тектонической границей палеозойского выступа фундамента, выявленного сейсморазведочными работами МОГТ-2D (метод общей глубин-

ной точки), и предполагаемой неструктурной ловушкой прогнозируемой залежи углеводородов. Еще одним фактом наличия в этом районе глубинных сквозьформационных потоков, обогащенных химическими элементами, является гидрохимическая хлорит-натриевая аномалия, наблюдаемая в палеогеновых водах Томского водозабора в районе пос. Козюлино. Ее происхождение связывают с поступлением минерализованных меловых и палеозойских вод [6]. Результаты наземных исследований в пределах этой аномалии показали обогащенность снегового покрова углеводородными газами и высокие, отличающиеся на порядок от фоновых значений, концентрации Cu, Al, Fe в снеготалой воде [7].

Для сопоставления результатов мониторинга состава снегового покрова НГДК представляется интересным использовать данные района ледника Актру (Горный Алтай) [8], находящегося на значительном расстоянии от исследуемой нами территории.

Из таблицы, представленной выше, отчетливо видно, что более высокие концентрации химических элементов преимущественно наблюдаются в снеготалой воде ледника Актру (Горный Алтай). Исключение составляет лишь содержание тория и натрия.

Результаты сравнения свидетельствуют о вероятной подверженности района расположения ледника воздействию промышленности Рудного Алтая (Восточно-Казахстанский промышленный район). Специфика предприятий цветной металлургии (свинцово-цинковый комбинат, титаномагнитный комбинат, металлургический завод и другие предприятия г. Усть-Каменогорска, Восточно-Казахстанской области) такова, что помимо основных извлекаемых из руд компонентов, таких как цинк, свинец, титан, медь, магний, алюминий,

марганец, попутно извлекается из сырья и соответственно присутствует в составе выбросов металлургических предприятий ряд попутных элементов.

Кривые содержания элементов в снеготалой воде представлены на рис. 2.

Сопоставление полученных нами данных по концентрациям химических элементов в снеготалой воде НГДК с таковыми из регионов Антарктики и Центральной Гренландии, наименее всего подверженных воздействию промышленности и влиянию трансграничных переносов, показало, что содержания элементов в ядрах льда и снега данных областей характеризуются ультраследовыми значениями, несмотря на постоянное и неуклонное увеличение последних с момента индустриальной революции до настоящего времени [9–11]. При анализе геохимических особенностей талой воды антарктических областей [12] и снеготалой воды районов НГДК Томской области наблюдается превышение концентрации химических элементов в последней на 5–7 порядков.

Заключение

В связи с небольшим перечнем элементов, по которым установлены превышения, в большей степени незначительные, по комплексу изученных химических элементов можно судить о низкой степени трансформации геохимических сред в районах НГДК Томской области, которые на фоне глобальных атмосферных выпадений практически не выделяются в сибирском регионе. Тем не менее, результаты сравнения концентраций элементов в снеготалой воде территории влияния НГДК с содержаниями в таковой Шегарского района, обнаружены более высокие значения для района НГДК таких элементов, как литий, бериллий, натрий, марганец, никель, цинк, мышьяк, молибден, то-

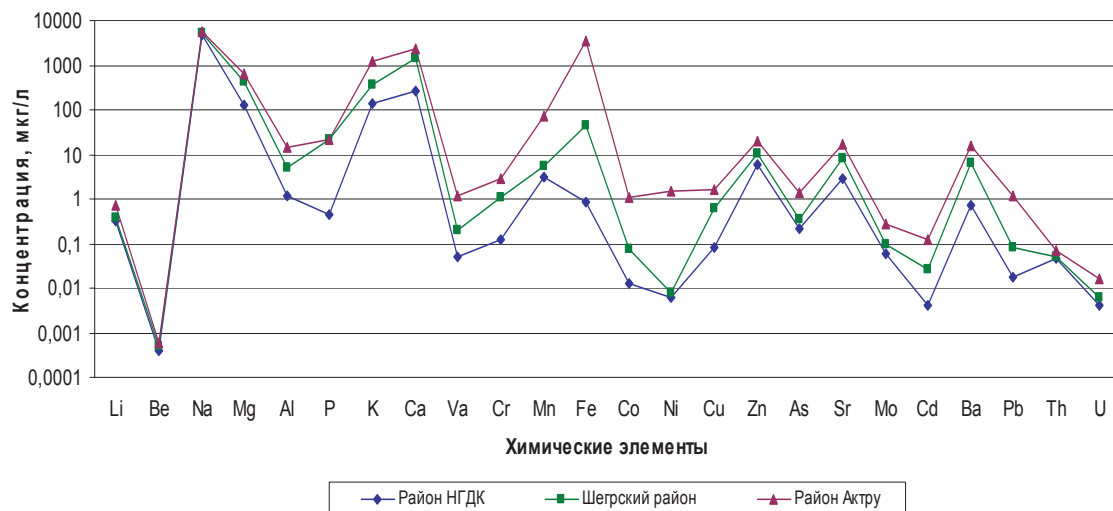


Рис. 2. Кривые содержания химических элементов в снеготалой воде районов НГДК Томской области, Шегарского района Томской области и Актру (Горный Алтай)

рий, уран. Вероятно, превышения обусловлены выбросами загрязняющих веществ, образующихся при сгорании попутного нефтяного газа на факельных установках, в печах подогрева нефти, при эксплуатации дизельных электростанций, транспортной техники. Отчасти это может быть связано

с дальними переносами загрязняющих веществ от источников выбросов предприятий других районов и областей.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам департамента экологии ОАО «ТомскНИПИнефть» за помощь в пробоотборе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барановская Н.В. Закономерности накопления и распределения химических элементов в организмах природных и природно-антропогенных экосистем: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Томск, 2011. – 46 с.
2. Межибор А.М. Экогеохимия элементов-примесей в верховых торфах Томской области: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2009. – 22 с.
3. Язык Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2006. – 45 с.
4. Шатилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2001. – 205 с.
5. Гендрин А.Г., Надоховская Г.А., Смирнова Н.К., Середина В.П., Непотребный А.И., Киселев А.Г., Русинова Е.С., Худобец А.М., Серых А.А., Чемерис А.Н. Экологическое сопровождение разработки нефтегазовых месторождений. Вып. 2. Мониторинг природной среды на объектах нефтегазового комплекса. – Новосибирск: Гос. публич. науч.-техн. б-ка СО РАН, 2006. – 122 с.
6. Колокова О.В. Геохимия подземных вод района Томского водозабора: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2003. – 215 с.
7. Соболев И.С., Рихванов Л.П. Гамма-спектрометрические исследования поверхностных отложений нефтегазоносных площадей Западной и Средней Сибири // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2009. – № 5. – С. 31–37.
8. Рихванов Л.П., Робертус Ю.В., Таловская А.В., Любимов Р.В., Шатилов А.Ю. Особенности распределения химических элементов в талой воде ледника Большой Актру (Горный Алтай) // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 97–103.
9. Boutron C.F., Patterson C.C. Lead concentration changes in Antarctic ice during the Wisconsin. Holocene transition // Nature. – 1986. – № 323. – P. 222–225.
10. Boutron C.F., Patterson C.C. Relative levels of natural and anthropogenic lead in recent Antarctic snow // Journal of Geophysical Research. – 1987. – № 92. – P. 8454–8464.
11. Murozumi M., Chow T.J., Patterson C. Chemical concentrations of pollutant lead aerosols, terrestrial dusts and sea salts in Greenland and Antarctic snow strata // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1969. – V. 33. – P. 1247–1294.
12. Planchon F., Boutron C., Barbante C., Cozzi G., Gaspari V., Wolf E., Ferrari Ch., Cescon P. Short-term variations in the occurrence of Heavy metals in Antarctic snow from Coats Land since the 1920-s // The science of the Total Environment. – 2002. – № 300. – P. 129–142.

Поступила 18.06.2012 г.

УДК 622.341:622271.6(071.16)

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ БАКЧАРСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕТОДОМ СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ

И.Р. Шайхиев

Томский политехнический университет

E-mail: ildar.shaihiyev@mail.ru

Рассматриваются основные геоэкологические проблемы, которые могут возникнуть при разработке Бакчарского железорудного месторождения методом скважинной гидродобычи. Проанализирован опыт предыдущих лет, когда данный метод применяли на Тарском циркон-ильменитовом месторождении и Шамраевском участке Курской магнитной аномалии.

Ключевые слова:

Бакчарское месторождение, скважинная гидродобыча, окружающая среда, геоэкологические проблемы.

Key words:

Bakchar deposit, hydraulic borehole mining, environment, geo-ecological problems.

Впервые экологические проблемы при возможных геотехнологических способах отработки Бакчарского месторождения озвучены в работе [1].

Технология разработки Бакчарского месторождения методом скважинной гидродобычи (СГД) прежде всего связана с физико-геологической обстановкой залеганий рудного тела. Влияние на его разработку оказывает ряд природных условий, свойства руды и вмещающих пород (геологические и гидрогеологические условия, механические и гидравлические свойства руд). Использование СГД создает преимущества, которые по-новому позволяют оценить перспективы как известных (Шамраевское, Тарское), так и вновь отработываемых (Бакчарское) месторождений.

На рис. 1 представлена технологическая схема предприятия скважинной гидродобычи.

Сущность способа СГД состоит во вскрытии рудных залежей скважинами, с последующим гидромониторным разрушением рудного массива, и выдаче руды на поверхность в виде пульпы.

Дальнейшая работа уже идет с пульпой с соотношением твердой фазы к жидкой 1:3.

Технология СГД является безотходной и сравнительно экологически приемлемой. Она позволяет избежать отчуждения значительных площадей на поверхности земли под промышленное строительство. По всем технико-экономическим показателям способ СГД значительно эффективнее традиционных способов добычи [2, 3].

Воздействие СГД на воздушный бассейн, поверхность земли, почвенный покров, флору и фауну незначительное и ограничивается только территорией горного отвода. На подземные воды СГД оказывает среднее влияние, а на недра (добычное пространство) – сильное [1]. В последнем случае это обусловлено неизбежными изменениями напряженно-деформационного состояния горного массива, гидрогеологической и газодинамической обстановки в нем. Поэтому создание системы постоянно действующего мониторинга состояния недр в местах СГД считаем необходимым, по-

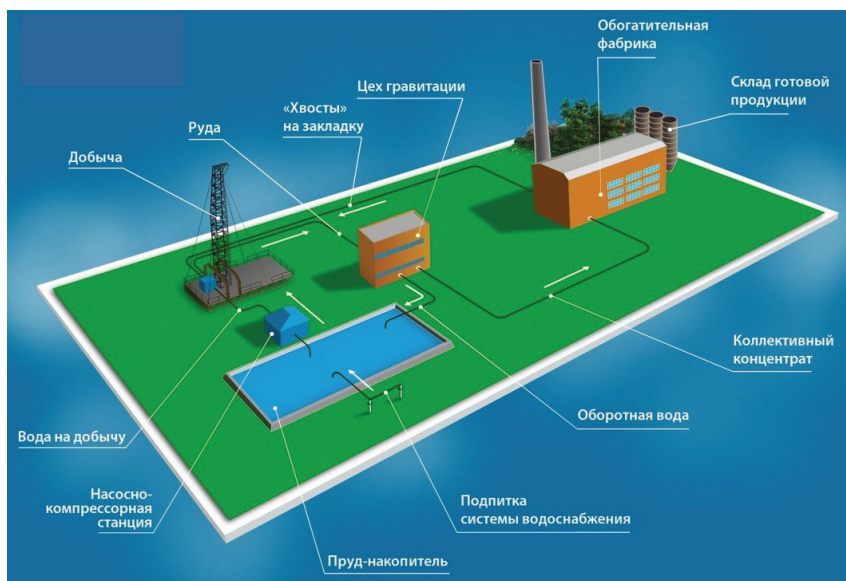


Рис. 1. Технологическая схема предприятия скважинной гидродобычи

сколькo неконтролируемый самопроизвольный процесс обрушения кровли может привести к катастрофической просадке вышележащих слоев горных пород, нарушению гидрогеологического режима подземных вод.

С экономической точки зрения СГД дешевле в 5–7 раз, чем шахтный, и в 2–3 раза, чем открытый способы [3]. При небольших финансовых затратах этот способ добычи полезного ископаемого поддается полной автоматизации производственных процессов. Автоматизация и компьютеризация технологии СГД позволяет создавать практически безлюдные горнодобывающие производства.

Влияние горнодобывающего комплекса на рельеф и геодинамические процессы

Развитие горнодобывающей промышленности в регионе с каждым годом будет усиливать ее влияние на состояние геологической среды. Это проявляется как в изменении геологического строения района добычи железорудного сырья, так и в активизации различных геодинамических процессов, обусловленных техногенным воздействием на литосферу. Геодинамические процессы разнообразны, среди них различают: геомеханические, геохимические и геобиохимические.

Геомеханические явления на железорудных месторождениях представлены наиболее широко. К ним относятся: сдвигание горных масс, обрушения, обвалы, осыпи, горные удары, оползни, сели, эрозия, дефляция и др.

Образование, характер и интенсивное проявление геомеханических явлений на Бакчарском месторождении будут обусловлены тремя основными следствиями горных работ: перемещением горных масс, изменением местного базиса эрозии и разрушением горных массивов, минеральных агрегатов и индивидов с образованием дисперсных обломочных фракций с большой удельной поверхностью.

С перемещением горных масс будет связано изменение местного базиса эрозии и, как следствие этого, усиление энергии рельефа, от которой зависит скорость и направление геомеханических процессов как в пределах комплекса, так и на прилегающих к нему территориях. Рельеф в данном случае будет оказывать большое влияние на формирование стока поверхностных и подземных вод. Для экологической оценки окружающей среды это обстоятельство имеет большое значение.

Распространение на относительно ограниченной территории горного отвода техногенного рельефа будет обуславливать здесь широкое распространение активных неравновесных склонов.

