

ISSN 1994-3601

ГЕОЛОГИЯ

Вестник Пермского университета

Issue 2 (27) 2015

Выпуск 2 (27) 2015

GEOLOGY

Bulletin of Perm University



ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
PERM STATE UNIVERSITY

Вестник Пермского университета. Геология. 2015. Выпуск 2 (27)

Научный журнал. Выходит 4 раза в год

Основан в 1994 году

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ)

Журнал «Вестник Пермского университета. Геология» публикует статьи по фундаментальным и прикладным проблемам современной геологии, включая вопросы общей геологии, геотектоники, петрологии, минералогии, литологии, гидрогеологии, инженерной геологии, геохимии, геофизики, геологии поисков и разведки твердых полезных ископаемых, геологии нефти и газа, минерагении и геоэкологии.

С 1994 по 2011 г. журнал публиковался раз в год, с 2011 г. выходит четыре раза в год. Журнал публикует статьи на русском и английском языках.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: д.г.-м.н., профессор А.С. Алексеев (МГУ, г. Москва); д.г.-м.н., профессор А.Г. Бараников (УГГУ, г. Екатеринбург); д.т.н., профессор А.А. Баряж (Горный ин-т УрО РАН, г. Пермь); к.г.-м.н., доцент С.М. Блинов (ПГНИУ, г. Пермь); д.г.-м.н., профессор В.И. Галкин (ПНИПУ, г. Пермь); д.г.-м.н., профессор В.К. Гаранин (МГУ, г. Москва); д.г.-м.н., доцент Р.Г. Ибламинов (главный редактор, ПГНИУ, г. Пермь); д.г.-м.н., профессор Т.В. Карасёва (ПГНИУ, г. Пермь); д.г.-м.н., профессор В.Н. Катаев (ПГНИУ, г. Пермь); Dr. О.Н. Kovin (ПГНИУ, г. Пермь); д.г.-м.н., доцент И.С. Копылов (ЕНИ ПГНИУ, г. Пермь); акад. РАН, д.г.-м.н., профессор В.А. Коротеев (Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург); д.т.н., профессор В.И. Косяцын (ПГНИУ, г. Пермь); к.г.н., доцент П.А. Красильников (секретарь, ПГНИУ, г. Пермь); чл.-корр. РАН, д.т.н. А.А. Маловичко (Геофизическая служба РАН, г. Обнинск), д.г.-м.н., доцент О.Б. Наумова (ПГНИУ, г. Пермь); д.г.-м.н., гл. науч. сотр. А.С. Некрасов (ПермьНИПиНефть, г. Пермь); к.г.-м.н., доцент В.П. Ожигбисов (ПГНИУ, г. Пермь); д.г.-м.н., профессор Б.М. Осовецкий (зам. гл. ред., ПГНИУ, г. Пермь); д.т.н., профессор И.Л. Санфиров (Горный ин-т УрО РАН, г. Пермь); д.г.-м.н., профессор В.В. Середин (ПГНИУ, г. Пермь); д.г.-м.н., гл. науч. сотр. В.И. Силаев (Институт геологии КомиСГ РАН, г. Сыктывкар); д.г.-м.н. И.И. Чайковский (Горный ин-т УрО РАН, г. Пермь); чл.-корр. РАН, д.г.-м.н., профессор Б.И. Чувашов (Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург).
Иностранные члены редколлегии: Dr., Prof. N.L. Anderson (Missouri University of Science and Technology, USA); Dr., Ass. Prof. R.E. Gallagher (Western Kentucky University, USA); Dr., Senior Lecturer Moidaki Moikwathai (University of Botswana, Botswana); Dr., Ass. Prof. D.L. Reid (University of Cape Town, South Africa); Dr. I.V. Veksler (GEZ Helmholtz Centre Potsdam, Germany).

Адрес редакции: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. Пермский государственный национальный исследовательский университет, геологический факультет. E-mail: riaminov@psu.ru; mineral@psu.ru, факс (342)2-396-832. Сайт журнала: <http://geology-vestnik.psu.ru/index.php/geology>.

© Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2015

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свид. о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-43348 от 28 дек. 2010 г., о перерегистрации в связи со сменой наименования учредителя ПИ № ФС 77-53171 от 14 марта 2013 г.

Bulletin of Perm University. Geology

2015. 2 (27) Issue

Quarterly scientific journal

Established in 1994

Founder: Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Professional Education «Perm State National Research University» (PSNRU)

«Bulletin of Perm University. Geology» (Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya) is the peer-reviewed academic journal publishing the scientific papers covering all fundamental and applied aspects of modern geology, including general geology, geotectonics, petrology, mineralogy, lithology, hydrogeology, geoengineering, geochemistry, geophysics, mineral exploration, oil & gas geology, and geoccology.

From 1994 until 2011, the journal was published annually. Since 2011 it has been published quarterly.

The journal publishes the papers in Russian and English.

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-chief: R.G. Ibaminov (Perm State National Research University, Perm, Russia);

Editors: A.S. Alekseyev (Moscow State University, Moscow, Russia); A.G. Barannikov (Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia); A.A. Bariakh (Mining Institute UB RAS, Perm, Russia); S.M. Blinov (Perm State National Research University, Perm, Russia); V.I. Galkin (Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia); V.K. Garanin (Moscow State University, Moscow, Russia); T.V. Karasieva (Perm State National Research University, Perm, Russia); V.N. Kataev (Perm State National Research University, Perm, Russia); O.N. Kovin (Perm State National Research University, Perm, Russia); I.C. Kopylov (Natural Sciences Institute of the Perm State National Research University, Perm, Russia); V.A. Koroteev (Institute of geology and Geochemistry UB RAS, Ekaterinburg, Russia); V.I. Kositsyn (Perm State National Research University, Perm, Russia); P.A. Krasilnikov (Perm State National Research University, Perm, Russia); A.A. Malovichko (Geophysical Survey RAS, Obninsk, Russia); O.B. Naumova (Perm State National Research University, Perm, Russia); A.S. Nekrasov (Perm-NIPIOil, Perm, Russia); V.P. Ozhgibisov (Perm State National Research University, Perm, Russia); B.M. Osovetskiy (Perm State National Research University, Perm, Russia); I.A. Sanfirov (Mining Institute UB RAS, Perm, Russia); V.V. Seredin (Perm State National Research University, Perm, Russia); V.I. Silayev (Institute of Geology KomiSC RAS, Syktyvkar, Russia); I.I. Chaikovskiy (Mining Institute UB RAS, Perm, Russia); B.I. Chuvashov (Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Ekaterinburg, Russia); N.L. Anderson (Missouri University of Science and Technology, USA); R.E. Gallagher (Western Kentucky University, USA); Moidaki Moikwathai (University of Botswana, Botswana); D.L. Reid (University of Cape Town, South Africa); I.V. Veksler (GEZ Helmholtz Centre Potsdam, Germany).

Содержание

Информация для авторов	4
ЛИТОЛОГИЯ	
<i>Кадебская О.И., Калинина Т.А., Чайковский И.И.</i> Изотопия и морфология новообразованных карбонатов карбонатно-сульфатного массива Ледяная гора	6
<i>Казымов К.П., Багаев А.Н., Жданов В.М.</i> Комплексная методика исследования нефтесодержащих горных пород	17
ГИДРОГЕОЛОГИЯ	
<i>Беляева Г.Л.</i> Гидрогеологическая характеристика разреза Аракаевской параметрической скважины	26
ГЕОФИЗИКА, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ	
<i>Торгашов Е.В., Ковин О.Н., Андерсон Н. Л.</i> Пример использования метода электротомографии для определения мест утечки в теле плотины, Честерфилд, Миссouri	34
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА	
ТВЁРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ	
<i>Зинчук Н.Н., Коптиль В.И.</i> Об особенностях алмазов перспективных территорий Сибирской платформы	41
<i>Молоштанова Н.Е., Исаева Г.А.</i> Применение геохимических индикаторов для определения генезиса сильвинитов Тюбегатанского месторождения	55
<i>Набиуллин В.И.</i> О двух способах расчётного определения объёмной массы сильвинитовых руд по их химическому составу на примере Талицкого участка Верхнекамского месторождения	63
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	
<i>Шестов И.Н., Тюрина И.М., Риянова А.Р.</i> Геотермические условия газонефтоводоносных комплексов Пермско-Башкирского свода в пределах Пермского края	75
<i>Плюснин А.В., Карасева Т.В.</i> Характеристика коллекторов фациенных отложений Соликамской впадины	85
<i>Вельмескин И.В., Кочнева О.Е.</i> Обзор технологий разработки малых и средних глубоководных месторождений нефти и газа.	93