Если на обычном склоне перенос вещества осуществляется поверхностными потоками, то на насыпных склонах существенную роль играет перераспределение вещества внутри отвала.

Таким образом, геодинамические процессы будут представлять собой естественную реакцию природной системы на техногенное воздействие и в некоторых случаях существенно влиять на ре-

зультаты хозяйственной деятельности в горнодобывающих районах. Поэтому изучение геодинамических процессов и организация соответствующего вида мониторинга на Бакчарском железорудном месторождении в случае его отработки будут иметь важное научное и практическое значение.

Влияние горнодобывающего комплекса на поверхностные и подземные воды

Разработка месторождения железной руды будет способствовать усилению заболачивания земель. Попадание неотстоявшихся сточных вод в имеющуюся на водосборе гидрографическую сеть приведет к ее заиливанию. Из-за очень низкой степени дренированности территории это приведет к значительному усилению процесса заболачивания земель. Из-за возможных локальных просадок грунта скважинную гидродобычу следует начинать от дренирующего водотока к водоразделу, и при необходимости проводить земляные работы для организации сброса поверхностных вод из системы просадок к дренирующему водотоку [4].

В районе разработки месторождения может происходить не только загрязнение и истощение подземных вод, но и образование новых гидрогеологических тел, получивших название «техногенных водоносных горизонтов в гидрогеологической практике», что было установлено в горнопромышленных районах Курской магнитной аномалии [5]. Отличаются они от естественных водоносных горизонтов особыми свойствами техногенных водовмещающих пород, особенностями гидрохимического и гидродинамического режимов. Типизация техногенных водоносных горизонтов в пределах изучаемого региона позволяет выделять четыре основных типа техногенных водоносных горизонтов: промышленный, гидротехнический, а в населенных пунктах, примыкающих к горнопромышленным объектам, – коммунальный тип.

Наиболее сильно будет нарушен режим подземных вод в пределах участка первоочередной отработки Бакчарского месторождения (западный участок, пос. Бакчар). В будущем при интенсивной разработке данного месторождения здесь может образоваться депрессионная воронка.

Существенное изменение претерпят поверхностные водные источники. В зоне влияния водопонижительных систем некоторые реки окажутся в «подвешенном» состоянии, а их питание будет осуществляться за счет сброса в них дренажных вод с высоким содержанием загрязняющих веществ.

Влияние горнодобывающего комплекса на почвенный покров

Помимо своей основной биосферной функции почвенный покров выполняет и роль регионально-геохимического барьера для многих химических элементов и их соединений, в том числе и тяжелых металлов в форме органометаллических комплексов. В будущем эта функция почвенного покрова

заметно усилится на данной территории, где будет происходить преобразование естественных ландшафтов в техногенные под влиянием горнодобывающего комплекса.

В процессе добычи железной руды железо и его спутники (Cr, Cu, Co, Zn, Ni и т. д.) будут попадать на почвенно-растительный покров и почва, являясь местом максимального накопления всех выбросов, выступит в роли мощного фильтра, который будет прочно фиксировать все тяжелые металлы и существенно ослабит их попадание в наземную растительную массу и грунтовые воды (табл. 1).

Таблица 1. Содержание некоторых химических элементов (г/т) в пробах железной руды Бакчарского проявления (Fe, %)

| Элемент | Проба | | Кларк земной коры (по Н.В. Григорьеву) |
|---------|-------------------------------------|-----------------------------|--|
| | Железистые песчаники кровли (175 м) | Среднее рыхлая руда (250 м) | |
| Fe | 9,4 | 42,8 | 3,2 |
| Sm | 24,1 | 25,9 | 3,8 |
| Cr | 53,8 | 209,8 | 55 |
| Co | 10,7 | 60,55 | 13 |
| As | 725,1 | 437,1 | 7,2 |
| Au | 0,02 | 0,077 | 0,083 |
| Hf | 0,1 | 3,25 | 4,5 |
| Th | 3,8 | 14,15 | 7,8 |
| La | 92,6 | 65,25 | 20 |
| Ce | 39,7 | 147,4 | 39 |
| Eu | 0,05 | 2,75 | 0,84 |
| Tb | 0,67 | 2,75 | 0,7 |
| Yb | 7,4 | 6,4 | 18 |
| Lu | 1,1 | 0,975 | 0,83 |

Из табл. 1 видно, что по сравнению с содержанием элементов в земной коре, руды месторождения высоко обогащены мышьяком, вследствие чего при разработке месторождения он, вероятно, будет попадать практически во все природные среды.

В табл. 2 представлены коэффициенты концентрации химических элементов в рудах месторождения.

Таблица 2. Коэффициент концентрации элементов в пробах железной руды

| Коэффициент концентрации | |
|--------------------------|--|
| Песчаники кровли (175 м) | As _{100,7} Sm _{6,34} La _{4,63} Yb _{4,11} Fe _{2,93} Lu _{1,33} Ce _{1,02} Cr _{0,98} Tb _{0,96} Co _{0,82} Th _{0,49} Au _{0,24} Hf _{0,02} |
| Рыхлая руда (250 м) | As _{60,71} Fe _{13,33} Sm _{6,82} Co _{4,66} Tb _{3,93} Cr _{3,81} Ce _{3,78} Yb _{3,56} Eu _{3,27} La _{3,26} Th _{1,81} Lu _{1,17} Au _{0,93} Hf _{0,72} |

Исследуемые почвы в основном представлены такими видами, как серые-лесные, серые-лесные глеевые и глееватые. Твердые металлы и другие ингредиенты, попадая в почву, будут адсорбироваться на коллоидные частицы, переходя в недоступные растениям формы. Все эти показатели в конечном итоге представляют собой барьер на пути накопления подвижных форм твердых металлов в почвах.

Влияние горнодобывающего комплекса на растительный и животный мир

По результатам полевых исследований установлено, что на сохранившихся участках природной растительности смежных с промышленными зонами территориях сохранилась естественная луговая растительность. На лесных и луговых и водно-болотных участках, представленных в районе месторождения железных руд, отмечено множество видов растений.

Фауна рассматриваемой территории включает в основном виды с широкой экологической амплитудой.

Леса и луга вне границ промышленной зоны и населенных пунктов используются в качестве сенокосных угодий, пастбищ и в рекреационных целях.

Расположенный в непосредственной близости к месторождению участок заказника «Васюганский» может в определенной мере служить эталонным зонального типа животного населения. Здесь представлены характерные луговые и лесные виды, быстро исчезающие при хозяйственном вторжении в целинные сообщества.

Некоторое увеличение разнообразия животных и плотности их населения наблюдается за пределами промышленных зон предприятий и населенных пунктов в полосе до 10 км.

Таким образом, состояние экосистемы при разработке Бакчарского месторождения будет характеризоваться как напряженное:

- 1) сверхнормативные уровни загрязнения окружающей среды по ряду параметров и показателей будут выходить за пределы установленных санитарных и защитных зон;
- 2) будет констатироваться неудовлетворительное состояние биоты и экосистем на территории земельного отвода горнопромышленного предприятия;
- 3) будут наблюдаться негативные тенденции изменения биоты, выявляемые за пределами санитарно-защитной зоны предприятия, включая участки особо охраняемых природных территорий, что обусловлено воздействием комплекса горнопромышленных и промышленных предприятий, значительной селитебной нагрузкой, интенсивным ведением сельского хозяйства.

Влияние горнодобывающего комплекса на ландшафты

Техногенез в горнопромышленных районах как фактор преобразования природных систем (в том числе геологической среды) в настоящее время приобрел не только локальное, но и региональное значение. В результате в районе разработки Бакчарского месторождения могут формироваться новые по своему генезису, структуре и функционированию техногенные ландшафты. Техногенные ландшафты в своем развитии проходят две основные фазы — техногенного формирования и пост-

техногенного развития. В техногенную фазу формируется своеобразная каркасная (литогенная) основа: рельеф и его основные характеристики, горные породы с их вещественным составом и свойствами. В посттехногенную фазу развития ландшафта литогенная основа постепенно преобразуется посредством естественных ландшафтообразующих факторов. И, как следствие этого, техногенный ландшафт постепенно трансформируется в природно-техногенный ландшафт.

Быстрое нарастание площадей техногенных ландшафтов в рассматриваемом районе делает приоритетной задачу их типизации и классификации с позиций теории ландшафтоведения и геохимии окружающей среды.

Известно несколько подходов к классификации техногенных геохимических ландшафтов [6–8]. В качестве базовых критериев мы выбрали представления [8] о видах миграции химических элементов в зависимости от форм движения материи, а также разделение ландшафтов по условиям миграции химических элементов, предложенное М.А. Глазовой [7].

В понимании указанных авторов почвы и растительность водоразделов – это центры природных геохимических ландшафтов, которые являются автономными по отношению к биогенным и биокосным компонентам пониженных элементов рельефа, так как первые не получают от них химические элементы с жидким или твердым стоком. От центра к периферии природных геохимических ландшафтов происходит закономерная смена сочетаний форм движения материи, управляющих миграцией химических элементов – от господства биологической к господству более примитивных химической и физической форм движения материи.

Главными факторами, определяющими основные направления естественных ландшафтно-геохимических процессов, являются вода и живое вещество. Первый фактор формирует атмосферно-химический круговорот веществ (АГХК), а второй фактор – биологический круговорот веществ (БИК) [7]. При этом источником энергии служит солнечная радиация.

При рассмотрении комплекса как рукотворного геохимического ландшафта обнаруживается ряд несоответствий его строения и функционирования по сравнению с природным геохимическим ландшафтом. Главным фактором, определяющим основные направления техногенных ландшафтно-геохимических процессов, является техника (носитель миграционных потоков), а вспомогательными факторами – вода и живое вещество.

Таким образом, ландшафт месторождения будет характеризоваться сочетанием двух комплексов ландшафтно-геохимических процессов: техногенного, с ведущей ролью антропогенной миграции химических элементов (вывоз веществ), и природно-техногенного, с ведущей ролью естественной миграции элементов, обусловленной гравитацион-

ным перераспределением веществ и их биологическим круговоротом. Главным источником миграции веществ в геохимическом ландшафте является энергия горнодобывающей техники, транспорта, вывозящего породу и руду.

Загрязнение окружающей среды района будет приводить к ухудшению санитарно-гигиенических условий, комфортности проживания, и, как следствие этого, негативно отражаться на состоянии здоровья людей, работающих на месторождении и проживающих вблизи них.

Основу техногенных выбросов в районе могут составлять железосиликатная пыль, окись углерода, окислы азота и другие вещества. Такие вещества, выброшенные в атмосферу, вызывают при длительном дыхании различные заболевания у человека, в том числе гиперплазию, а затем и атрофию слизистой оболочки верхних дыхательных путей, стоматиты, воспаления десен, поражение зубов. Аэрозоли железа и его оксиды при длительном воздействии откладываются в легких и вызывают бронхиты, начальную стадию эмфиземы, сухой плеврит [9, 10].

Не менее опасны для состояния здоровья пылевые частицы. Негативное воздействие их на организм человека проявляется в том, что трудно растворимые в физиологических жидкостях частицы пыли осаждаются в дыхательных путях и являются причиной таких заболеваний, как бронхит и силикоз. Последнее заболевание – это прогрессирующий фиброз легочной ткани (пылевой пневмоклероз).

Установлено, что широкомасштабное освоение железных руд, начавшееся в начале 60-х гг. прошлого века, привело к усилению техногенной нагрузки на геологическую среду в горнодобывающих районах и дестабилизации их экосистем. Например, для горнопромышленных районов Курской магнитной аномалии как территориальной совокупности предприятий по добыче и переработке железных руд, а также потребителей минерального сырья – металлургических заводов и сопутствующих им предприятий энергетического комплекса и стройиндустрии, характерно многостороннее и крупномасштабное воздействие инженерной, хозяйственной деятельности и технологических процессов на все сферы окружающей среды: литосферу, атмосферу, гидросферу и биосферу [5].

Основными источниками техногенного воздействия на геологическую среду, и прежде всего недр, в нашем случае предполагается работа предприятия и объектов, связанных с добычей и обогащением полезных ископаемых: склады полуфабрикатов и готовой продукции, водозаборы подземных вод и дренажные системы горных выработок, водоотливные установки, трубопроводы и каналы сбора вод, горнодобывающие механизмы, транспорт и др.

Горнодобывающая отрасль является важнейшим фактором современного рельефообразования территории месторождения железных руд. В про-



а



б

Рис. 2. Антропогенные изменения рельефа и геологической среды при использовании метода скважинной гидродобычи: а) закладка провалов отработанных скважин хвостами обогащения на Тарском месторождении; б) планировка добычного профиля после закладки и естественного обезвоживания грунта [11]

цессе техногенеза на месте естественных форм рельефа возникнут новые, не существовавшие ранее, специфические формы – отвалы, подземные пустоты, проседание земной поверхности и т. д. (рис. 2).

Указанные процессы представляют собой естественную реакцию природной системы на техногенное воздействие и могут негативно влиять на условия проживания и хозяйственную деятельность населения Бакчарского района.

В будущем степень экологической опасности предприятия горно-металлургического цикла в Бакчарском районе во многом будет определяться его геохимическим воздействием на атмосферный воздух. Загрязнение атмосферного воздуха газами и пылевыми выбросами может происходить при буровых, погрузочно-разгрузочных работах; при дроблении руды и ее переделе; а также при пылении отвалов, складов готовой продукции и т. д.

Выводы

Исходя из вышесказанного, можно предположить, какая ситуация сложится на Бакчарском месторождении, при его отработке методом СГД.

1. Почва будет прочно фиксировать все тяжелые металлы и существенно ослабит их попадание в надземную растительную массу и грунтовые воды.
2. Отсутствие вскрышных пород позволит сохранить в целостности культурный слой почвы, а при разработке месторождения в затопленной камере – режим поверхностных и подземных вод.
3. Под воздействием комплекса горнопромышленных и промышленных предприятий будут отмечаться негативные тенденции на измене-

ние биоты, выявляемые за пределами санитарно-защитной зоны предприятия.