Contents

Information for authors	5
LITHOLOGY	
<i>Kadebskaya O. I., Kalinina T.A., Chaykovskiy I.I.</i> Isotopy and Morphology of the Newly Formed Carbonates of the Ledynaya Gora Carbonate-sulfate Massif	6
<i>Kazymov K.P., Bagaev A.N., Zhdanov V.M.</i> Integrated Methodology of Study of the Oil-bearing Rock	17
HYDROGEOLOGY	
<i>Belyaeva G.L.</i> Hydrogeologic Characteristic of Arakaevskaya Parametric Well	26
GEOPHYSICS, GEOPHYSICAL METHODS OF MINERAL EXPLORATION	
<i>Torgashov E.V., Kovin O.N., Anderson N.L.</i> A Case Study on Usage of Electrical Resistivity Tomography for Dam Seepage Location, Chesterfield, Missouri	34
GEOLOGY, MINERAL EXPLORATION, AND MINERAGENY	
<i>Zinchuk N.N., Koptil V.I.</i> About Characteristics of Diamonds of Perspective Areas of the Siberian Platform	41
<i>Moloshtanova N.E., Isaeva G.A.</i> Use of Geochemical Indicators to Determine the Genesis of Sylvinit of the Tubegatan Deposit	55
<i>Nabiullin V.I.</i> Two Methods of Calculation of Bulk Weight of Sylvinit Ore Using its Chemical Content: Talitskiy Field, Verkhnekamskoye Deposit	63
GEOLOGY AND EXPLORATION OF OIL AND GAS RESOURCES	
<i>Shestov I.N., Tyurina I.M., Rianova A.R.</i> Geothermal Conditions of the Gas- Oil- and Water-bearing Formations of Perm-Bashkirian Arch in Perm Kray	75
<i>Plyusnin A.V., Karaseva T.V.</i> Reservoir Characteristic of Famenian Deposits of the Solikamsk Depression	85
<i>Velmeskin I.V., Kochneva O.E.</i> Overview of Technologies for Development of Small and Medium-sized Deep-water Oil and Gas Fields	93

Информация для авторов

Текст статьи предоставляется в формате А4, поля со всех сторон 2,5 см, кегль 12, строки – через 1 интервал, 2 колонки, расстояние между ними 0,5 см, абзац 6 мм. Использовать автоматическую расстановку переносов. Над названием (кг 20 п/ж, буквы строчные) статьи необходим индекс УДК (кг 12). Фамилии авторов (кг 14 п/ж) даются с указанием почтового и электронного адресов места работы (кг 14).

Статья должна сопровождаться аннотацией (не более 200 слов, кг 12) и ключевыми словами (не более 7 слов, кг 12 курсив). Аннотация должна давать представление о содержании статьи, актуальности проблемы, используемых методах и подходах, новизне, полученных практических результатах.

В тексте (кг 12) следует различать О (букву) и 0 (ноль); 1 (арабскую цифру), I (римскую цифру) и l (латинскую букву); а также дефис (-) и тире (–). Дефис ставится только внутри сложных слов, во всех остальных случаях необходимо ставить тире. Между цифрами, характеризующими интервал значений, ставится тире без отбивки от цифр: 9–11. Расстояние между словами не должно превышать одного пробела. Рекомендуемые кавычки: «...». Нумерованные списки набираются вручную.

Названия разделов статьи (кг 12 п/ж) форматируются по левому краю.

В таблицах, их заголовках, подписях к рисункам – кегль 11. Надписи на рисунках – не менее 10 кегля (см. изданные журналы). Над таблицами должны быть заголовки вида «Таблица 1. Название таблицы курсивом». Слова в таблицах должны быть написаны полностью. В конце заголовков и ячеек таблицы точка не ставится. Под рисунками должны быть подписи типа «Рис. 1. Название рисунка курсивом». В конце всех заголовков и подписей к рисункам точка не ставится. Подписи должны быть отделены от таблиц и рисунков и доступны для редактирования. Они форматируются по левому краю. Большие таблицы и рисунки могут располагаться по всей ширине страницы. Таблицы и рисунки располагать по тексту.

В пристатейном списке литературы желательно привести не менее 10–15 источников. Библиографический список (кесть 11) оформляется в формате, установленном системой РИНЦ, с обязательным указанием страниц источника цитирования. Источники в списке располагаются в алфавитном порядке. В тексте номер источника указывается в квадратных скобках: [1]. В списке название журнала «Вестник Пермского университета. Геология» указывать без сокращений.

В конце статьи на английском языке приводятся: название статьи, фамилии авторов с указанием почтового и электронного адресов места работы, аннотация, список литературы. В списке литературы русскоязычные названия дублируются на латинице и переводятся на английский (Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 267 с. Balashov Yu.A. 1976. Geokhimiya redkozemelnykh elementov [Geochemistry of rare-earth elements]. Moskva, Nauka.).

Статья объемом до 1 печ. листа представляется в электронном виде в формате Microsoft Word 97-2003. Сложные формулы и уравнения набираются в редакторе Microsoft Equation (версия 3.0 и ниже), рисунки – в формате tiff или jpg с разрешением не менее 300 dpi. Статьи представляются в редакторе через сайт журнала или по электронной почте. На присылаемые статьи необходимо иметь разрешение организации, где выполнена работа. Присланные статьи подвергаются научному рецензированию, литературному и техническому редактированию и после публикации размещаются в РИНЦе и на сайте университета.

Адрес редакции: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. Пермский государственный геологический факультет, гл. редактору журнала Ибламинову Р.Г. E-mail: iaminov@psu.ru; mineral@psu.ru. Факс (342) 2-396-832. Тел. (342) 2-396-332. Сайт журнала: <http://geology-vestnik.psu.ru/index.php/geology>.

Information for authors

«Bulletin of Perm University. Geology» (Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya) is the peer-reviewed academic journal publishing the scientific papers covering all fundamental and applied aspects of modern geology, including general geology, geotectonics, petrology, mineralogy, lithology, hydrogeology, geoengineering, geochemistry, geophysics, mineral exploration, oil & gas exploration, and geoecology. From 1994 until 2011, the journal was published annually. It has been published quarterly since 2011.

The journal publishes the papers in Russian and English. All the papers are accompanied by the annotations in English and Russian respectively.

Manuscript submission

The authors are encouraged to submit the manuscripts in Microsoft Word 97-2003 format. Figures must be in .tiff or .jpeg format (300 dpi) and embedded in the double columned text as well as the tables. Manuscript should be submitted through the journal site or by E-mail. If manuscripts meets the scope of journal and its criteria, it will be double blind peer-reviewed by two reviewers. The copies of declined manuscripts will not be returned to authors.

The paper length of 10 pages or less is encouraged. Manuscript must not be previously published, accepted or considered for publication elsewhere. The cover letter should contain the title, statement and name of colleague reviewed the paper.

The manuscript must contain a title page, abstract, introduction, methods, results and discussion, conclusions, and references. The other desired sections may be included.

The title page should contain the authors list accompanied by addresses and affiliation information. The corresponding author name must be indicated along with mailing address, phone number, fax, and E-mail address. The abstract should be 150 - 200 words in length and present the most important information in single column text format. Keywords list should contain 6-7 words. Acknowledgements section can be used for indication of organizations or/and individuals contributed in the work.

References should be numbered. References list must contain 10-15 references. Citation number in the text must be enclosed in square brackets. Reference list should be ordered alphabetically.

Manuscript should be typed on the standard letter paper (8.5"x11") with 2.5 cm margins. The single spaced text of paper body should be typed in 12-pt, the title in bold 20-pt, and authors information in 14-pt Times New Roman fonts.

The figure and tables captures should be left justified and in the following form: **Fig. 1. Figure capture, Table 1. Table capture.** Capture text should be typed in 11-pt Times New Roman fonts.

Publication ethics

We support the generally accepted principles of publication ethics for editors, reviewers, and author's action including authorship definition, plagiarism, research quality, cheating, and reviewers bias. We practice the ethical standards suggested by the Committee on Publication Ethics (COPE: <http://publicationethics.org>).

The Editorial Board address: Perm State National Research University, Geological Faculty, 614990, Perm, Bukirev Str., 15.

E-mail: riaminov@psu.ru; mineral@psu.ru.

Fax: +7(342) 2-396-832.

Tel.: +7(342) 2-396-332.

Address: <http://geology-vestnik.psu.ru/index.php/geology>

ЛИТОЛОГИЯ

УДК 552.54:550.42

Изотопия и морфология новообразованных карбонатов карбонатно-сульфатного массива Ледяная гора

О.И. Кадебская, Т.А. Калинина, И.И. Чайковский

Горный институт УрО РАН, 614007, Пермь, ул. Сибирская, 78а

E-mail: icecave@bk.ru

(Статья поступила в редакцию 8 мая 2015 г.)