4. Ландшафт будет характеризоваться сочетанием двух комплексов: техногенного, с ведущей ролью антропогенной миграции химических элементов (вывоз веществ) и природно-техногенного с ведущей ролью естественной миграции элементов.
5. Процесс рекультивации при применении метода СГД сведется к ликвидации добычных и разведочных скважин, планировке территории и передаче отведенной под рудник земли в народнохозяйственное пользование.
6. Полностью снимется вопрос вентиляции, который возникает при разработке месторождения карьерами или шахтами, тем самым обеспечиваются комфортные условия труда.
7. Применение гидравлической закладки отходами обогащения отработанных камер может существенно уменьшить объем хвостохранилищ, которые являются источниками запыленности и загазованности окружающей среды.
8. Предполагается проседание и провалы земной поверхности.
9. Вследствие отработки месторождения загрязнение окружающей среды района будет негативно отражаться на состоянии здоровья людей, работающих на месторождении и проживающих вблизи них.
10. Из-за очень низкой степени дренированности территории может усилиться процесс заболачивания земель.
11. Питание некоторых рек будет осуществляться за счет сброса в них дренажных вод с высоким содержанием загрязняющих веществ, а другая часть будет консервироваться в отработанные рудные пласты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домаренко В.А., Молчанов В.И., Тепляков И.М. Геотехнологические методы разработки железорудных месторождений Западно-Сибирского бассейна // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири. – 2001. – Вып. 2. – С. 169–175.
2. Аренс В.Ж., Исмагилов Б.В., Шпак Д.Н. Скважинная гидродобыча твердых полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. – 229 с.
3. Аренс В.Ж. и др. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых. – М.: Горная книга, 2007. – 295 с.
4. Копысов С.Г. Параметры экологически допустимой разработки Бакcharского железорудного месторождения // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2011. – № 5. – С. 420–425.
5. Петин А.Н. Рациональное недропользование в железорудной провинции Курской магнитной аномалии (Проблемы и пути их решения): автореф. дис. ... д-ра географ. наук. – Астрахань, 2010. – 47 с.
6. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия. – М.: Логос, 2000. – 626 с.
7. Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1964. – 230 с.
8. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1975. – 341 с.
9. Сагит Ю.Е., Янин Е.Л. и др. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
10. Горлова О.Е. Техногенные месторождения полезных ископаемых. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2001. – 77 с.
11. Кустрь Л.А., Яншченко А.П. Опыт проведения рекультивационных работ при разработке Тарского циркон-ильменитового месторождения методом СГД // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Материалы V Междунар. научно-практ. конф. – М.: Изд-во РУДН, 2006. – С. 62–67.

Поступила 16.03.2012 г.

УДК 662.2:658.567.5:502.175

СИТУАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ СЖИГАНИИ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ЗАРЯДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОТКРЫТОМ СТЕНДЕ

М.В. Попова, А.В. Литвинов, С.Н. Козлов*, В.П. Лушев

ОАО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск

*Бийский технологический институт (филиал АлтГТУ им. И.И. Ползунова), г. Бийск

E-mail: popova.maria.v@gmail.com

Рассмотрены факторы, определяющие экологическую безопасность открытого стенда при сжигании твердотопливных зарядов энергетических установок с использованием водной экологической защиты. Предложена схема структурной формализации информационно-управляющей системы обеспечения и контроля уровня выбросов продуктов сгорания в атмосферу. Определена функция экологического риска с учетом отказов информационно-управляющей системы. Даны исходные формулировки функциональных и параметрических отказов системы обеспечения экологической безопасности. Рассмотрены особенности термодинамического состояния выброса продуктов сгорания в атмосферу.

Ключевые слова:

Экологическая безопасность, экологический риск, статическое сжигание, твердотопливные заряды энергетических установок, водное орошение струи, баланс масс, системный подход, управляющая система.

Key words:

Environmental safety, ecological risk, static firings, solid-propellant propulsion system, water spraying jet, mass balance, systems approach, management system.

Сжигания на открытом стенде с применением водной экологической защиты (ВЭЗ) используются как один из способов огневой ликвидации (или утилизации) твердотопливных зарядов крупногабаритных энергетических установок (ЭУ) различного назначения [1, 2].

В литературе [3] вопросы экологической безопасности рассмотрены применительно к «сухим» сжиганиям твердотопливных зарядов, когда выбросы продуктов сгорания (ПС) в атмосферу подконтрольны, но не регулируемы. Использование ВЭЗ позволяет не только снизить выбросы в атмосферу, но и регулировать их величину. Цель настоящей статьи – формализовать структуру обеспечения экологической безопасности при исполь-

зовании ВЭЗ в рамках информационно-управляющей системы и определить экологические риски при отказах этой системы.

В процессе сжигания ПС твердого топлива содержащиеся вредные для окружающей среды компоненты (ВК), такие как хлористый водород, оксид алюминия и др., выбрасываются в атмосферу (рис. 1) и рассеиваются по мере подъема облака ПС. Затем часть ВК в составе аэрозолей осажается на земную поверхность.

Стенд, на котором проводятся сжигания, является кратковременным точечным источником залпового выброса ПС в атмосферу со следующими характеристиками: длительность выброса 200...300 с, масса 15...60 т, начальная температура



Рис. 1. Характерный вид выброса ПС

облака от 60 до 200 °С, высота подъема облака 800...1200 м, время живучести облака до полного рассеивания 30...40 мин.

Критерием экологической безопасности стенда при сжигании является не превышение концентрации ВК c_i нормативных предельно-допустимых концентраций в приземном слое атмосферы на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ), т. е.

$$c_i < [c_i], \quad (*)$$

где $[c_i]$ – предельнодопустимая концентрация по i -му ВК.

Обеспечение этого условия является целевой функцией системы экологической безопасности стенда [4].

Экологический риск рассматривается как вероятность нарушения условия (*):

$$R = \text{Вер}(c_i > [c_i]).$$

При отсутствии активных средств экологической защиты система экологической безопасности содержит два элемента:

- 1) перед проведением сжигания – расчетно-теоретический прогноз выполнения условий безопасности (*) с учетом параметров ЭУ и метеобстановки (ветер, облачность, осадки) и принятие решения о проведении или не проведении сжигания;
- 2) после проведения сжигания – приборно-инструментальный контроль концентраций ВК c_i на границе санитарно-защитной зоны.

Назначение ВЭЗ состоит в том, чтобы за счет орошения струи ПС водой осадить большую часть ВК в рабочей зоне стенда [5].

Ввод воды в струю ПС осуществляется через кольцевые коллекторы, расположенные вдоль струи ПС (рис. 2). В этом случае концентрация

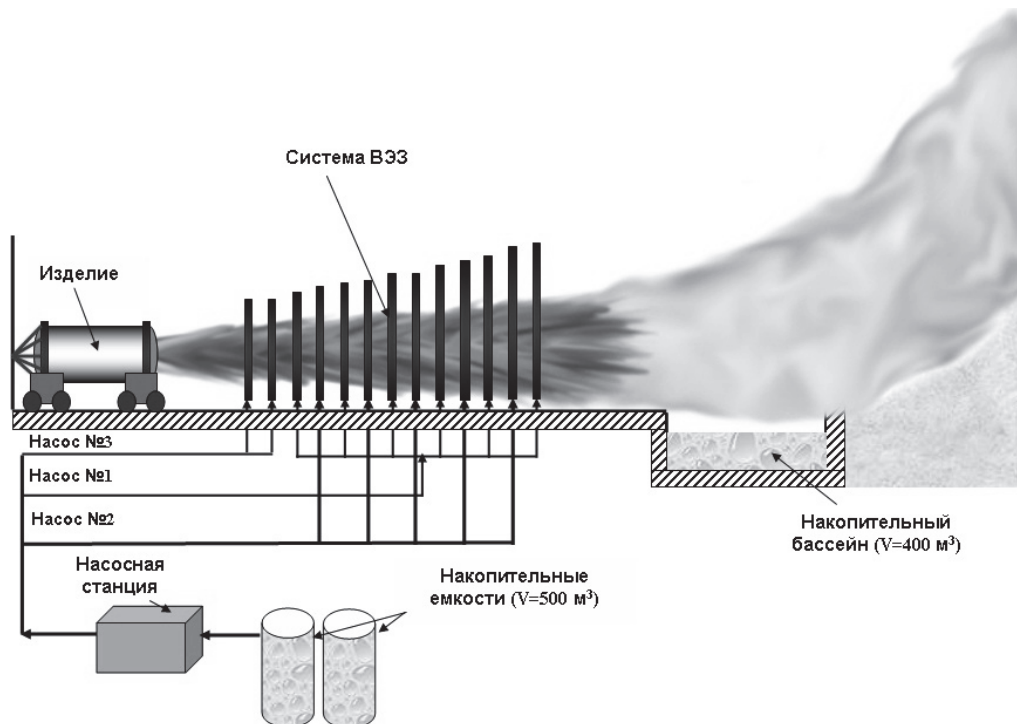


Рис. 2. Система ВЭЗ

ВК в облаке ПС c_i зависит главным образом от расходной характеристики ВЭЗ $G_b(x,t)=var$, где G_b – секундный расход воды; x – координаты установки коллекторов; t – текущее время работы ЭУ.

Система формально становится управляемой за счет изменения расходной характеристики $G_b(x,t)=var$ и может быть оптимизирована по общему расходу воды:

$$\int_0^{t_k} G_b(x,t)dt = \min \text{ при } c_i < [c_i].$$

Оптимизация проводится путем компьютерного моделирования системы уравнений для газодинамических процессов струи, орошаемой системой ВЭЗ.

Баланс массы ПС после орошения можно записать следующими соотношениями.

Суммарная начальная масса ПС и воды: $m_{\Sigma}^0 = m_{\text{ПС}}^0 + m_{\text{В}}^0$.

Масса выброса в атмосферу

$$m_{\text{ПС}}^a = m_{\text{ПС}}^0 - m_{\text{ПС}}^{\text{ОС}},$$

$$m_{\text{В}}^a = m_{\text{В}}^0 - m_{\text{В}}^{\text{ОС}}.$$

Здесь v – вода; a – выброс в атмосферу; 0 – начальное значение; ОС – осажденная часть ПС.

Для оценки эффективности ВЭЗ интересны следующие коэффициенты:

- орошения струи $k_{\text{ор}} = \frac{m_{\text{В}}^0}{m_{\text{ПС}}^0}$, определяет расход воды, которая является дорогостоящим природным ресурсом и требует экономии;

- осаднения ПС в рабочей зоне стенда $k_{\text{ос}} = \frac{m_{\text{ПС}}^{\text{ОС}}}{m_{\text{ПС}}^0}$ по каждому ВК, определяет техническую эффективность ВЭЗ;

- «увлажнения» облака ПС $k_{\text{ув}} = \frac{m_{\text{В}}^a}{m_{\text{ПС}}^a}$, определяет динамику подъема облака.

Каждый из этих показателей зависит от расходной характеристики ВЭЗ $G_b(x,t)$.

Использование ВЭЗ в идеальном случае должно снизить выбросы в атмосферу, что фактически и происходит – по результатам анализа технологических стоков в рабочей зоне стенда осаждается $\approx 80\%$ оксида алюминия и 50% хлористого водорода. Однако снижение массы выброса однозначно не гарантирует обеспечение нормативов по концентрациям компонентов ПС в атмосфере вследствие возникновения следующих факторов после орошения водой струи ПС:

- вследствие орошения водой снижается начальная температура облака ПС, что приводит к снижению высоты подъема и должно увеличивать концентрации ПС в зонах рассеивания, но в идеале компенсируется снижением содержания ПС в облаке за счет осаднения ВК в рабочей зоне;
- при отсутствии ВЭЗ продукты сгорания твердого топлива содержат $\approx 15...20\%$ воды. Орошение увеличивает содержание воды до $30...40\%$. Вследствие этого облако ПС переходит в неустойчивое термодинамическое состояние, тем-



Рис. 3. Результаты замеров температуры и размера облака ПС

пература, размеры и масса его определяются процессами конденсации и коагуляции аэрозольной фазы. Как показывают исследования, эти процессы имеют гармонический, колебательный характер, что, в свою очередь, определяет периодичность процесса выпадения из облака аэрозольных компонентов.

Это видно из рис. 3, где представлены результаты замеров температуры и размера облака ПС по вертикали на одном из участков его подъема.

Вследствие этого существующие физико-математические модели распространения загрязнений в атмосфере [6] непригодны и требуется разработка соответствующей теории с учетом того, что зоны распространения и концентрации вредных веществ в атмосфере обуславливаются остаточной массой $m_{ПС}^a$ ПС в облаке и содержанием в нем влаги, т. е. $c_i(x,t)=c_i(m_{ПС}^a, m_b^a)$, в свою очередь, зависит от метеоусловий и расходной характеристики ВЭЗ $G_b(x,t)$.

Введение ВЭЗ позволяет перейти в информационно-управляющей системе «Экология» [7] от дискретных «да/нет» решений к параметрическим, выбирая для заданных условий сжигания и метеообстановки соответствующую функцию расходной характеристики ВЭЗ. В этом случае информационно-управляющая система «Экология» может быть представлена в виде двухзвенной системы управления (рис. 4), в которой элемент «Регулятор» через расходную характеристику $G_b(x,t)$ определяет степень осаждения ПС в рабочей зоне стенда, а элемент «Распределитель» позволяет определить параметры рассеивания ПС в атмосфере с учетом степени орошения струи. Такая схематизация позволяет формализовать, исследовать и идентифицировать информационно-управляющую систему «Экология» в рамках теории систем с учетом стохастической неопределенности процессов [8].