Рассмотрены морфология, изотопный и химический состав новообразованных карбонатов в разрезе карбонатно-сульфатного массива Ледяная гора и различных микроклиматических зонах Кунгурской ледяной пещеры. Установлено, что состав новообразованных карбонатов определяется их положением в разрезе: в коре выветривания они характеризуются отсутствием примесей, а ниже по разрезу показывают значительные вариации состава, что дает основание сопоставлять их с карбонатами зоны вторичного обогащения, реализуемой на карбонатном барьеере. Существенное преобладание в верхней части коры выветривания кальцита, а не менее растворимого доломита позволяет предполагать, что новообразованные минералы являются не продуктом трансформации исходного материала карбонатных пачек иренской свиты, а образуются при взаимодействии сульфатно-кальциевых вод с атмосферным или биогенным углекислым газом. Изучение вторичных карбонатов из разных микроклиматических зон Кунгурской ледяной пещеры показало, что температура не влияет на состав новообразованных фаз, а определяет только их морфологию и вариации изотопного состава углерода.

Ключевые слова: Пермский край, экваториты, гипергенез, криогенез, изотопия.

DOI: 10.17072/psu.geol.27.6

Введение

В карстовых массивах кроме процессов растворения и выноса материала имеет место его осаждение и накопление. Вопросы гипергенной трансформации карбонатных массивов рассмотрены в большом ряде работ [14, 15, 17]. Процессы, происходящие в карбонатно-сульфатных массивах, имеют более сложный характер и на сегодняшний день изучены недостаточно [2, 3, 10]. Для последних предпола-

гаются свои особенности структурно-вещественного изменения [8]. Для некоторых пещер Урала было показано [4, 6, 11], что условия происходящего в настоящее время минералообразования определяются микроклиматической зональностью.

Модельным объектом для исследования явилась Ледяная гора и расположенная в ее недрах Кунгурская ледяная пещера, протянувшаяся от борта долины р. Сылва вглубь массива на 700 м, что по-

зволило получить материал как из вертикального разреза, так и по латерали карстующегося массива. Для изучения распределения минералов по разрезу были отобраны пробы из коры выветривания и коренных пород, вскрытых скважиной № 4443 [5]. Для выявления связи вторичной минерализации с температурными условиями были отобраны пробы из различных микроклиматических зон Кунгурской ледяной пещеры.

Минералого-петрографическое изучение проб проводилось с помощью оптического стереомикроскопа Leica MZ16 и сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 TESCAN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350/X-max 20 (операторы Е.П. Чиркова и О.В. Коротченкова). Анализ стабильных изотопов С и О проводился в Институте геологии КНЦ УрО РАН (г. Сыктывкар) на масс-спектрометрах МИ-1309 (аналитик М.А. Кудинова) и DELTA V Advantage (аналитик И.В. Смолова), а также Геологическом институте АН Словакии на масс-спектрометре MAT-253 с прибором для автоматической подготовки карбонатов Gasbench III (рук. Р. Миловский).

Характеристика карбонатного материала из разреза скважины

Разрез по скважине № 4443 с положением исследованных проб карбонатного материала показан на рис. 1. Четыре из них отобраны из коры выветривания и две – из коренного массива.

Верхняя часть разреза представлена неоген-четвертичной корой выветривания мощностью до 35-38 м, сложенной известковистой глиной с дресвяно-щебневым материалом. В верхней части (до глубины 14,5 м) обломки представлены тонкослоистым алевролитом и аргиллитом, а в нижней (17,4-33,0 м) – пелитоморфным доломитом с ячеисто-кавернозным строением. В интервале 14,5-17,4 м вскрывается пелитоморфный тонкослоистый известковистый доломит,

залегающий под углом 25-30°, являющийся, вероятно, ксенолитом елкинской пачки иренской свиты. На контакте коры выветривания и подстилающих сульфатов шашинской пачки иренской свиты вскрыта карстовая полость (интервал глубин 33,0-38,3 м) с глинисто-дресвяными отложениями, в составе которых присутствуют карбонатные обломки.

Проба 1 отобрана из верхней части разреза (0,3-14,5 м). Здесь новообразованный кальцит отмечен в глинистой массе и на стенках трещин, где он представлен одиночными кристаллами, сростками и сложными агрегатами, которые образованы гранями острого, промежуточного и тупого ромбоэдра. Здесь также зафиксированы ромбоэдры (в комбинации с пинакоидом) доломита. Поверхность кристаллов карбонатов разная: отмечены как гладкогранные индивиды, так и с коррозионно-регенерационной поверхностью. На поверхности карбонатов наблюдаются микровыделения пирита, барита, почки и пленки гидроксидов железа и марганца.

Проба 2. Аугигенный кальцит из ксенолита елкинской пачки отмечен в виде одиночных индивидов ромбоэдрического габитуса и их агрегатов в основной массе, а также друз и щеток на поверхности микротрещин. Индивиды характеризуются блочной поверхностью, вершины некоторых расщеплены.

Проба 3. Новообразованный кальцит в нижней части разреза (интервал глубин 17,4-33,0 м) аналогичен кальциту из верхней – здесь также отмечены одиночные индивиды ромбоэдрического габитуса и их агрегаты. Нередко кальцит, иногда в ассоциации с пинакоидами и ромбоэдрами доломита, формирует друзья и щетки на стенках трещин и поверхности обломков пелитоморфного известковистого доломита и известковистой глины. Доломит также отмечен в виде небольших (до 50-70 мкм) сферул блочного строения. Границы кристаллов карбонатов осложнены ростовыми (блочность, расщепление) и коррозионными элементами. Аксессорные минералы представлены микровыделениями

пирита и барита, ажурными пленками гидроксидов железа. На поверхности карбонатов отмечены многочисленные микровыделения и кристаллы барита (с примесью стронция до 21,95 ат.%), реже пленки и почковидные образования гидроксидов железа и марганца.

Проба 4. Аутигенный кальцит из глинисто-древесных отложений карстовой полости (интервал глубин 33,0-38,3 м) отмечен в виде друз и щеток на поверхности обломков и оолитов доломита. Последний нередко перекристаллизован и представлен мелкозернистым агрегатом кристаллов ромбоэдрического габитуса. Среди акцессорных минералов этой зоны отмечен лишь барит, в составе которого обнаружена примесь стронция (до 3,08 ат. %).

Пробы 5 и 6 отобраны из коренного массива: верхнего и нижнего доломитовых прослоев неволинской пачки.

Верхний доломитовый прослой сложен тонкослоистой до массивной пелитоморфной породой, дезинтегрированной до древесно-щебнисто-пелитового материала. В пределах слоя отмечены участки, где доломит представлен массивной мелкозернистой породой (проба 5), характеризующейся присутствием полостей, стенки которых инкрустированы ромбоэдрами (до 1 мм) кальцита, реже доломита. Основная масса породы сложена ромбоэдрами доломита (до 10 мкм) с небольшими реликтовыми участками исходного пелитоморфного известковистого доломита [8]. Среди карбонатов отмечены как гладкогранные индивиды, так и осложненные ростовыми (блочность, футляровидная структура), регенерационными и коррозионными элементами. На поверхности доломита встречены розетковидные агрегаты гипса, ажурные корочки флюорита, глобулы гидроксидов железа и примазки гидроксидов марганца, состав которых отвечает формуле асболана:
 $(\text{Ni}_{0-0,05}\text{Co}_{0,58-0,64})\text{Mn}_{1,34-1,42}(\text{O},\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Среди акцессорных минералов отмечены крупные (до 0,5 мм) индивиды целестина призматического габитуса и пластинчатые кристаллы гипса.

Нижний прослой в верхней части представлен тонкослоистым пелитоморфным известковистым доломитом, в подшве которого зафиксированы строматолитоподобные постройки (до 40-45 см). Ниже по разрезу доломит приобретает массивную текстуру и оолитовую структуру. Оолиты имеют размер 1-1,2 мм и характеризуются концентрическим строением (от 5 до 12 слоев). В качестве цемента на отдельных участках выступает пелитоморфный доломит, а на других – пойкилитовый гипс. Иногда здесь фиксируются участки, где доломит характеризуется высокой пористостью и кrustификационным кальцитовым цементом (проба 6). Оолиты, практически во всех случаях пористые за счет выщелачивания известковой составляющей [8], сложены пинакоидальными индивидами, иногда футляровидного строения. Внутри и на поверхности оолитов нередко присутствуют более крупные пинакоидальные индивиды доломита, ромбоэдры кальцита, дипирамидальные кристаллы кварца, пойкилокристаллы целестина и гипса. В составе последнего зафиксированы реликты ангидрита и микровыделения флюорита и целестина. Заканчивается нижний доломитовый прослой тонко-, среднеслоистой пелитоморфной породой, отдельные прослои которой насыщены оолитами (до 0,2-0,5 мм) концентрического строения: пелитоморфное ядро (иногда с включениями гипса) и тонкая оболочка. В нижней части слоя отмечаются небольшие линзы, реже гнезда и отдельные желваки (до 1,5 см) мелкозернистого гипса [5].