При этом формулировка экологического риска остается прежней, т. е. это $R=Ver(c_i>[c_i])$, величина которого определяется отказами системы обеспечения и контроля экологической безопасности стенда, включающей ВЭЗ и методы прогноза экологических последствий перед проведением сжигания. Введем понятия функционального и параметрического отказов системы ЭБ.

Определим функциональные отказы. Это:

- отказ ЭУ – $q_{\phi 1}$ – разрушение и другой вид аномальной работы ЭУ при горении заряда;
- отказы ВЭЗ – $q_{\phi 2}$ – прекращение подачи воды в коллекторы; $q_{\phi 3}$ – разрушение одного или нескольких коллекторов; $q_{\phi 4}$ – нарушение параметров орошения струи (изменение расхода или давления воды).

Параметрические отказы системы – это методические ошибки, включающие:

- q_{n1} – степень неопределенности модели прогноза по функции $c_i=f(G_b(x,t))$, обуславливаемая упрощением физической картины процесса в струе и облаке ПС;
- q_{n2} – ошибки идентификации зависимости $c_i=f(G_b(x,t))$ по экспериментальным данным;
- q_{n3} – ошибки $c_i(x)$ при прогнозе конкретного сжигания при заданной метеообстановке.

Тогда риск – это $R=Ver(c_i>[c_i])$ при $G_b(x,t) \neq [G_b(x,t)]_{нр}$ или $R=Ver(c_i>[c_i])$ при $\Delta G_b \neq 0$, где ΔG_b – отклонение расходной характеристики от требуемой вследствие возникновения (действия) функциональных и (или) параметрических отказов системы экологической безопасности, указанных выше. Тогда $R=1-\sum q_j k_j c_j$, где q_j – вероятность появления j -го вида отказа; k_j – коэффициент влияния отказа j -го вида на максимальную концентрацию c_i i -го ВК ПС; c_j – расчетная величина концентрации ВК.

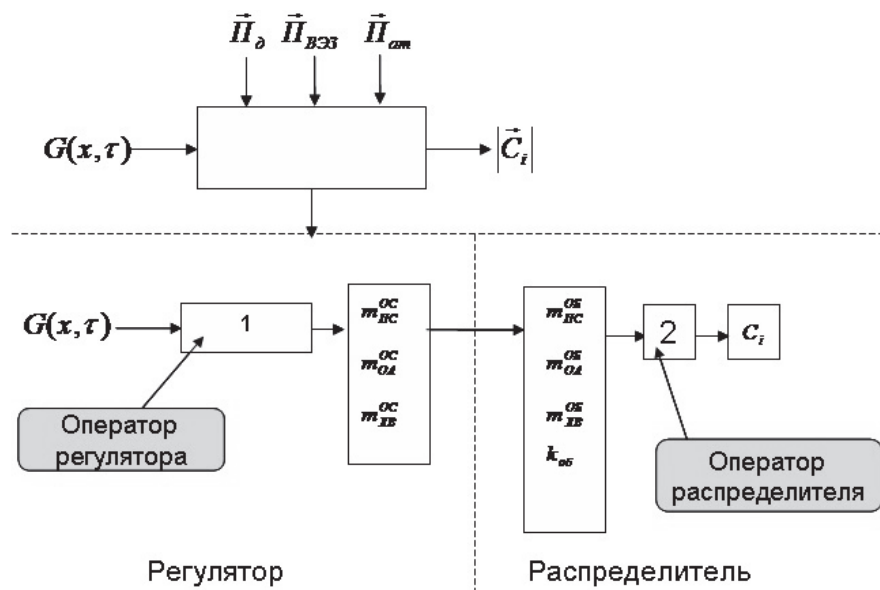


Рис. 4. Структурная схема ИУС «Экология»

Многолетний опыт проведения сжиганий твердотопливных зарядов ЭУ показывает, что вероятность возникновения функциональных отказов мала и составляет $q_{ф1} < 10^{-4}$, $q_{ф2,3,4} < 10^{-2}$.

Основным источником риска являются параметрические отказы, обуславливаемые сложностью и многофакторностью физических процессов, протекающих в струе и облаке ПС. Поэтому практически невозможно разработать математически точную модель рассеивания ВК. Предложенная выше формализация информационно-управляющей системы «Экология» позволяет позвенно идентифицировать модель на основе результатов натурных испытаний двигателей, оценить риски по многопараметрической стохастической схеме и снизить уровень параметрических отказов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марьяш В.И., Козлов С.Н. Возможные методы ликвидации смесевых твердых топлив крупногабаритных зарядов маршевых ступеней ракетных комплексов // Проблемы утилизации смесевых твердых топлив, отходов и остатков жидких ракетных топлив в элементах ракетно-космической техники: Сб. докл. IV Всеросс. научно-практ. конф. – Бийск, 21–23 сентября 2005. – М.: ЦНИИХМ, 2006. – С. 8–11.
2. Жарков А.С., Марьяш В.И., Жуков А.П., Вагичев С.Н., Коваленко Г.П., Яскин А.В. Безопасность работ при ликвидации РДТТ методом статического сжигания // Высокоэнергетические материалы. Демилитаризация и гражданское применение: Тез. докл. Междунар. конф. «НЕМs-2004». – Белокураха, 6–9 сентября 2004. – Бийск: ФГУП «ФНПЦ «Алтай», 2004. – С. 82.
3. Технические и экологические аспекты ликвидации твердотопливных межконтинентальных баллистических ракет / под общ. ред. член-корр. РАН, д-ра техн. наук, проф. М.И. Соколовского и д-ра мед. наук, проф. Я.И. Вайсмана. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 636 с.
4. Олейников Б.Д., Марьяш В.И., Жарков А.С., Тихомирова Т.В., Козлов С.Н., Лушев В.П. Экологический мониторинг быстропротекающих процессов сжигания твердотопливных зарядов ракетных двигателей // Проблемы и методология утилизации смесевых твердых топлив, отходов спецпроизводств и остатков

Выводы

1. Разработана схема структурной формализации информационно-управляющей системы обеспечения экологической безопасности открытого стенда при сжигании твердотопливных зарядов энергетических установок, которая позволяет увязать расходную характеристику водно-экологической защиты с величиной экологических рисков и оптимизировать ее по общему расходу воды.
2. Не имеющая аналогов конструкция схемы водной экологической защиты дает возможность проводить огневую утилизацию зарядов твердотопливных зарядов энергетических установок на открытом стенде при минимальных рисках нанесения экологического ущерба территориям, прилегающим к стенду.

жидких ракетных топлив в элементах ракетно-космической техники. Проектирование, отработка и испытания твердотопливных энергетических установок: Докл. III Всеросс. научно-практ. конф. – Бийск, 25–27 сентября 2003. – Бийск: ФГУП «ФНПЦ «Алтай», 2004. – С. 182–187.

5. Козлов С.Н., Попова М.В., Литвинов А.В., Скворцов А.В. Газодинамические параметры высокотемпературной струи при внешнем орошении ее водой. // Информационные технологии в науке, экономике и образовании: материалы Всеросс. научно-практ. конф. / под ред. О.Б. Кудряшовой. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. – С. 36–41.
6. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 93 с.
7. Попова М.В., Кудряшова О.Б., Литвинов А.В. Информационная система «Экология» в структуре экологической безопасности открытого стенда при статических сжиганиях крупногабаритных энергетических установок на твердом топливе // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. – 2011. – Вып. 1. – С. 87–89.
8. Вагнер Г. Основы исследования операций. Т. 3. – М.: Мир, 1973. – 504 с.

Поступила 12.03.2012 г.

Календарь памятных дат

УДК 50(092)

В.И. ВЕРНАДСКИЙ – УЧЕНЫЙ-ЭНЦИКЛОПЕДИСТ, ОПЕРЕДИВШИЙ СВОЕ ВРЕМЯ. К 150-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ

Л.П. Рихванов

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



12 марта 2013 г. исполняется 150 лет со дня рождения выдающегося естествоиспытателя Владимира Ивановича Вернадского. Решением ЮНЕСКО этот год назван годом Вернадского. Празднование этого юбилея, как отмечает ЮНЕСКО, будет способствовать повышению информированности общественности в области науки.

Указом Президента РФ № 1206 от 21.08.2012 г. в этом году проводится празднование в честь 150-летия рождения В.И. Вернадского.

Уже всё это предопределяет необходимость говорить о всём величии этого учёного и гражданина России, работы которого объединяют все науки, связанные с изучением и сохранением Земли, биоразнообразия и жизни на ней.

В справочнике Академии наук СССР в графе «научная специальность» около фамилии академика Владимира Ивановича Вернадского значатся *геохимия, минералогия, биогеохимия, геология, метеоритика, радиogeология.*

Каждая из них представляет большую самостоятельную отрасль человеческих знаний в науках о Земле, и некоторые созданы или значительно развиты именно творческой мыслью и научными трудами выдающегося ученого.

Но это далеко не полный перечень его научных интересов. Об этом можно судить по распределению его публикаций по отраслям знаний (рис. 1).

Блестящее знание английского, французского, немецкого и скандинавских языков (Ферсман, 1946) позволяло ему быть в курсе всех важнейших событий в области естествознания, истории науки и философии. Многие свои статьи он первоначально публиковал на иностранном языке, а уже позднее – на русском. На рис. 2 представлена публикационная активность В.И. Вернадского.

Всего им опубликовано при жизни более 400 работ. После его смерти (январь 1945 г.) издано ещё свыше 50 работ. У него более 200 газетно-журнальных статей и огромный архив писем. А.Е. Ферсман отмечал [2], что для написания своих воспоминаний о своём учителе он использовал более 200 его писем к нему. В архиве РАН в Москве утверждают, что разобрано только около 30 % доку-

ментов В.И. Вернадского, хранящихся у них. Его главные работы: «Геохимия», «Биосфера» изданы на всех основных языках Мира.

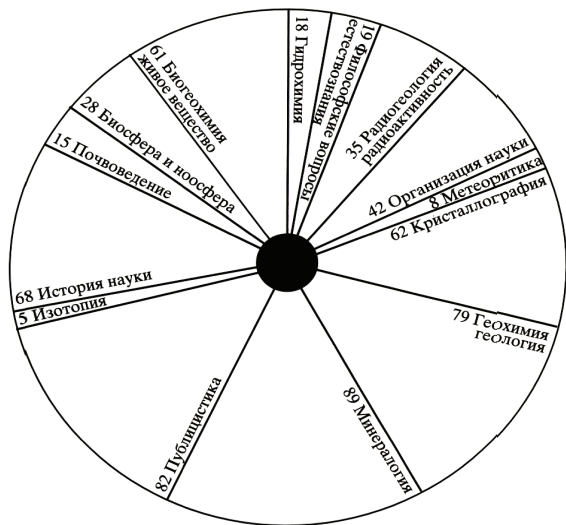


Рис. 1. Распределение количества работ В.И. Вернадского по отраслям знания. Выполнено Б.Л. Личковым в начале 60-х гг. XX столетия [1]

Будучи классическим геологом, выпускником Петербургского горного университета, проработав почти 25 лет в Московском государственном университете, он внёс огромный вклад в развитие почвоведения, кристаллографии и минералогии, в том числе и учения о воде, как минерале, разработал методики преподавания кристаллографии и минералогии, написал и опубликовал учебники.

Однако венцом его деятельности были учения о радиогеологии, биосфере, биогеохимии и ноосфере, над которыми он работал, уже будучи сотрудником Российской Академии Наук.

Открытие в 1938 г. явления радиоактивности потрясло научный мир. Физики быстро оценили значение нового явления. Для них открылась новая

область исследований. Стала зарождаться ядерная физика.

Представители других направлений естественного знания никак не прореагировали на это событие. Первым же, кто по достоинству и в полной мере оценил новое открытие, был российский ученый, академик Владимир Иванович Вернадский, который в 1910 г. своим выступлением заддал программу работ в России. Сегодня эта Программа выполнена в полном объёме. Выступая с докладом в Парижском Университете в 1933 г., В.И. Вернадский впервые сказал: «Работы последних лет позволяют нам говорить с полной определенностью о новой отрасли геологических наук: о *радиогеологии*». Радиогеология сыграла определяющую роль в выработке принципиальных идей современного естествознания и построении современной картины Мира. Она теснейшим образом связывает геологические науки с физическими и химическими, способствует проникновению в самую суть геологического знания, без которого уже не может развиваться современное научное мышление [3].

Сегодня во всём мире общепризнано, что В.И. Вернадский создал учение о биосфере. Свои идеи он чётко сформулировал в знаменитом труде «Биосфера» (1926), в котором он развил целостное представление о взаимодействии живого и косного вещества, о связи биосферы с космосом и роли биоты в эволюции земной коры. Такое целостное понимание «биосферы» приобретает особое значение в наши дни. В.И. Вернадский утверждал, что «Живая материя является совершенно особой химической областью в химии земной коры... В живой материи, в каждой её клетке... идёт вихорь сменяющих друг друга химических элементов» [4]. К сожалению, ни учение о биосфере, ни учение о геохимии живого вещества (биогеохимия) не были восприняты российским научным сообществом во время их публикации. А в ряде случаев они подвергались же-

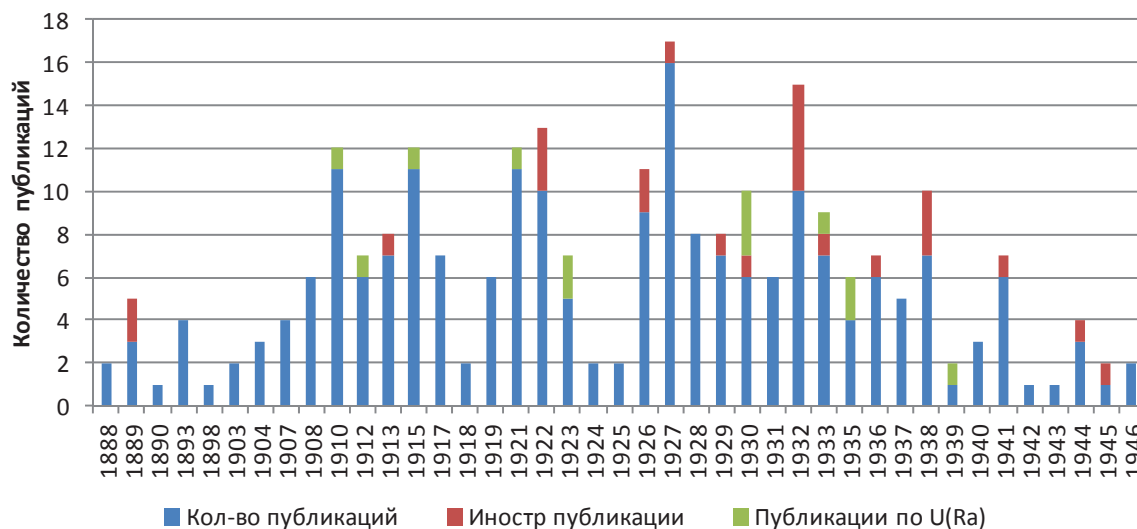


Рис. 2. Анализ публикационной активности В.И.Вернадского

сточайшей критике. Так, в 1927 г. в журнале «Под знаменем марксизма» биолог и философ И. Бугаев напечатал рецензию на «довольно интересную книжечку Вернадского», требующую «все же к себе критического отношения», поскольку автор «занимает явно метафизическую позицию». Сам же учёный по поводу таких высказываний писал, «царство моих идей впереди» и, как правило, не вступал в полемику.