Характеристика карбонатного материала из Кунгурской ледяной пещеры

Для исследования минералообразования в пещере были отобраны 6 проб (рис. 2). Три из них взяты из глинистых отложений под органными трубами (пробы 7-9) в различных климатических зонах, другие – с поверхности наледи (проба 10), из периодически затапливаемых глинистых

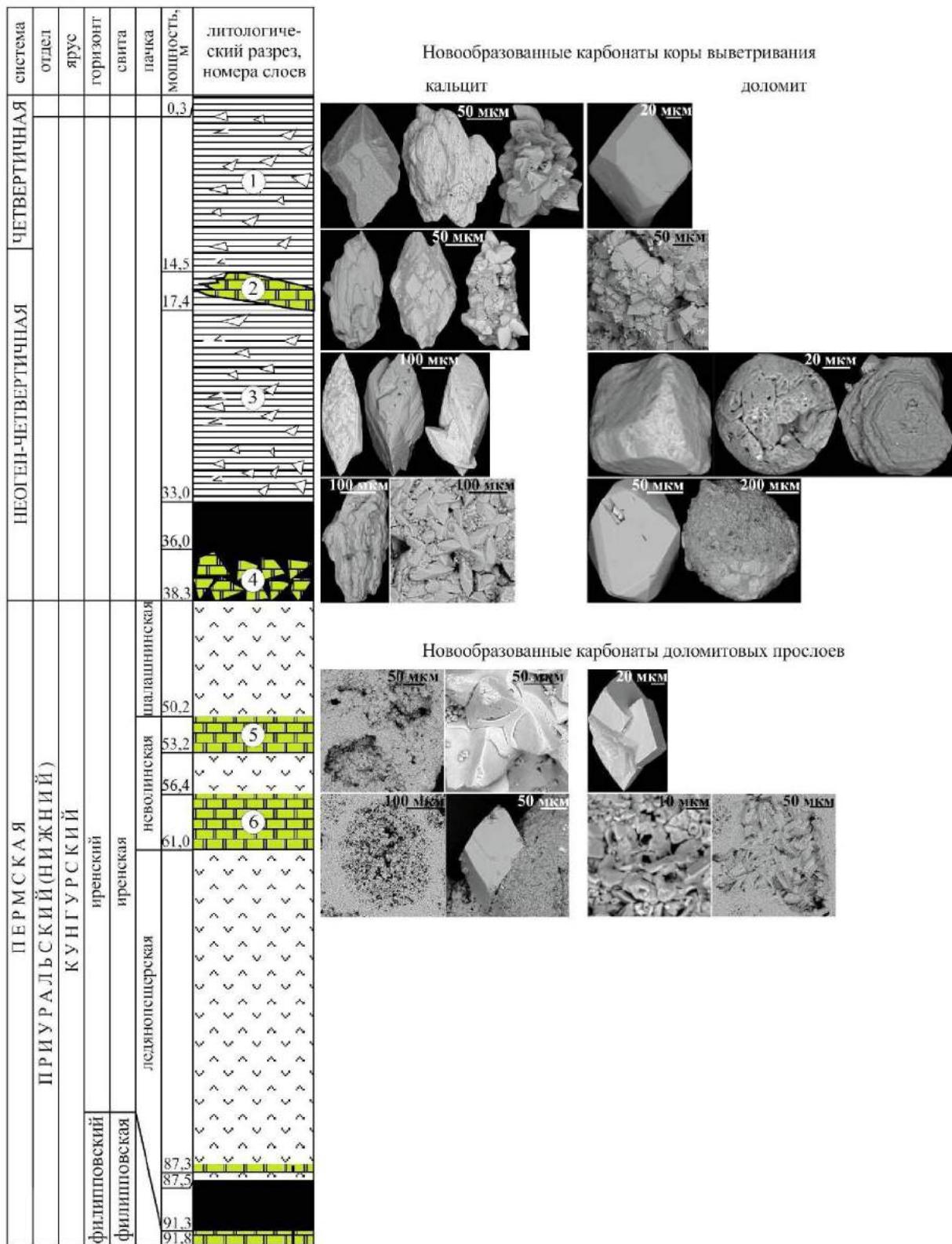


Рис. 1. Морфология новообразованных карбонатов в разрезе «Ледяная гора» (по скв. № 4443)

отложений (проба 11) и с поверхности подземного озера (проба 12).

Пробы 7-9. Материал отбирался в проходе Полярный-Данте (холодная зона), в проходе Крестовый-Руины (переходная

зона), в гроте Эфирный (теплая зона) [4]. Отложения осыпей под устьями органных труб представлены глинистым материалом с обломками сульфатных и карбонатных пород из ледянопещерской и неволинской пачек. Изучение новообразованных фаз показало, что они представлены кальцитом и очень редко доломитом. Для кальцита характерен близкий набор морфологических типов кристаллов. Это ромбоэдрические (нормальные) кристаллы, относительно непрозрачные кремовые, более острые бесцветно-желтоватые и

острые бесцветные. В холодной зоне количество новообразованных карбонатов минимально: в основном присутствуют единичные индивиды с расщепленной поверхностью. В осыпи теплой зоны кроме отдельных кристаллов и сростков отмечаются также более сложные конкрециевидные агрегаты и корочки, а в переходной – брекчевидные агрегаты с новообразованным кальцитовым цементом. В осыпи переходной зоны зафиксированы

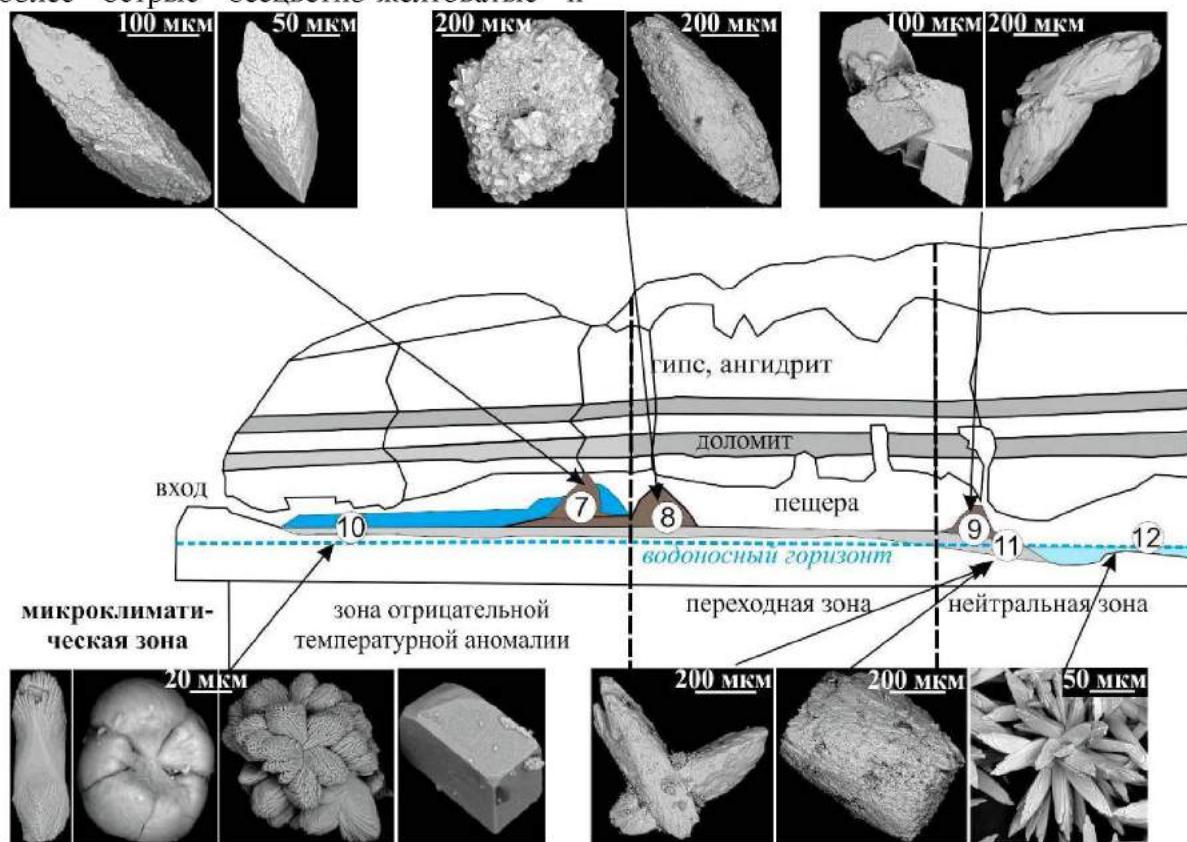


Рис. 2. Морфология новообразованных карбонатов из льда, провально-осыпных конусов и озер в различных микроклиматических зонах Кунгурской Ледяной пещеры

отдельные индивиды кальцита с регенерированной поверхностью и футляровидный доломит, что может говорить о наибольшей активности проявившихся здесь минералообразующих процессов.

Проба 10. Специфическим образованием холодной зоны Кунгурской ледяной пещеры является так называемая криогенная мука, сложенная микрокристаллами (20-60 мкм), которые формируются при вымораживании поступающих в пещеру

сульфатно-кальциевых вод [1]. Кристаллизация криогенных минералов происходит в зоне отрицательной температурной аномалии в тонкой пленке воды в теплое время года, а накопление «муки» – при высвобождении из льда при его испарении в зимний период. «Мука» в основном представлена кристаллами гипса (95-97 об.%), на кальцит, доломит и целестин приходится не более 3-5 об.%. Кальцит представлен в основном расщепленными

ромбоэдрами и сферолитами, а доломит – кристаллами, образованными гранями тупого ромбоэдра и пинакоида.

Проба 11 отобрана в проходе между гротами Центральный и Колизей (теплая зона) из пещерного сухого грунта существенно глинистого состава (песок – 5 об. %, дресва – 5 об. %), который в периоды максимальных паводков затапливается. Кроме обломков гипса, доломита и аргиллита здесь зафиксированы стяжения гидроксидов марганца и кристаллы кальцита. Последние имеют бочонковидную форму и образованы гранями острого ромбоэдра и пинакоида. Кальцит также отмечен в виде корочек (головки кристаллов ориентированы внутрь) на обломках гипса и отдельных кристаллов и их сростков на корродированной поверхности реликтового гипса.

Проба 12. Кальцит был зафиксирован и на поверхности озера в гроте Близнешы (теплая зона), где он слагает плавающие пленки (*raft* – по [16]). Он представлен друзовидным агрегатом острых ромбоэдрических кристаллов кальцита, ориентированных вершинами вниз. Отмечено, что более крупные из них приурочены к краевым частям минеральных корок. Изредка на наружной стороне минеральных пленок в гнездах между кристаллами кальцита отмечаются целестин, доломит, гипс и

галлит [4, 12]. Формирование агрегатов на поверхности озер свидетельствует о том, что пересыщение и минералообразование происходит только в поверхностном слое воды при испарении.

Химический и изотопный состав новообразованных карбонатов

Химический анализ новообразованных карбонатов (и кальцита, и доломита) коры выветривания (рис. 3, в) показал, что их состав отвечает теоретической формуле. Незначительная примесь магния (до 2,01 ат. %) и железа (до 1,72 ат. %) отмечена лишь во вторичном кальците из первой пробы. В отличие от них новообразованные карбонаты из глинисто-дресвяных отложений карстовой полости (проба 4) показывают вариацию состава (рис. 3, б). Так содержание магния и железа в кальците достигает 11,68 и 1,02 ат. % соответственно, а кальция и железа в доломите – 43,15–63,12 и 1,05 ат. %. Вторичные карбонаты неволинской пачки (пробы 5 и 6) по составу могут быть разделены на три группы (рис. 3, г): существенно доломитовые, кальцитовые (в том числе высокомагнезиальные) и сидеритовые (сидерит-доломитовые и сидерит-анкеритовые).

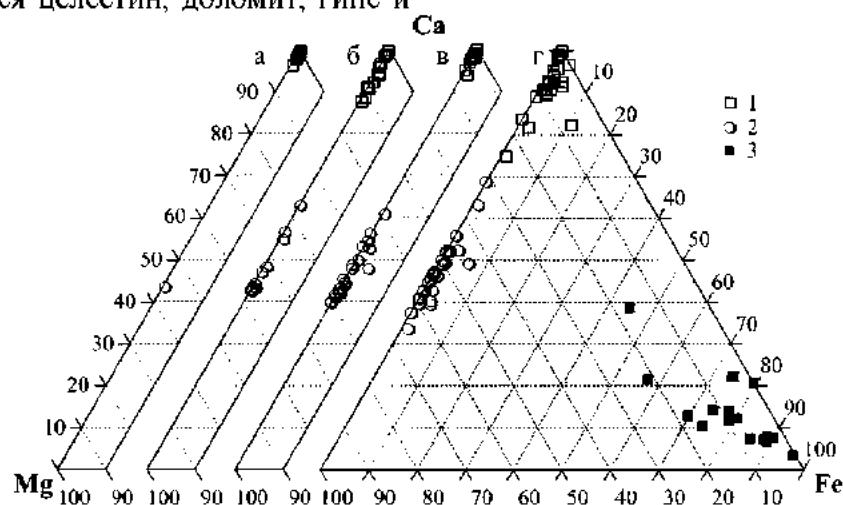


Рис. 3. Соотношение Mg-Ca-Fe в карбонатах из аккумуляционных конусов, криогенной муки и кальцитовых озерных пленок (а), карстовой полости в шалашинской пачке (б), коры выветривания (в) и прослоев оолитового доломита неволинской пачки (г) (ат. %): 1 – существенно кальцитовые; 2 – доломитовые; 3 – сидеритовые

Локальный химический анализ карбонатов из различных климатических зон Кунгурской пещеры показал незначительное количество примесей (рис. 3, а).

Анализ незатронутых процессами гипергенеза известковистых доломитов иренской и филипповской свит показал, что изотопный состав их кислорода отличается от современных и более древних эвапоритов и находится в соответствии с глобальной тенденцией утяжеления от докембрия до четвертичного периода. Исследованные доломиты по изотопному

составу отвечают составу карбонатов пермского цехштейнового бассейна Западной Европы [7].

Вторичный кальцит из коры выветривания отличается от первично-осадочных карбонатов (рис. 4) более легким составом углерода (от -3,0 до -6,9‰) и кислорода (-10,5±11,4‰). Для новообразованных карбонатов из аккумуляционных конусов под устьями органических труб в Кунгурской ледяной пещере прослеживается та же за-

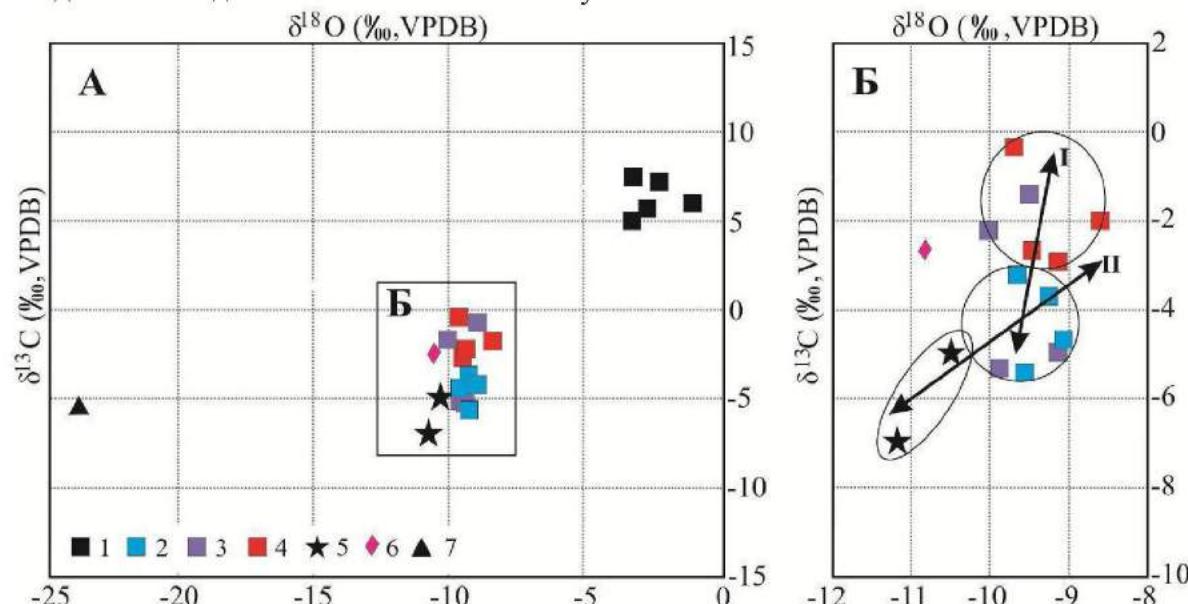


Рис. 4. Изотопный состав первично-осадочных и вторичных карбонатов Ледяной горы: 1 – первично-осадочные известковистые доломиты кунгурского яруса нижней перми [7]; 2-4 – новообразованный кальцит из осыпей Кунгурской ледяной пещеры (зоны: 2 – холодная; 3 – переходная; 4 – теплая); 5 – кальцит из коры выветривания [7]; 6 – кальцитовая пленка с поверхности озера; 7 – карбонат из криогенной муки грота Полярный. Стрелочками показаны вариации изотопного состава карбонатов, связанные с микроклиматической зональностью пещеры (I) и положением в разрезе (II)

кономерность: $\delta^{13}\text{C}$ изменяется от -0,5 до -7,7‰, а $\delta^{18}\text{O}$ – -8,7±-10,4‰. Выявленные признаки позволяют предполагать, что кристаллизация вторичного кальцита в пещере и коре выветривания происходит одинаково. Питающим раствором являются инфильтрационные изотопно-легкие (атмогенные) воды, проходящие через почвы, содержащие органическое вещество и обогащенные ^{12}C по сравнению с первично-осадочной породой. Утяжеление изотопного состава кислорода карбо-

натов из пещерных отложений по сравнению с карбонатами коры выветривания может свидетельствовать о происходящем при инфильтрации атмосферных вод фракционировании.