Огромно общечеловеческое значение учения В.И. Вернадского о ноосфере (закон ноосферы Вернадского), как современном этапе развития биосферы, в которой господствующей силой становится человеческий разум.

На мой взгляд, наиболее ёмко оценку этому учению дал в недавнем прошлом президент Российской Федерации В.В. Путин на деловом саммите Азиатско-Тихоокеанского экономического сотрудничества во дворце Брунейского султана (ноябрь 2000 г.): «*Владимир Вернадский в начале двадцатого века создал учение об объединяющем человечество пространстве – ноосфере. В нем сочетаются интересы стран и народов, природы, общества, научное знание и государственная политика. Именно на фундаменте этого учения фактически строится сегодня концепция устойчивого развития.*»

В.И. Вернадский остаётся в памяти потомков и как блестящий историк науки. Для него история науки является орудием достижения нового в теории и получения ценных результатов на практике. Учёный полагал, что экскурс в историю позволяет отметить незаслуженно забытых и непонятых учёных, недостаточно известных и самобытных, непопулярных среди современников, чьи заслуги не оценены по достоинству, отвергнуты и ждут признания. По мнению В.И. Вернадского, историк должен сохранить для будущих исследователей взгляды и факты, которые кажутся ему неважными или ложными, но которые ход времени может выдвинуть вперёд как правильные или научно полезные [5].

В культуре личности видел В.И. Вернадский будущее России. В 1905 г. он, один из лидеров Кадетской партии России, писал: «*Спасение России заключается в поднятии и расширении образования и знания. Только этим путем возможно достижение правильного государственного управления, только поднятием культуры можно сохранить сильно пошатнувшееся мировое значение нашей родины.*»

Будущее цивилизации зависит не только от науки, техники и политики. На первое место здесь выходит общая культура народа в самом широком понимании. Вот что писал по этому поводу В.И. Вернадский: «...начинает выдвигаться другая форма будущей жизни человечества – организация учащегося народа. Здесь мы видим форму организации производительную, дающую не только охрану культуры и национального существования, но творящую эту культуру, кующую национальную силу. *Учащийся народ* – основа широкого и мирного развития человечества».

В.И. Вернадский был выдающимся организатором науки. Его усилиями было создано более 21 научной организации, в том числе Академия Наук Украины, Почвенный институт, Радиевый институт и др. [1].

Глубокое проникновение В.И. Вернадского в сущность дисциплин естественнонаучного цикла позволило ему подняться до философских обобщений, заглянуть вперед в ожидаемое будущее человечества. Философы активно обсуждают его мысли об *автотрофности, русском космизме, ноосферном миропонимании* и многие другие.

В.И. Вернадский был известен как общественный деятель и политик. «*Я никогда не жил одной наукой...*», – пишет он в дневнике за 1919–1920 гг. [6].

Уже в студенческие годы В.И. Вернадский организовал с друзьями «Братство», лозунги которого были [1]:

- 1) *Работай как можно больше;*
- 2) *Потребляй на себя как можно меньше;*
- 3) *На чужие нужды смотри как на свои;*
- 4) *Просящему у тебя дай и не стыдись просить у всякого.*

Особого анализа требует методология научной работы В.И. Вернадского. Конспективно она, на мой взгляд, может быть охарактеризована следующими позициями:

1. Высокая оценка достоверного факта и стремление основывать свои суждения только на эмпирически обобщенных фактах, исключая различные предположения и гипотезы.
2. Умение увидеть в отдельном факте, явлении конкретизацию проявления закономерностей высшего порядка.
3. Исторический подход при систематизации и анализе эмпирического материала, способствующего выявить внутреннюю логику науки. Исторический ракурс отчетливо виден в научных направлениях, которые В.И. Вернадский развивал. В упомянутом подходе можно отметить две особенности:
 - а) история науки, отдельных ветвей научного знания для ученого это не только статический перечень последовательной смены событий, лиц, взглядов, но и показ драматического характера борьбы научных идей за истину, что и осуществлял В.И. Вернадский в своих работах;
 - б) идеи, возникающие в какой-то научной области на определенном этапе её развития, имеют, как правило, историческую преемственность, выраженную в явной или неявной форме. Именно это и старался показать учёный, раскрывая содержание общеизвестного афоризма «Новое – хорошо забытое старое».
4. Стремление работать в пограничных областях науки. Своими трудами В.И. Вернадский показал плодотворность междисциплинарных исследований проблем кристаллографии, минералогии и геохимии в тесной связи с химией, физикой, биологией и другими науками. Здесь ви-

дим комплексный, системный подход к изучению явлений природы. Следует говорить и о междисциплинарном мышлении В.И. Вернадского, позволяющем ему опережать современность, точнее определять перспективы развития науки.

5. Высоконравственное отношение к научному наследию. Стремление в исторических обзорах быть наиболее объективным, отмечать своих предшественников, не оставлять без внимания исследователей, отвергнутых их современниками.
6. Высочайшая ответственность при проработке имеющейся информации по рассматриваемой им теме и обязательность ссылок на источники.

В.И. Вернадский поддерживал связи с огромным числом учёных различного профиля, к нему обращались разные люди с просьбами о помощи и т. д. И на всю эту переписку он находил время. Имел он контакты и с городом Томском. Так, работа с архивом РАН позволила студентке ТПУ Марине Белякиной установить 18 фамилий томичей, имевших переписку с академиком. Среди них мы можем видеть фамилии политехников: В.А. Обручева, М.А. Усова, Д.А. Алексеева, И.Ф. Понамарёва, П.П. Пилипенко и др. [7]. В.И. Вернадский рекомендовал на работу в Томский Технологический институт своих учеников. Одним из них был будущий профессор П.П. Пилипенко. Наиболее активная творческая связь была у него с основателем Сибирской геологической школы В.А. Обручевым. Именно В.И. Вернадский давал основателю

Сибирской геологической школы рекомендацию при выборах в Академию Наук.

Знакомство с мыслями и трудами великого естествоиспытателя, которое по существу только начинается, позволяет понять многое из того, без чего невозможна разработка современной экологической и политической науки и практики. Однако их создание – неотложная задача текущего дня, задача ныне живущего и подрастающего поколений.

В нашей памяти В.И. Вернадский – выдающийся учёный, обладающий высочайшим интеллектом и междисциплинарным мышлением, непревзойденный мастер исторического анализа науки, обобщений и систематизации.

Его научное наследие современно, оно работает на будущее. Его жизнь и творчество – это величайший подвиг во славу науки и Родины, достойный подражания.

В честь юбилея учёного консорциум вузов города Томска, Томское профессорское собрание совместно с заинтересованными Департаментами Администрации Томской области уже с октября месяца 2012 г. проводят городской образовательный проект «Развитие идей Владимира Ивановича Вернадского в научно-образовательном комплексе г. Томска», а в начале июня 2013 г. в Томском политехническом университете пройдут Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» и Международная школа молодых учёных по геохимии живого вещества, посвящённые этой дате.

Идеям В.И. Вернадского в Томском политехническом жить и развиваться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. Жизнь во благо России. – М.: Издат. Дом «Ноосфера», 2003. – 211 с.
2. Ферман А.Е. Жизненный путь академика Владимира Ивановича Вернадского (1863–1945) / Записки Российского минералогического общества. – 1946. – Ч. 75. – Вып. 1. – С. 5–24.
3. Вернадский В.И. Труды по радиогеологии. – М.: Наука, 1997. – 319 с.
4. Вернадский В.И. Живое вещество и биосфера. – М.: Наука, 1994. – 672 с. (Библиотека трудов академика В.И. Вернадского).
5. Вернадский В.И. Труды по истории науки. – М.: Наука, 2002. – 502 с.
6. Дневники В.И. Вернадского. Октябрь 1917 – декабрь 1920 / Составители М.Ю. Сорокина и др. – Киев: Наукова Думка, 1994. – 272 с.
7. Официальный сайт Российской Академии наук. Архив академика В.И. Вернадского. 2012. URL: <http://www.ras.ru/vivernadskyarchive/about.aspx> (дата обращения 04.01.2013).

Наши юбиляры

ПРОФЕССОРУ И.В. КУЧЕРЕНКО – 75 ЛЕТ



Кучеренко Игорь Васильевич, 1937 г. рождения, доктор геолого-минералогических наук (1992 г.), профессор (1995 г.), Заслуженный геолог РФ (2000 г.), Почетный работник высшего профессионального образования РФ (2001 г.), Действительный член Российского минералогического общества (1972 г.), Действительный член Академии естествознания России (2004 г.). Докторская диссертация защищена в Специализированном совете Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии АН СССР (г. Москва).

Окончил школу № 49 г. Новосибирска с серебряной медалью (1955 г.), получил диплом с отличием по окончании Томского политехнического института (1960 г.) с квалификацией «Инженер-геолог» и специализацией в области урановой геологии.

Научно-педагогический стаж в Томском политехническом университете 48 лет.

После работы в Удоканской экспедиции Читинского геологического управления и выполнения исследований условий образования Удоканского медного месторождения в Северном Забайкалье (1961–1964 гг.) в течение тридцати лет (1964–1994 гг.) в стенах Томского политехнического института И.В. Кучеренко принимал участие в подготовке инженерных кадров для урановой геологии страны. Вел в этот период ряд специальных дисциплин: геология полезных ископаемых; лабораторные методы исследования руд с курсовой работой; структуры рудных полей радиоактивных и редких металлов; металлогения радиоактивных и редких металлов; методика поисков и разведки месторождений радиоактивных и редких металлов с курсовым проектом; формационный метод в рудной геологии. Методические материалы, подготовленные в это время Игорем Васильевичем, не потеряли своей актуальности и в настоящее время.

И.В. Кучеренко ежегодно посещал производственные организации, которые проводили в стране поиски и разведку урановых месторождений, и в которых студенты проходили практики. Во время этих продолжительных поездок студентам оказывалась методическая помощь в подборе материалов для составления курсовых и дипломных проектов, выполнения научных работ. Осуществлялся также контроль за ходом практик, полнотой выполнения их программ.

В 1997–2003 гг. Игорь Васильевич руководил кафедрой минералогии и петрографии, с 2004 г. работает профессором кафедры геологии и разведки полезных ископаемых ИПР.

С начала 1990-х гг. и до настоящего времени Игорь Васильевич участвует в подготовке бакалавров направления «Геология и разведка полезных ископаемых» и инженеров специальности «Прикладная геология», обеспечивает ряд важнейших дисциплин. Принимает участие в подготовке научных кадров в качестве научного консультанта и официального оппонента — на защитах докторских и кандидатских диссертаций.

Основные направления научной деятельности: теория гидротермального рудообразования, геохимия и металлогения золота; формационный метод в рудной геологии.

Игорем Васильевичем разработана (1987–1992 гг.) и совершенствуется концепция образования золотых мезотермальных месторождений в активизированных структурах допалеозойской консолидации, которая подтверждается совокупностью новых эмпирических данных в районах разного возраста и геологического развития; последнее, в частности, расширяет сферу ее приложения к фанерозойским подвижным поясам.

Открыто явление аномального накопления ассоциации фемофильных элементов (фосфора, титана, магния) в окологрудных метасоматических ореолах мезотермальных золотых месторождений в обрамлении зон глубинных разломов, которое имеет теоретическое (источники и физико-химические режимы металлоносных растворов на путях их подъема и уровнях отложения рудного вещества) и прикладное (критерий прогноза) значение.

Получены первые эмпирические доказательства концентрационно-диффузионного механизма массопереноса в процессах околотрещинного гидротермального метасоматизма, обеспечившие реконструкцию трещинно-поровых гидродинамических взаимодействий в процессах природного гидротермального минералообразования.

Профессором И.В. Кучеренко предложены и апробированы на представительном материале методические приемы формирования выборок аналитических данных для геохимических целей, направленные на усиление корректности геохими-

ческих выводов и формирование банков геохимических данных.

Внесены коррективы в методику отбора и подготовки проб для радиологических (К–Аг система) определений абсолютного возраста геологических образований, что обеспечивает корректность интерпретации аналитических данных и (или) возможность их использования.