Анализ изотопного состава карбонатов из осыпей различных микроклиматических зон Кунгурской ледяной пещеры позволил установить, что в теплой зоне $\delta^{13}\text{C}$ изменяется от -0,5 до -3,0‰, а в холодной – от 3,3 до -5,1‰. Изотопный состав каль-

цита в переходной зоне близок к карбонатам как теплой, так и холодной зон.

Кальцитовые пленки с поверхности озер в теплой зоне сопоставимы ($\delta^{13}\text{C}=-2,8\text{\textperthousand}$, $\delta^{18}\text{O}=-10,8\text{\textperthousand}$) с обычными натечными образованиями пещер [18], связанных с разложением гидрокарбоната и испарением CO_2 .

Состав криогенного кальцита ($\delta^{13}\text{C}=-5,5\text{\textperthousand}$, $\delta^{18}\text{O}=-23,7$) из холодной зоны Кунгурской ледяной пещеры резко отличается от состава кальцита из осипей и коры выветривания. Исследование процессов карбонатного минералообразования в условиях криогенеза позволило выявить два тренда фракционирования [18]. Первый характеризуется ростом содержания ^{13}C при почти постоянном значении $\delta^{18}\text{O}$ и реализуется при быстрой (шоковой) кристаллизации и фракционировании подвижного ^{12}C в углекислый газ. Здесь главным фактором является кинетический, связанный с быстрым удалением CO_2 и неравновесным испарением воды. Замораживание происходит настолько быстро, что фракционирование изотопов кислорода между водой и льдом не происходит.

Второй тренд определяется невозможностью дегазации CO_2 , если на поверхности водоема существует ледяная корка. В кристаллической структуре льда происходит фиксация тяжелого изотопа кислорода ^{18}O , а в остаточных растворах, из которых происходит кристаллизация карбонатов, остается изотопно-легкий кислород [18]. Обогащенность карбонатной муки легким изотопом может быть связана с медленным замерзанием растворов внутри льда. Однако схожее изотопное диспропорционирование может быть также результатом массовой кристаллизации из растворов гипса, связывающего тяжелый изотоп ^{18}O .

Заключение

Изучение структурно-вещественного строения карбонатов в разрезе карбонатно-сульфатного массива Ледяная гора показало, что в процессе гипергенеза они испытывают структурно-вещественные

изменения. В результате взаимодействия первично-осадочных известковистых доломитов неволинской пачки с насыщенными сульфат-ионом инфильтрационными водами происходят выщелачивание известковой составляющей, перекристаллизация доломита и переотложение элементов, находившихся ранее в виде изоморфной примеси и собственных минеральных фаз (сидерит, целестин, барит, гидроксиды железа и марганца и др.) [8]. Присутствие минералов железа и марганца с различной степенью окисления (карбонаты и гидроксиды) свидетельствует о неравновесности условий, в которых проходило изменение исходных пород.

Химический анализ новообразованных карбонатов позволил показать, что их состав определяется положением в разрезе. Так, вторичные карбонаты из коры выветривания, характеризующейся активным проявлением процессов выщелачивания, не содержат примесей. Карбонаты из нижележащей карстовой полости в кровле шалашинской пачки и доломитовых прослоев неволинской пачки отличаются значительными вариациями состава (Ca, Mg, Fe), что дает основание сопоставлять их с зоной вторичного обогащения, реализуемой на карбонатном барьере. Существенное преобладание в верхней части коры выветривания более легкорастворимого кальцита, а не доломита, как в корах выветривания Казаковской горы [13] и Шубинского месторождения [9], позволяет предполагать, что новообразованные минералы являются не продуктом трансформации исходного материала карбонатных пачек иренской свиты, а образуются при взаимодействии сульфатно-кальциевых вод с атмосферным или биогенным углекислым газом. О реальности такого механизма может свидетельствовать облегченный состав углерода.

Незначительное количество примесей в карбонатах из разных микроклиматических зон Кунгурской ледяной пещеры может говорить о несущественном влиянии температуры на состав новообразованных фаз. Микроклимат определяет

только активность процессов минералообразования, проявленных в морфологическом разнообразии образующихся кристаллов и агрегатов, а также вариации изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ (в теплой зоне – $-0,5\pm3,0\text{\textperthousand}$, а в холодной – $-3,3\pm-5,1\text{\textperthousand}$).

Работа выполнена в рамках программы УрО РАН № 15-18-5-16 «Экстремальные (гологенные и криогенные) процессы в геологической истории Урала: минеральные и геохимические индикаторы».

Библиографический список

1. Андрейчук В.Н., Галускин Е. Криогенные минеральные образования Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры. Пермь, 2001. С. 108-116.
2. Горбунова К.А. Гидратация ангидрита и сопутствующие ей явления // Карст и гидрогеология Предуралья. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1979. С. 35-41.
3. Горбунова К.А., Максимович Е.Г. Эпигенетические деформации в гипсо-ангидритовых толщах // Гидрогеология и карстование. Пермь, 1975. Вып. 7. С. 60-65.
4. Кадебская О.И. Процессы трансформации гравитационных осадков органических труб в различных микроклиматических зонах Кунгурской Ледяной пещеры // Стратегия и процессы освоения георесурсов: матер. ежегод. науч. сессии ГИ УрО РАН. Пермь, 2010. С. 6-8.
5. Кадебская О.И., Калинина Т.А. Литологический разрез Ледяной горы // Комплексное использование и охрана подземных пространств: матер. Междунар. науч.-практ. конф. ГИ УрО РАН. Пермь, 2014. С. 42-49.
6. Кадебская О.И., Чайковский И.И. Экологическая минералогия Кунгурской Ледяной пещеры // Вестник Горного института УрО РАН. Горное Эхо. Пермь, 2009. № 3. С. 28-37.
7. Калинина Т.А. Изотопный состав эвапоритов Пермского Прикамья и продуктов их выветривания // Виртуальные и реальные литологические модели: матер. Всерос. школы по литологии / ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 2014. С. 67-69.
8. Калинина Т.А. Структурно-текстурная и минералогическая характеристика пород Кунгурской Ледяной пещеры и их трансформация при карстообразовании // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: сб. науч. ст./ Перм. гос. ун-т. Пермь, 2013. Вып. 16. С. 201-208.
9. Калинина Т.А., Чайковский И.И. Минералогия коры выветривания на Шубинском месторождении // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: сб. науч. ст. / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2012. Вып. 15. С. 106-114.
10. Печеркин А.И. Геодинамика сульфатного карста. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1986. 170 с.
11. Чайковский И.И., Кадебская О.И. Минеральные образования пещеры Еранка на Северном Урале // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: сб. науч. ст. Пермь, 2014. Вып. 17. С. 92-107.
12. Чайковский И.И., Кадебская О.И., Калинина Т.А. Минералогия пленок на поверхности водоемов Кунгурской Ледяной пещеры // Кристаллическое и твердое некристаллическое состояние минерального вещества: матер. минералог. сем. с междунар. участием. Сыктывкар, 2012. С. 346-348.
13. Чайковский И.И., Кадебская О.И., Чиркова Е.П. О гипергенной природе флюоритового оруденения Казаковской горы // Вестник недропользователя Пермского края. Природные ресурсы. Пермь, 2010. № 2 (29). С. 83-91.
14. Encyclopedia of caves and karst science / edited by John Gunn. New York, 2004. 1940 p.
15. Ford D.C., Williams P.W. Karst hydrogeology and geomorphology. Chichester: John Wiley and Sons, 2007. 565 p.
16. Hill C., Forti P. Cave minerals of the World. Huntsville, 1997. 480 p.
17. Panos V. Genetic features of a specific type of the karst in the centrale european climate morphogenetic area // Probl. Speleol. Res. Intern. Speleol. Confer. Praha, 1965. P. 11-23.
18. Zak K., Richter D.K., Filippi M., Zivov R., Deininger M., Mangini A., Scholz D. Coarsely crystalline cryogenic cave carbonate – a new archive to estimate the Last Glacial minimum permafrost depth in Central Europe // Climate of the Past. 2012. № 8. P. 1-17.

Isotopy and Morphology of the Newly Formed Carbonates of the Ledynaya Gora Carbonate-sulfate Massif

O. I. Kadebskaya, T.A. Kalinina, I.I. Chaykovskiy

Mining Institute of Ural Branch of the Russian Academy of Science. 78A Sibirskaya Str., Perm 614007, Russia. E-mail: icecave@bk.ru

The morphology, isotope, and chemical composition of newly formed carbonates of the Ledynaya Gora carbonate-sulfate massif in various microclimatic zones of the Kungur Ice Cave are considered. It was found that composition of newly formed carbonates is influenced by their location in the geological section. In weathering crust they are characterized by lack of impurities, but, below, they demonstrate the variation in composition. It allows associating them with the secondary enrichment zone related to a carbonate barrier. Calcite prevalence at the top of weathering crust allows assuming that newly formed minerals are not a transformation product of basic material of the carbonate member of the Iremsky Suite and formed due to interaction of sulfate-calcium waters with atmospheric or biogenic carbon dioxide. Studying of newly formed carbonates from different microclimatic zones of the Kungur Ice cave showed that temperature does not affect the composition of newly formed minerals, and influences only their morphology and variations of carbon isotope composition.

Key words: *Perm Region; evaporates; hyper genesis; cryogenesis; isotopy.*

References

1. Andrejchuk V.N., Galuskin E. 2001. Kriogennye mineralnye obrazovaniya Kungurskoy ledyanoy peshchery [Cryogenic minerals of the Kungur Ice Cave]. In Peshchery. Perm. pp. 108-116. (in Russian)
2. Gorbunova K.A. 1979. Gidratatsiya angidrita i sопутствующие ей явления [Anhydrite hydration and associated phenomena]. In Karst i gidrogeologiya Preduralya. Sverdlovsk: UNTS AN SSSR. pp. 35-41. (in Russian)
3. Gorbunova K.A., Maksimovich E.G. 1975. Epigeneticheskie deformatsii v gipso-angidritovykh tolshchakh [Epigenetic deformation in gypsum-anhydrite massif]. In Gidrogeologiya i karstovedenie. Perm, 7: 60-65. (in Russian)
4. Kadebskaya O.I. 2010. Protsessy transformatsii gravitatsionnykh osadkov organicheskikh trub v razlichnykh mikroklimaticheskikh zonakh Kungurskoy Ledyanoy peshchery [Transformation processes in organ pipe gravitational deposits from various microclimatic zones of the Kungur Ice Cave]. In Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov. Perm. pp. 6-8. (in Russian)
5. Kadebskaya O.I., Kalinina T.A. 2014. Litologicheskiy razrez Ledyanoy gory [Lithological cross-section of the Ledyanaya Gora]. In Kompleksnoe ispolzovanie i okhrana podzemnykh prostranstv. Perm. pp. 42-49. (in Russian)
6. Kadebskaya O.I., Chaykovskiy I.I. 2009. Ekologicheskaya mineralogiya Kungurskoy Ledyanoy peshchery [Ecological mineralogy of the Kungur Ice Cave]. In Gornoe Echo: Vestnik GI UrO RAN, 3: 28-37. (in Russian)
7. Kalinina T.A. 2014. Izotopnyy sostav evaporitov Permskogo Prikamya i produktov ikh vvetrivaniya [Isotope composition of the Perm Prikamye evaporites and products of their weathering]. In Virtualnye i realnye litologicheskie modeli. Ekaterinburg, pp. 67-69. (in Russian)
8. Kalinina T.A. 2013. Strukturno-teksturnaya i mineralogicheskaya kharakteristika porod Kungurskoy Ledyanoy peshchery i ikh transformatsiya pri karstoobrazovaniyu [The structural-textural and mineralogical characteristics of rocks of the Kungur Ledyanaya peshchery and their transformation during karst formation]. In Geologicheskaya ekspeditsiya po Kungurskoy Ledyanoy peshchere. Perm. pp. 10-12. (in Russian)

- tural, textural and mineralogical characteristic of the Kungur Ice Cave rocks and their transformation due to karstification]. In Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Perm. 16: 201-208. (in Russian)
9. Kalinina T.A., Chaykovskiy I.I. 2012. Mineralogiya kory vyvetrivaniya na Shubinskem mestorozhdenii [Mineralogy of the weathering crust in the Shubino deposit]. In Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Perm. 15: 106-114. (in Russian)
10. Pecherkin A.I. 1986. Geodinamika sulfatnogo karsta [Geodynamics of the sulphate karst]. Irkutsk: Izd. Irkut. univ. p. 170. (in Russian)
11. Chaykovskiy I.I., Kadebskaya O.I. 2014. Mineralnye obrazovaniya peshchery Yeranka na Severnom Urale [Mineral formations of the Yeranka Cave (Northern Urals)]. In Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Perm. 17: 92-107. (in Russian)
12. Chaykovskiy I.I., Kadebskaya O.I., Kalinina T.A. 2012. Mineralogiya plynok na povrkhnosti vodoemov Kungurskoy Ledyanoy peshchery [Mineral films on the surface of the Kungur Ice Cave lakes]. In Kristallicheskoe i tverdoe nekristallicheskoe sostoyanie mineralnogo veshchestva. Syktyvkar. pp. 346-348. (in Russian)
13. Chaykovskiy I.I., Kadebskaya O.I., Chirkova E.P. 2010. O giperogennoy prirode flyuoritovogo orudieniya Kazakovskoy gory [About the hypogene nature of a fluorite mineralization of the Kazakovskaya Gora]. In Prirodnye resursy: Vestnik nedropolzovatelya Permskogo kraja. Perm. 2 (29): 83-91. (in Russian)
14. Encyclopedia of caves and karst science 2004. New York. p. 1940.
15. Ford D.C., Williams P.W. 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. Chichester, John Wiley and Sons, p. 565.
16. Hill C., Forti P. 1997. Cave minerals of the World. Huntsville. p. 480.
17. Panos V. 1965. Genetic features of a specific type of the karst in the centrale european climate morphogenetic area. In Probl. Speleol. Res. Intern. Speleol. Conf. Praha. pp. 11-23.
18. Zak K., Richter D.K., Filippi M., Zivor R., Deininger M., Mangini A., Scholz D. 2012. Coarsely crystalline cryogenic cave carbonate – a new archive to estimate the Last Glacial minimum permafrost depth in Central Europe. In Climate of the Past, 8: 1821-1837. doi:10.5194/cp-8-1821-2012

УДК 552.5

Комплексная методика исследования нефтесодержащих горных пород

К.П. Казымов, А.Н. Багаев, В.М. Жданов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: mineral@psu.ru

(Статья поступила в редакцию 4 апреля 2015 г.)

Развитие современных аппаратных и программных средств исследования природных объектов открывает перед исследователями различных областей фундаментальной и прикладной геологии широкие возможности для разработки качественно новых методик анализа вещественного состава горных пород, изучения их физико-химических характеристик с последующим созданием цифровых моделей исследуемых объектов. Описана комплексная методика исследования нефтесодержащих горных пород, которая позволила совместить стандартные методы исследования пород-коллекторов (макроскопические, оптические, определение пористости и фильтрационных свойств методом прокачки и т.п.) с новейшими методами исследования на сканирующем электронном микроскопе, рентгеновском томографе высокого разрешения (до 3 мкм), термоанализаторе и т.п. Предложена цифровая модель образцов карбонатного и терригенного состава, по своим характеристикам отвечающая исходным. Критерием истинности разработанных моделей явились данные петрофизических исследований, полученные прямым экстрагированием, с определением открытой пористости и проницаемости по газу. Разработанные модели позволяют прогнозировать интенсивность протекания различных процессов как природного характера, так и связанных с деятельностью человека.

Ключевые слова: коллекторы нефти и газа, рентгеновский томограф, компьютерное моделирование, пористость и проницаемость.

DOI: 10.17072/psu.geol.27.17

При исследовании горных пород использовано новейшее программное обеспечение для комплексного анализа физико-химических свойств пород-коллекторов с последующей разработкой математических моделей, характеризующих соотношение «матрикс – поровое пространство» для каждого конкретного образца с возможностью дальнейшего использования полученных результатов в прикладной нефтяной геологии. К ним могут быть отнесены модели резервуаров, оценки фазовой проницаемости, разра-

ботка методики воздействия на пласт-коллектор и т.д.

Были исследованы 30 стандартных образцов керна диаметром 30 мм и высотой 30 мм из скважин двух нефтяных месторождений Пермского края, из них – 15 образцов карбонатного состава (известняки) и 15 образцов терригенных горных пород.

Алгоритм проведения исследований представляет собой последовательное выполнение минералого-петрографических, термогравиметрических, электронно-микроскопических, рентгеноструктурных и

рентгено-томографических исследований, результаты которых обрабатывались программой «Анализатор фрагментов микроструктуры твердых тел» в конфигурации «SIAMS FC» («SIAMS», Россия).

Макро - и микроскопическое описание шлифов позволило получить априорную информацию о минералогическом составе пород-коллекторов, типе и характере це-

ментации, процентном соотношении матрикс-цемент, оценить объем порового пространства (рис.1, 2, примеры).

Данные рентгеноструктурного и термического анализов дали возможность определить массовое соотношение основных порообразующих минералов и цементирующего материала (табл.1, 2).