Игорь Васильевич разработал методологию формационных исследований в рудной геологии; были предложены альтернативные существующим подходы к пониманию содержания рудных формаций и их функционального значения для совершенствования теории рудообразования во взаимодополняющих аспектах — генетическом (физико-химическом и термодинамическом) и геологическом (металлогеническом); реализацией этих подходов устраняются существующие трудности формационной типизации месторождений полезных ископаемых и раскрываются большие возможности формационного метода; предложена генетическая классификация рудообразующих процессов с рудными формациями в непосредственном основании, разработан макет геолого-генетической классификации рудообразующих процессов на матричной основе, прогнозные функции в которой выполняют рудные формации, рудные субформации, геологические типы в предлагаемом понимании.

Внесены назревшие структурные изменения в предложенную академиком В.А. Обручевым (1922, 1935 гг.), общепринятую в СССР и России генетическую классификацию месторождений полезных ископаемых с учетом достигнутых к концу XX столетия знаний; предложенный вариант под названием «Генетическая классификация рудообразующих процессов» удовлетворяет всем следующим из теории систем требованиям к процедуре классифицирования естественно-научных объектов и явлений.

На основе выявленных закономерностей рудообразования профессором И.В. Кучеренко разработан прогнозно-поисковый комплекс для мезотермальных золотых месторождений в составе геодинамического (тектонического), магматического, петрохимического, изотопно-геохимического критериев, четыре из которых предложены впервые. Комплекс используется в практике прогнозно-поисковых работ.

Юбиляр опубликовал 140 научных, 30 научно-учебно-методических работ.

Сотрудники Института природных ресурсов, кафедры геологии и разведки полезных ископаемых, коллеги, друзья, ученики поздравляют Игоря Васильевича с юбилеем, желают ему крепкого здоровья и новых достижений в научной и педагогической деятельности.

ПРОФЕССОРУ В.Г. ВОРОШИЛОВУ – 60 ЛЕТ



Валерий Гаврилович Ворошилов родился 12 октября 1952 г. в г. Могоча Читинской области (ныне Забайкальский край). В 1969 г. закончил среднюю общеобразовательную школу в г. Могоча и поступил на геологоразведочный факультет Томского политехнического института.

В 1974 г. окончил Томский политехнический институт по специальности «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых», получив квалификацию «горный инженер-геолог». В студенческие годы занимался НИРС по тематике «геология и минералогия золоторудных месторождений» под руководством доцентов В.И. Баженова, А.Ф. Коробейникова. Увлекался борьбой, туризмом, спелеологией, охотой.

После окончания института Валерий Гаврилович распределился на работу в Северо-Восточное территориальное геологическое управление (г. Магадан). В 1974–75 гг. работал старшим техником-геологом в Шмидтовской комплексной геологоразведочной экспедиции (пос. Мыс Шмидта Магаданской области), занимался поисками россыпного золота на Чукотке.

С августа 1975 г. по май 1981 г. работал в Геофизической экспедиции Дальневосточного территориального геологического управления (г. Хабаровск), вначале геологом, а с апреля 1979 г. – начальником геологического отряда. В 1980 г. за высокие достижения в трудовой деятельности награжден нагрудным знаком Министерства геологии РСФСР «Ударник 10-й пятилетки».

Территория деятельности экспедиции включала в себя Хабаровский край, Амурскую область, Приморье. Уникальные материалы, полученные в полевых маршрутах, требовали осмысления, а научного багажа, полученного в процессе обучения, было для этого недостаточно.

В июне 1981 г., по рекомендации профессора А.Ф. Коробейникова, В.Г. Ворошилов перешел на работу в Томский политехнический институт (ныне университет) и был зачислен на должность старшего инженера кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых. С первого же дня Валерий Гаврилович активно включился в научно-исследовательскую работу кафедры. В качестве ответственного исполнителя и научного руководителя участвовал в выполнении многочисленных хозяйственных исследований по золоторудным месторождениям Кузнецкого Алатау, Западного Саяна, Восточного Саяна, Алтая, Енисейского Кряжа. С 1984 по 1987 гг. обучался в очной аспирантуре Томского политехнического института, продолжая одновременно руководить хозяйственными НИР.

В мае 1987 г., под научным руководством профессора А.Ф. Коробейникова, досрочно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Эндогенная зональность гидротермальных образований Центрального рудного поля (Кузнецкий Алатау)» в специализированном совете при Томском государственном университете.

После защиты диссертации начал преподавательскую деятельность, вначале ассистентом, а с 1988 г. – доцентом кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых. Освоил и начал читать дисциплины, которые ранее в ТПИ не преподавались: «Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых» и «Математические методы моделирования в геологии».

Опираясь на результаты многолетних исследований рудно-метасоматической зональности, В.Г. Ворошилов и А.Ф. Коробейников первыми в России разработали учебно-методический комплекс новой дисциплины «Картирование рудных

полей и месторождений». Этот курс Валерий Гаврилович читал с 1998 по 2012 гг.

С 1998 по 2001 гг. В.Г. Ворошилов обучался в очной докторантуре Томского политехнического университета, не прерывая преподавательской деятельности и хозяйственных научных исследований. Огромный материал, собранный за 30 лет напряженного труда, требовал титанических усилий по систематизации и научному осмыслению. Валерий Гаврилович разработал оригинальную методику исследования аномальных геохимических полей, сопровождающих формирование рудных месторождений, которая позволяет существенно повысить эффективность поисков новых месторождений и оценки их масштабов. Методика апробирована при выполнении поисковых и оценочных работ ОАО «Тэтис-технологии», рудником «Веселый», ОАО «Минусинская экспедиция», ОАО «Рудно-Алтайская экспедиция».

Результаты исследований В.Г. Ворошилова в итоге оформились в докторскую диссертацию «Аномальные структуры геохимических полей гидротермальных месторождений золота (механизм формирования, методика геометризации, типовые модели, прогноз оруденения), которая была успешно защищена в мае 2007 г. в совете по защите кандидатских и докторских диссертаций при Томском политехническом университете.

В ознаменование заслуг перед геологической отраслью страны в 2008 г. В.Г. Ворошилов награжден нагрудным знаком Министерства природных ресурсов РФ «Отличник разведки недр».

Валерий Гаврилович имеет ученое звание профессора, является членом трех советов по защите кандидатских и докторских диссертаций, членом Профессорского собрания Томской области, Ученого совета ИПР, действительным членом Всероссийского Минералогического общества.

Научная и учебная деятельность Валерия Гавриловича неразрывно взаимосвязаны. Богатый

научный и практический опыт Валерий Гаврилович плодотворно использует при чтении лекций по курсам «Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых», «Математические методы моделирования в геологии», «Картирование рудных полей и месторождений». Практически все лабораторные работы по преподаваемым дисциплинам основаны на результатах исследования автором реальных геологических объектов. Сказанное в полной мере относится и к вышедшему в 2011 г. учебному пособию В.Г. Ворошилова «Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых». Научные результаты Валерия Гавриловича отразил в 80 публикациях и обобщил в монографии «Геохимические поля гидротермальных месторождений золота» (2011 г.).

Под руководством В.Г. Ворошилова выполнены и защищены две кандидатских диссертации. Научные исследования, проводимые аспирантами, магистрантами и студентами под руководством Валерия Гавриловича, неоднократно поощрялись дипломами Международных конференций и Всероссийских конкурсов.

В последние годы Валерий Гаврилович развивает концепцию вихревой природы рудогенных геохимических полей, их взаимосвязи с выявляемыми на космоснимках геологическими структурами. Полученные результаты позволяют более объективно классифицировать иерархию аномальных геохимических полей и, соответственно, прогнозировать рудные объекты различных рангов, в том числе скрытые, не выходящие на дневную поверхность. В настоящее время это приоритетная задача прикладной геохимии.

Сотрудники Института природных ресурсов, кафедры геологии и разведки полезных ископаемых, коллеги, друзья, ученики поздравляют Валерия Гавриловича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, оптимизма и новых успехов в научной и педагогической деятельности.

Summaries

UDC 549.322.21:548.73

Onufrienok V.V.
**HYDROCHEMICAL PROCESSES OF FORMING MINERALS
IN WATER-BEARING MEDIUM**

The author has studied the features of meteorological water vapor hydration of iron sulfides with different ratio of sulfur and iron obtained by the dry synthesis method. According to the data of the X-ray analysis the samples after synthesis did not contain the compounds with oxygen, hydrogen and hydroxyl group. The sulfide phases were hydrogenated by water adsorption from air atmosphere at 293 K without the researchers interference during 29 years after synthesis. X-ray analysis of the cured samples phase composition shown the presence of compounds which contain the hydroxyl group OH in their structures: parabutlerite – $\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{OH})2\text{H}_2\text{O}$, goethite – $\text{FeO}(\text{HO})$, szomolnokite – $\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})$, rozenite – $\text{Fe}(\text{SO}_4)4(\text{H}_2\text{O})$, rhomboclase – $\text{FeH}(\text{SO}_4)_24(\text{H}_2\text{O})$. These samples contained originally the iron sulfides in metastable state. It was ascertained that narrow intervals in a series of stable pyrrhotins FeS , $\text{Fe}_{0.875}\text{S}$, $\text{Fe}_{0.905}\text{S}$, $\text{Fe}_{0.950}\text{S}$ and $\text{Fe}_{0.975}\text{S}$ did not contain phases with hydroxyl group. The results obtained in the research demonstrate that metastable iron sulfides undergo hydration; the compounds which contain bound-state water in their structure are formed at water adsorption.

UDC 553.411.071.061

Kucherenko I.V.
**THE PROBLEMS OF FORMATION OF HYDROTHERMAL
GOLD DEPOSITS. P. 1. MAGMATOGENE GEOLOGICAL
AND GENETIC CONCEPTS**

The article introduces the content and validations of four modern concepts of hydrothermal gold deposit formation – granite-genetic, basalt-genetic, metamorphogenic, polygenic. The critical analysis of arguments integrates with the suggestion and interpretation of the author data characterizing the ratios of mineralization with magnetism in the first part of the article and petrochemical, geochemical features of wallrock metasomatic haloes in the second. In the second part of the article the proposed materials are discussed and the conclusions are drawn.

UDC 553.411.04/071(571.5)

Kucherenko I.V.
**PROGNOSIS-SEARCH COMPLEX FOR MESOTHERMAL GOLD
DEPOSITS. P. 1. TECTONIC AND GEODYNAMIC CRITERIA**

The article introduces the data revealing the variety of geological situations of mesothermal gold deposits allocation in southern mountain-folded framing of Siberian craton. The deposits were formed in crystal and black-shale substrate in the Late Riphean (Yenisei region), the Early Paleozoic (Kuznetsk-Alatausk region), the Late Paleozoic (Muya, Lensk regions). It is shown that the control over mineralization by deep faults, geodynamic modes of collision in active continental margins and activation of intercontinental rifts have the predicted value. Both criteria (tectonic and geodynamic) are recommended to be included into the structure of prognosis-search complex.

UDC 550.831.01

Starostenko V.I., Pyatakov Yu.V.
**SOLUTION OF THE DIRECT GRAVITY PROBLEMS FOR
SPHERICAL APPROXIMATE BODIES. ALGORITHMS**

The article considers the mathematical statements and introduces the algorithms for solving the direct gravity problems for spherical polyhedron and spherical triangular prism with upper and lower bases spaced in an arbitrary way. The polyhedron density changes in radial direction according to the linear law. The prism density varies along the parallels and meridians proportionally with arc lengths on the upper

and lower bases and linearly along any radius taking the values set in the vertices.

UDC 550.831.01

Starostenko V.I., Pyatakov Yu.V., Isaev V.I.
**SOLUTION OF THE DIRECT GRAVITY PROBLEMS FOR
SPHERICAL APPROXIMATE BODIES. ALGORITHMS TESTING**

Using the test cases system the authors have tested the algorithms for numerical solution of the direct gravity problems for approximate body in the form of spherical triangular prism with arbitrary upper and lower bases to check their stability, accuracy and speed.

UDC 550.83;553.98;551.73;551.76(571.16)

Abrosimova O.O., Guba A.V.
**SEISMIC CRITERIA FOR PETROLEUM POTENTIAL
OF RESERVOIRS AT THE PALEOZOIC-MESOZOIC BOUND-
ARY OF MEZHOVKA ARCH (NOVOSIBIRSK REGION)**

Based on the comparison of seismic record character with geological data the authors single out six main seismic facies reflecting the most specific rock types in pre-Jurassic complex in south-west part of Novosibirsk region. The seismic model of pre-Jurassic deposit structure allows outlining the supposed zones of distribution of various rocks in pre-Jurassic complex. The results obtained may be used when estimating the collector zone extraction and oil bearing prospects on this stratigraphic datum.

UDC 553.98:553.041:552.578:550.8.05

Lobova G.A., Osipova E.N., Krinitsyna K.A., Ostankova Yu.G.
**THE EFFECT OF PALEOCLIMATE ON GEOMETRY MODE AND
OIL GENERATION POTENTIAL OF BAZHENOV FORMATION
(AT TOMSK REGION LATITUDES)**

The multivariate paleotemperature modeling of sedimentary sections in six deep wells in Tomsk region has been carried out. The authors determined the considerable effect of temperature secular trend on the earth surface (paleoclimate) on thermal history and implementation of oil generation potential by Bazhenov formation deposits for various tectonic structures situated in different latitudes of Tomsk region. The «reference» geotemperatures from vitrinite reflectance and oil and gas content of upper Jurassic deposits were taken as the criteria of adequacy to the geometry mode model.

UDC 552.578.2.061.4:550.836(571.16)

Osipova E.N., Lobova G.A.
**GEOTEMPERATURE MODE OF BAZHENOV FORMATION
AND OIL-BEARING AREAS OF CRETACEOUS DEPOSITS
(NYUROLSKY MEGAHOLLOW)**

Using the reservoir temperature survey in upper Jurassic deposits the authors have compiled a map of geotemperature distribution for Bazhenov formation in Nyurolsky megahollow and structures of its framing. The centers of Bazhenov oil intensive generation were selected by geotemperature criterion. The epicenters locations were recommended as high-priority areas for determining objects in cretaceous oil-and-gas complex.

UDC 550.831.017.834.05.837.211.82(571.53)

Pashevin A.M., Lavrentieva A.E., Ivanov N.K.
DEEP TECTONICS OF NORTH-EAST BAIKAL REGION

Integrated geophysics of Siberian platform edge part in piedmont area of Akitkansky Range in Patom highland carried out using modern equipment allow estimating the deep tectonics of the region. The

most probable fact is that dynamic stress of collision nature on Earth crust resulted in occurrence of a number of inclined fault zones sub-parallel to the contour of mountain framing. The direct contact of Proterozoic deposits with sedimentary cover formations of the platform is in the inclined through fault thrust.

UDC 550.83:551.3

Ustinova V.N., Ustinova I.G., Ustinov V.G., Starikov N.N.
DIGITAL MODELS OF PHYSICAL FIELDS
AND MORPHOSURFACES AT REGIONAL PREDICTION
OF OIL-AND-GAS CONTENT

The involvement of regional research results to oil-and-gas content prediction allowed establishing the criteria for determining hydrocarbon deposit accumulations on the platforms, their confinement to triple junction lineaments in rift basins, to the basins of stable warping and inherited development: since ancient rift-aulacogen to rift structures of Permian and Triassic. The construction of digital models for surface of mantle and magnetic field of Western Siberian Plate became the base for determining the confinement of sedimentary complexes with maximum oil-and-gas content in platform cover sediments to the areas of anomalous curvature on mantle surface and maximum variability of magnetic field – on fragments of negative anomalies of field intensity corresponding to basement high. The probabilistic statistical analysis of prediction criteria information value allowed estimating the probability of occurrence of prospective targets.

UDC 553.98;550.4

Zhiltsova A.A., Isaev V.I., Korzhov Yu.V.
VERTICAL GEOCHEMICAL ZONALITY OF OIL-AND-GAS
COMPLEX (BY THE EXAMPLE OF ROGOZHNIKOVSKY AND
SEVERO-ROGOZHNIKOVSKY FIELDS)

Based on the unique geochemical researches of core material samples in two prospect wells (718, 765) the interstratal displacement of heavy oil hydrocarbons (C_{10} – C_{25}) was determined in section of Rogozhnikovskiy and Severo-Rogozhnikovskiy fields of the Khanty-Mansiysk Autonomous Region. The authors have developed a geochemical model of vertical migration of heavy oil hydrocarbons in which the compounds capable of interstratal migration were determined. The migration form was proposed and the distance of substances displacement in the section was estimated.

UDC 553.94 (55)

Rybalko V.I., Arbuzov S.I., Volostnov A.V.
IRAN COAL METAL-BEARING

The average grades of impurity elements in coals of the Islamic Republic of Iran were estimated. The authors detected the metal-bearing coals and determined geochemical specialization of coal basins and deposits. It was ascertained that the mixed chalcophile lithophile siderophile type of geochemical specialization is significant for Iran coals.

UDC 622.276.43

Abidov D.G., Kamartdinov M.R.
THE METHOD OF MATERIAL BALANCE AS A PRIMARY
TOOL FOR ESTIMATING THE INDICES OF FIELD AREA
DEVELOPMENT AT FLOODING

The article considers the problem of applying the material balance when estimating the efficiency of field area flooding. The authors propose the solution of the problem of distributing the produced and pumped liquid volumes of total edge wells between the adjacent areas (the problem of well allocation estimation). The method is based on transition from constant geometrical well allocation factors which are valid only at symmetric pattern of pressure distribution to their alternating analogues. It could reflect the real situation when the pressure distribution pattern changes. This effects, in its turn, on well flow rates distribution among the areas.

UDC 551.762(571.1)

Beyzel A.L.
THE CHART OF INDEXING THE PRODUCTIVE SAND LAYERS
OF JURASSIC IN WESTERN SIBERIA ON THE BASIS OF
CYCLOGENESIS INVERSION MODEL

The author has developed a new chart of indexing the productive sand layers based on separate approach to continental and marine sections. Sand layers are basal in alluvial cycles and they are roofing regressive in marine ones. They cannot be synchronous to each other. The chart proposed introduces two columns of indices instead of the uniform one J_n . The marine layers are denoted by letter «m» and letter «c» is used for denoting the continental layers. For example, J_{m1} and J_{c1} . The index of the type J_i^j is applied for the layers of uncertain facial belonging and for cycles as a whole. The layers of the type J_2^0 are considered as the immediate continuation of continental basal layers of the main phase of streamflow activation. The lowest layer of Vasyugan zone in marine facies has index J_{m2}^0 and the continental layer synchronous to it – J_{c2}^0 .

UDC 551.762 (571.1+420)

Beyzel A.L., Alifirov A.S.
THE POSSIBILITY OF DETERMINING THE ANALOGUES OF
VASYUGAN, GEORGIEV AND PARTIALLY BAZHENOV ZONES
OF WESTERN SIBERIA IN STRATOTYPICAL SECTIONS OF
CALLOVIAN, OXFORDIAN AND KIMMERIDGIAN STAGES OF
SOUTHERN ENGLAND

Stratigraphic zones of Western Siberia Jurassic considered under a certain angle of view represent the sedimentation cycles of high order. The boundaries of these cycles possess a high correlation potential. They are traced far beyond the region – in Western Siberia, Pechora basin, on the Barents Sea shelf, the East-European platform, the North Caucasus etc. The opportunity to trace the Siberian zones in stratotypical sections of proper stages in Western Europe is of particular interest. Such correlation with application of the detailed ammonite scales is introduced by the example of Vasyugan, Georgiev and partially Bazhenov zones.

UDC 553.984;552.54

Koveshnikov A.E.
OIL-AND-GAS FIELDS OF FRACTURED-MATASOMATIC
GENESIS IN PRE-JURASSIC DEPOSITS
OF WESTERN-SIBERIAN GEOSINECLISE

In pre-Jurassic deposits of Western-Siberian geosineclise the oil-and-gas fields may be formed in petroleum contact zone of Paleozoic and Mesozoic deposits by Permo-Triassic mantles of waste or in hydrothermal-metasomatic fractured zones both in unaltered rocks and at these zones overlapping to the zone of Permo-Triassic mantle of waste. The key system is the one of conjugated fractures or fracture zones. This system includes the reservoir rocks of waste mantle zone as separate areas for improving the reservoir characteristics.

UDC 553.984;552.54;551.253

Koveshnikov A.E.
THE SOURCE OF OIL AND GAS DELIVERY INTO PALEOZOIC
DEPOSITS OF WESTERN-SIBERIAN GEOSINECLISE

Paleozoic deposits at formation and further transformations have passed three stages: diagenesis and primary catagenesis; orogenesis and weathering mantle formation; secondary catagenesis and formation of fracture hydrothermal-metasomatic reservoir rocks. The Paleozoic rocks passed the principle stage of oil generation at primary catagenesis. At the orogenesis stage of region development the oil generated at the primary catagenesis was dissipated in the area of weathering mantle formation. The reservoir rocks were formed as a unified system and some of them were filled with oil and gas at the secondary-catagenetic stage of rock transformation. Oil migrates to the fields concentrated in Paleozoic deposits as a result of diffusion transfer in formation water of high temperature. The oil is separated from formation water in the form of drops on deep fault areas due to oil passing the «dew point» and lifting by gravitation forces to the reservoir rocks formed in Paleozoic deposits.

UDC 622.279.23: 519.688

Zhuravsky V.V., Sergeev V.L.
ESTIMATION OF RECOVERABLE RESERVES IN GAS AND CONDENSATE FIELDS ON THE BASIS OF THE INTEGRATED MODEL METHOD

The authors consider the problem of determining the recoverable reserves in gas and condensate fields by the production data and propose the technique for its solution. The technique is based on integrated system of material balance models considering a-priori information. The article introduces the results of analysis of accuracy of the proposed and traditional pressure drop methods based on indices data at development of Anastasievsk-Troitsk condensate field.

UDC 622.276.031.011.43:53.091

Mezentsev D.N., Shchemelin Yu.A., Ledovskaya T.I., Voykov G.G.
THE EFFECT OF PRESSURE CONDITIONS ON PETROPHYSICAL BONDS FOR RESERVOIRS OF NORTH-VENINSK FIELD

The article considers the results of the laboratory tests for determining rocks reservoir and petrophysical properties: porosity, permeability, elastic waves travel speed, electric resistivity under atmospheric and pressure conditions for reservoirs of North-Veninsk field in the Sakhalin region. The authors have obtained the correlation relations of the characteristics under test.

UDC 622.276.6

Mezentsev D.N., Kvesko N.G.
ESTIMATION OF PERMEABILITY RECOVERY IN TERRIGENOUS RESERVOIRS WHEN MODELING SEALING PROCESSES

The authors have carried out the laboratory tests of oil permeability change under the effect of sealing fluids for core samples of terrigenous reservoir in Tomsk region field. It was ascertained that application of Cenomanian horizon water results in maximum fall of sample permeability. Application of additive in composition off sealing fluid «Neftenol-K» allows balancing the negative effect and preserving permeability.

UDC 622.276

Martynov M.E., Kvesko B.B., Karpova E.G., Kvesko A.R.
EVALUATION OF PERMEABILITY AND INTRASTRATAL CROSS-FLOW IN A LAYER VERTICALLY INHOMOGENEOUS IN POROSITY AND PERMEABILITY PROPERTIES

Based on the analysis of the results of hydrodynamic researches the authors have considered the mechanism for evaluating vertical permeability. The classical analytical solution for dually completed systems at assumption on pseudostationary intrastratal cross-flow was used to calculate the layer parameters. The authors evaluated the values of permeability for each layer at their integration test.

UDC 543.38:543.51

Serebrennikova O.V., Russkikh I.V., Gulaya E.V., Strelnikova E.B., Kadychagov P.B.
HYDROCARBONS AND ORGANIC COMPOUNDS OF OXYGEN IN BOTTOM SEDIMENTS OF ALTAY AND KHAKASSIA LAKES

Using the techniques of IR-spectrometry and gas chromatography mass spectrometry the authors have studied the organic compounds distribution in bottom sediments of Altay and Khakassia lakes. The structure and content of individual groups of hydrocarbons and oxygen-containing compounds indicate not only the natural but also anthropogenic factors of forming the organic constituent of bottom sediments.

UDC 556.314

Kolubaeva Yu.V.
MIGRATION PATTERNS OF CHEMICAL ELEMENTS IN WATERS OF NORTHERN PART OF KOLYVAN-TOMSK FOLDED ZONE

Using the software system HydroGeo the author has studied inorganic migration patterns of chemical elements in natural waters of northern part of Kolyvan-Tomsk folded zone (Tomsk region, Tomsk district). It was shown that chemical elements being the main ones in water salt composition migrate mainly in ionic form or in the form of neutral nondissociating molecules. Microelements form a great number of complexes of different strength along with ionic migration pattern.

UDC 556.314

Guseva N.V., Kopylova Yu.G., Leushina S.K.
ABUNDANCE OF RARE EARTH ELEMENTS IN NATURAL WATERS OF KHAKASSIA

The authors have studied the abundance of rare earth elements in natural waters of Khakassia (Shirinsky district). The effect of physico-chemical parameters of waters on behavior features of rare earth elements was determined. The levels of elements accumulation in lake, river and ground waters were defined. The article introduces a new approach to rationing of rare elements content in waters by hydrosphere clarks.

UDC 551.577.53:553.982.2

Bolshunova T.S.
DISTRIBUTION OF SOME CHEMICAL ELEMENTS IN SNOW MELTED WATER FROM AREAS OF OIL AND GAS PLANTS OF TOMSK REGION

The article introduces the data on chemical elements content in snow melted water obtained by snow survey of the area of effect of Tomsk region oil and gas plants. The elevated concentrations of such elements as Li, Be, Na, Mn, Ni, Zn, As, Mo, Th, U are detected for this area. It may be conditioned both by effect of air pollution source emissions on oil fields and regional air transport of pollutant emissions from industrial enterprises of Tomsk and neighboring regions.

UDC 622.341:622271.6(071.16)

Shaykhiev I.R.
GEO-ECOLOGICAL PROBLEMS OF DEVELOPING BAKCHAR IRON-ORE DEPOSIT BY HYDRAULIC BOREHOLE MINING

The article considers the main geo-ecological problems which may occur when developing Bakchar iron-ore deposit by hydraulic borehole mining. The author has analyzed the experience of previous years when this technique was applied on Tarskoe zircon-ilmenite deposit and Shumraevsk area of Kursk magnetic anomaly.

UDC 662.2:658.567.5:502.175

Popova M.V., Litvinov A.V., Kozlov S.N., Lushev V.P.
CASE STUDY OF ECOLOGICAL RISKS WHEN FIRING PROPULSION SYSTEM SOLID-PROPELLANT ON THE OPEN STAND

The authors have considered the factors which determine environmental safety of an open stand when firing propulsion system solid-propellant using water environmental protection. The article introduces the diagram for structural characterization of information management system for controlling the level of combustion products air emission. The function of ecological risk considering the failure of information management system was defined. The authors state the functional and parametric failures of environmental safety supporting system. The article considers the features of thermodynamic state of combustion product air emission.

Сведения об авторах

- Абидов Денис Геннадьевич**, 1985 г.р., ведущий специалист по технике и технологии добычи нефти компании «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.», г. Южно-Сахалинск. Р.т. 8-(424-2)-66-77-14. E-mail: Denis.Abidov@sakhalinenergy.ru. Область научных интересов: проблемы разработки нефтяных и газовых месторождений, оценка эффективности процесса заводнения пластов.
- Абросимова Ольга Олеговна**, канд. геол.-минерал. наук, гл. геолог проекта ГЭЦОИ ОАО «Сибнефтегеофизика», г. Новосибирск. Р.т. 8-(383-2)-201-18-20. E-mail: abrosimova@sibngf.ru. Область научных интересов: комплексная интерпретация геолого-геофизических данных, построение геологических моделей месторождений углеводородов.
- Алифиров Александр Сергеевич**, 1983 г.р., канд. геол.-минерал. наук, науч. сотр. Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск. Р.т. 8-(383)-333-23-06. E-mail: Alifirovas@ipgg.sbras.ru. Область научных интересов: юрские аммониты, стратиграфия, палеогеография бореальных морских бассейнов.
- Бейзель Александр Леович**, 1950 г.р., канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр. Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск. Р.т. 8-(383)-335-64-20. E-mail: BeiselAL@ipgg.nsc.ru. Область научных интересов: бассейновый анализ, нефтяная геология, стратиграфия.
- Большунова Татьяна Сергеевна**, инженер 2 категории отдела экологического нормирования ОАО «ТомскНИПИнефть», аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 70-19-37. E-mail: bts26@mail.ru. Область научных интересов: экологический мониторинг, снеговая съёмка, биомониторинг, лимномониторинг.
- Войков Геннадий Григорьевич**, 1968 г.р., главный геолог ООО «Венинефть», г. Южно-Сахалинск. Р.т. 8-(424-2)-49-99-74. E-mail: gvouykov@mogneft.ru. Область научных интересов: связь петрофизических исследований ядра с данными скважинных исследований.
- Губа Александр Викторович**, 1962 г.р., ведущий инженер лаборатории сейсмогеологического моделирования ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН», г. Новосибирск. Р.т. 8-(383-2)-306-63-71. E-mail: GubaAV@ipgg.nsc.ru. Область научных интересов: комплексный анализ геолого-геофизических данных при поисках и разведке месторождений углеводородов, развитие методов многомерной интерпретации.
- Гулая Елена Владимировна**, мл. науч. сотр. лаборатории природных превращений нефти Института химии нефти СО РАН, г. Томск. Р.т. 49-25-97. E-mail: gulaya@ipc.tsc.ru. Область научных интересов: геоэкология и нефтехимия, выявление закономерностей в составе, строении и распределении отдельных классов соединений.
- Гусева Наталья Владимировна**, канд. геол.-минерал. наук, науч. сотр. научно-образовательного центра «Вода», доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 41-90-68. E-mail: guseva24@yandex.ru. Область научных интересов: геохимия природных вод, гидро-геохимический метод поисков месторождений полезных ископаемых, геохимия редкоземельных элементов.
- Жильцова Анна Александровна**, аспирант кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-65. E-mail: zhiltsova@mail.ru. Область научных интересов: геохимические методы поиска залежей углеводородов.
- Журавский Вадим Викторович**, 1989 г.р., магистр кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-13-53. E-mail: vadumnv@gmail.com. Область научных интересов: мониторинг разработки месторождений углеводородов.
- Иванов Николай Константинович**, 1954 г.р., ведущий геофизик партии сейсмических исследований Геоинформационного центра ФГУНПП «Иркутскгеофизика», г. Иркутск. Р.т. 8-(395-2)-38-75-53. E-mail: ink@gic.irk.ru. Область научных интересов: геофизические исследования при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых. Интерпретация материалов сейсмических исследований.
- 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: isaevvi@tpu.ru. Область научных интересов: нефтегеологическая интерпретация геолого-геофизических данных.
- Кадычагов Петр Борисович**, 1956 г.р., науч. сотр. лаборатории природных превращений нефти Института химии нефти СО РАН, г. Томск. Р.т. 49-25-97. E-mail: pkad@ipc.tsc.ru. Область научных интересов: геоэкологические исследования индивидуальных классов органических соединений в объектах окружающей среды методом хромато-масс-спектрометрии.
- Камартдинов Марат Рамисович**, 1980 г.р., зам. директора Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 56-43-45. E-mail: kamartdinovmr@hw.tpu.ru. Область научных интересов: проблемы разработки нефтяных и газовых месторождений, оценка эффективности процесса заводнения пластов.
- Карпова Евгения Геннадьевна**, ассистент кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-13-52. E-mail: karpovae@tpu.ru. Область научных интересов: гидромеханика.
- Квеско Андрей Русланович**, 1991 г.р., студент кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-62-70. E-mail: kveskobb@gmail.com. Область научных интересов: гидромеханика, численные методы.
- Квеско Бронислав Брониславович**, 1948 г.р., канд. физ.-мат. наук, профессор, кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института нефти и газа Сибирского федерального университета, г. Красноярск. Р.т. 8-(391)206-26-03. E-mail: kveskobb@gmail.com. Область научных интересов: многофазные потоки, численные методы.

- Квеско Наталия Геннадьевна**, д-р техн. наук, профессор кафедры бурения Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 56-38-42. E-mail: kveskong@gmail.com. Область научных интересов: дисперсные системы, гранулометрический состав, приборы для анализа дисперсного состава, буровые и тампонажные растворы, анализ дисперсности нанопорошков, применение нанотехнологий в бурении, технологии и средства повышения нефтеотдачи нефтегазового пласта.
- 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@tpru.ru. Область научных интересов: геология нефти и газа, литология и коллекторские свойства пород-коллекторов доюрских отложений Западной Сибири.
- Козлов Станислав Николаевич**, 1934 г.р., канд. техн. наук, академик Международной Академии Наук экологии, безопасности человека и природы, член Экологического совета при Представителе президента в Сибирском федеральном округе, профессор кафедры ракетных двигателей и высокоэнергетических устройств автоматических систем Бийского технологического института (филиала АлтГТУ им. И.И. Ползунова), г. Бийск. Р.т. 8-(385-4)-30-32-01. E-mail: magistrus@city.biisk.ru. Область научных интересов: ракетная техника, газотермодинамика, экологическая безопасность.
- Колубаева Юлия Викторовна**, аспирант, инженер кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 49-21-63. E-mail: Kolubaeva@inbox.ru. Область научных интересов: исследования в области гидрогеохимии и геоэкологии пресных подземных вод.
- Копылова Юлия Григорьевна**, канд. геол.-минерал. наук, начальник научно-образовательного центра «Вода», доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 41-90-68. E-mail: unpc_voda@mail.ru. Область научных интересов: геохимия природных вод, гидрогеохимический метод поисков месторождений полезных ископаемых.
- Коржов Юрий Владимирович**, 1962 г.р., канд. хим. наук, доцент кафедры геологии Института природопользования Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск. Р.т. 8-(346-7)-35-78-25. E-mail: ykor1962@mail.ru. Область научных интересов: геохимические методы поиска залежей углеводородов.
- Криничина Ксения Александровна**, студент кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-64. E-mail: kns@tpru.ru. Область научных интересов: геотермия.
- 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.
- Лаврентьева Алла Ефимовна**, ведущий геофизик партии электромагнитных исследований Геоинформационного центра ФГУНПП «Иркутскгеофизика», г. Иркутск. Р.т. 8-(395-2)-38-75-53. E-mail: lae@gic.irk.ru. Область научных интересов: геофизические исследования при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых. Интерпретация материалов электромагнитных исследований.
- Ледовская Татьяна Ивановна**, ведущий инженер лаборатории физики пласта ОАО «ТомскНИПИнефть», г. Томск. Р.т. 61-18-91. E-mail: Ledovskayati@nipineft.tomsk.ru. Область научных интересов: коллекторские свойства горных пород, петрофизические исследования керны и их связь с данными ГИС.
- Лушина Софья Константиновна**, студент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 41-90-68. E-mail: unpc_voda@mail.ru. Область научных интересов: геохимия природных вод, геохимия редкоземельных элементов.
- Литвинов Андрей Владимирович**, 1971 г.р., канд. техн. наук, заместитель генерального директора, директор-главный конструктор по НИОКР ОАО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск. Р.т. 8-(385-4)-30-10-78. E-mail: post@frpc.secna.ru. Область научных интересов: ракетная техника, измерительные средства и системы, экологическая безопасность.
- Лобова Галина Анатольевна**, канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-64. E-mail: lobovaga@tpru.ru. Область научных интересов: нефтегеологическая интерпретация геолого-геофизических данных.
- Лушев Владимир Прокопьевич**, 1946 г.р., начальник сектора ОАО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск. Р.т. 8-(385-4)-30-59-17. E-mail: post@frpc.secna.ru. Область научных интересов: ракетная техника, измерительные средства и системы, экологическая безопасность.
- Мартынов Михаил Евгеньевич**, 1986 г.р., аспирант кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-62-70. E-mail: martynovme@yahoo.com. Область научных интересов: разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений, геология нефти и газа.
- Мезенцев Дмитрий Николаевич**, 1980 г.р., аспирант Института природных ресурсов ТПУ, ведущий инженер ОАО «ТомскНИПИнефть», г. Томск. Р.т. (3822) 61-18-49. E-mail: MezentsevDN@nipineft.tomsk.ru. Область научных интересов: лабораторное моделирование процессов, связанных с добычей нефти, исследования по «старению» керны в различных флюидах и его влияние на смачиваемость.
- Онуфриенок Виктор Васильевич**, 1953 г.р., канд. физ.-мат. наук, доцент Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского Федерального Университета, г. Красноярск. Р.т. 8-(391)-298-02-55. E-mail: VOnufriy-pok@yandex.ru. Область научных интересов: физико-химические свойства и фазовые превращения нестехиометрических минералов, индуцированные точечными дефектами.
- Осипова Елизавета Николаевна**, ассистент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-63-81. E-mail: osipovaen@list.ru. Область научных интересов: нефтяная геология; геофизика в нефтяной геологии.
- Останкова Юлия Григорьевна**, студент кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-63-81. E-mail: ostankovajg@sibmail.com. Область научных интересов: геология и геохимия баженовской свиты, геотермия.
- Пашевин Александр Михайлович**, 1955 г.р., канд. геол.-минерал. наук, начальник партии электромагнитных исследований Геоинформационного центра ФГУНПП «Иркутскгеофизика», г. Иркутск. Р.т. 8-(395-2)-38-75-53. E-mail: amp@gic.irk.ru. Область научных интересов: гео-

- физические исследования при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых. Электромагнитные зондирования среды.
- Попова Мария Владиславовна**, ведущий инженер ОАО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск. Р.т. 8-(385-4)-30-10-72. E-mail: popova.maria.v@gmail.com. Область научных интересов: ракетная техника, измерительные средства и системы, экологическая безопасность.
- 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.
- Русских Ирина Владимировна**, науч. сотр. лаборатории природных превращений нефти Института химии нефти СО РАН, г. Томск. Р.т. 49-25-97. E-mail: rus@ipc.tsc.ru. Область научных интересов: определение нефтяных углеводородов в объектах окружающей среды методами ИК-спектроскопии и хромато-масс-спектрометрии.
- Сергеев Виктор Леонидович**, 1947 г.р., д-р техн. наук, профессор кафедры геологии и разработки нефтяных месторождений Института геологии и нефтегазового дела ТПУ. Р.т. 42-13-53. E-mail: SergeevVL@ignd.tpu.ru. Область научных интересов: мониторинг разработки месторождений углеводородов, системный анализ, идентификация и управление.
- Серебренникова Ольга Викторовна**, д-р хим. наук, профессор кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов ТПУ, зав. лабораторией природных превращений нефти Института химии нефти СО РАН, г. Томск. 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 в горючих ископаемых.
- Стариков Николай Николаевич**, 1987 г.р., аспирант кафедры геофизики Института природных ресурсов ТПУ. Р.т. 42-61-72. E-mail: ustinovavn@tpu.ru. Область научных интересов: нефтяная геология, обработка и интерпретация материалов сейсморазведки и ГИС, математические методы моделирования геофизических полей и геолого-геофизических объектов.
- Старостенко Виталий Иванович**, 1935 г.р., д-р физ.-мат. наук, академик НАН Украины, директор Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины. Р.т. 380-(44)-424-01-12. E-mail: anna_log@ukr.net. Область научных интересов: теория интерпретации потенциальных полей; проблемы создания автоматизированных систем обработки и интерпретации гравиметрических и магнитометрических данных; теория и методика решения некорректно поставленных задач геофизики; проблемы построения плотностных моделей коры и верхней мантии Земли.
- Стрельникова Евгения Борисовна**, мл. науч. сотр. лаборатории природных превращений нефти Института химии нефти СО РАН, г. Томск. Р.т. 49-19-62. E-mail: seb@ipc.tsc.ru. Область научных интересов: геохимические исследования кислородсодержащих соединений в объектах окружающей среды методом хромато-масс-спектрометрии.
- 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. техн. наук, доцент кафедры высшей математики Физико-технического института ТПУ. Р.т. 56-35-93, 34-63-33. E-mail: hggh45de@mail2000.ru. Область научных интересов: математические методы моделирования процессов и явлений, фильтрация геофизических полей.
- Устинов Владимир Геннадьевич**, 1979 г.р., программист отдела информатизации и менеджмента знаний ТПУ. Р.т. 56-39-14. E-mail: ustinovvg@tpu.ru. Область научных интересов: вариации магнитного поля, математические методы моделирования процессов Солнечно-Земного взаимодействия.
- Шайхiev Ильдар Рафаилович**, 1983 г.р., инженер по охране окружающей среды филиала ООО «Транснефтьстрой», г. Томск. E-mail: Ildar.shaihiev@mail.ru. Область научных интересов: эколого-геохимическое исследование природных сред.
- Щемелинин Юрий Алексеевич**, 1947 г.р., канд. техн. наук, зав. лабораторией физики пласта ОАО «ТомскНИПИнефть», г. Томск. Р.т. 61-18-70. E-mail: Schemelininya@nipi-neft.tomsk.ru. Область научных интересов: физика пласта, экспериментальное исследование фильтрационных процессов в пласте и призабойной зоне, методы идентификации нефтеотдачи.

Редактирование и корректура *А.С. Глазырин*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Перевод на англ. язык *С.В. Жаркова*

Подписано к печати 12.02.2013. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 20,47. Уч.-изд. л. 18,52.
Заказ 136-13. 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, izv@tpu.ru