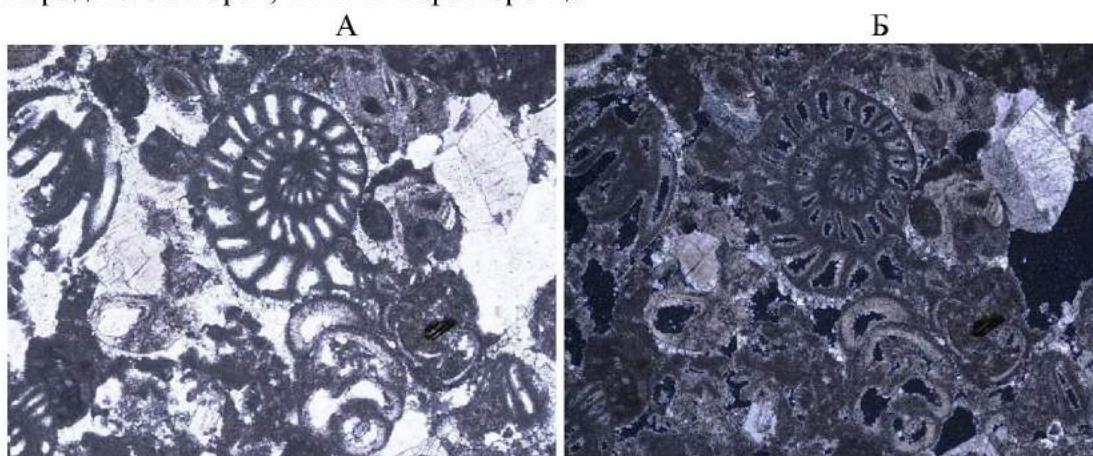


Рис. 1. Биоморфный цельнораковинный известняк (фораминиферовый): *А* – хорошо сохранившиеся крупные раковины фораминифер, на долю которых приходится более 50% площади шлифа, николи II; *Б* – то же самое в скрещенных николях (увеличение 50 \times , ширина – 2,6 мм)



Рис. 2. Шлиф № 136309. Песчаник полевошпат-кварцевый: *А* – трещинки заполнены битуминозным веществом, наблюдается единичное зерно амфибола, один николь; *Б* – скрещенные николи (увеличение 50 \times , ширина – 2,6 мм)

Использование сканирующего электронного микроскопа с ЭДС приставкой позволило определить размеры и морфологию пор, минеральный состав цемента, оценить «чистоту» внутренней поверхности порового пространства, диагностировать минеральный состав, структуру образований на стенках пор. Результаты элек-

тронно-сканирующей микроскопии позволяют оценить размеры пор и наличие или отсутствие вторичных новообразований. Полученные результаты были использованы при калибровке векторной модели терригенных образцов в процессе обработки материалов томографических исследований (рис. 3, 4; табл. 3).

Таблица 1. Минеральный состав фаз терригенных образцов, мас. %

№ п/п	№ об-разца	Кварц	Калиевый полевой шпат	Каолинит	Гидрослюда	Кальцит	Доломит	Сидерит	Пирит	Сумма
1	136285	89,9	-	-	-	-	-	-	10,1	100
2	136304	79,8	3,3	-	-	5,8	-	11,1	-	100
3	136309	100,0	-	-	-	-	-	-	-	100
4	136322	85,1	6,9	2,9	2,5	-	-	2,6	-	100
5	136325	100,0	-	-	-	-	-	-	-	100
6	136328	100,0	-	-	-	-	-	-	-	100
7	136329	100,0	-	-	-	-	-	-	-	100
8	136334	92,0	3,8	0,9	3,3	-	-	-	-	100
9	136337	81,6	5,4	1,7	1,1	8,2	-	2,0	-	100
10	136340	92,3	-	-	-	-	-	7,2	0,5	100
11	136342	96,6	-	3,4	-	-	-	-	-	100
12	136343	93,9	-	2,9	3,2	-	-	-	-	100
13	136345	86,5	-	1,1	-	7,1	-	-	5,3	100
14	136347	94,4	-	3,2	-	-	-	-	2,4	100
15	136350	56,9	4,0	-	-	3,4	35,7	-	-	100

Таблица 2. Минеральный состав карбонатных образцов, мас. %

№ п/п	№ цилиндра	Кальцит	Доломит	Кварц	КПШ	Сумма
1	139455	98,2	-	1,8	-	100
2	139458	95,6	-	4,4	-	100
3	139461	95,9	1,7	2,4	-	100
4	139463	95,8	-	3,5	0,7	100
5	139464	97,1	-	2,9	-	100
6	139466	95,9	-	4,1	-	100
7	139471	95,2	-	4,8	-	100
8	139472	96,7	1,9	1,4	-	100
9	139481	98,5	-	1,5	-	100
10	139482	96,2	-	3,8	-	100
11	139483	90,6	7,7	1,7	-	100
12	139487	92,4	4,3	3,3	-	100
13	139497	71,2	27,2	1,6	-	100
14	139506	93,2	4,3	2,5	-	100
15	139508	81,8	16,2	2,0	-	100

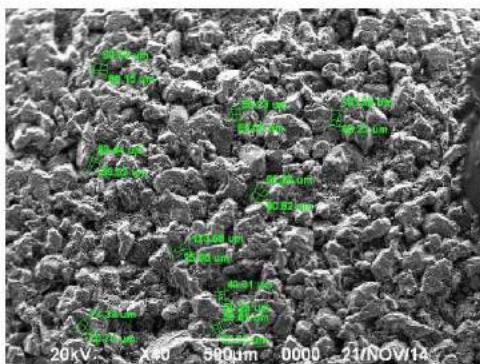


Рис. 3. Распределение пор по торцевой поверхности цилиндра (обр. № 136309)

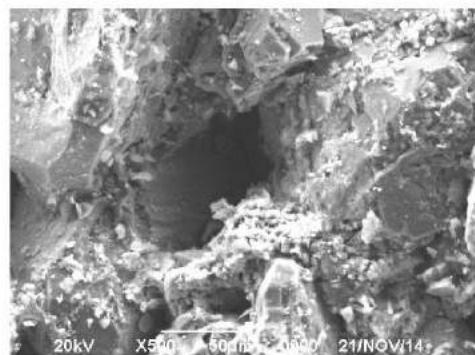


Рис. 4. Внутреннее строение поры (обр. № 136309)

Таблица 3. Химический состав минералов цемента, масс. %

№ об-разца	Минерал	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	FeO	CO ₂	CaO	Сум-ма
136329	Каолинит	0.43	18.05	76.42	1.99	2.05	1.07	-	-	100,01
136334	Каолинит	-	11.53	76.27	12.2	-	-	-	-	99,82
	Опал	-	1.46	98.36	0.19	-	-	-	-	100,04
136340	Каолинит	-	14.08	73.83	11.92	-	0.18	-	-	100,01
136350	Кальцит	16.48	0.62	6.15	0.15	-	1.03	32.79	42.78	100,00

Таблица 4. Элементный состав цемента образца, масс. %

№ обр.	Минерал	O	Mg	Al	Si	S	K	Ti	Fe	Сум-ма
136340	Пирит с глиной	40.47	0.37	3.18	6.10	31.32	1.00	0.18	16.81	100,0

Данные термогравиметрического анализа уточняют и подтверждают с высокой степенью достоверности результаты рентгенофазового, минералого-петрографического, электронно-микроскопического и микрозондового анализов. Были установлены особенности фазового состояния кальцита в известняках (фазовый переход кальцит-доломит, кальцит-магнезит), количественно и качественно диагностирован карбонатный цемент в терригенных породах. Применение томографа позволяет получить объемную растровую модель образца. Использован оригинальный математический алгоритм анализа растрового изображения в комплексе с данными

микроописания образцов, результатов электронносканирующей микроскопии, фазового состояния вещества и т.д., разработаны векторные (сетевые) модели для каждого образца керна.

С использованием методики обработки трехмерной векторной модели образцов для каждого из 15 образцов карбонатных пород была составлена цифровая модель, где были определены 2 фазы – поровое пространство и матрикс (рис. 5).

Для контроля качества определения фазового состояния использовались данные определения порового пространства по газу. Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 5.

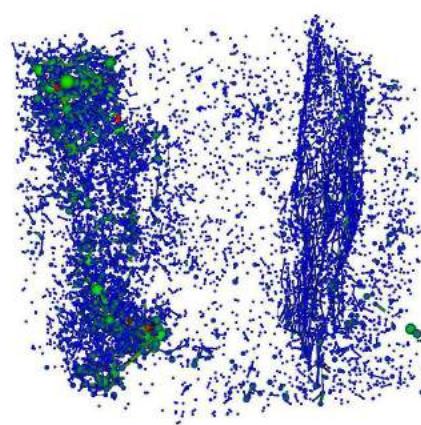
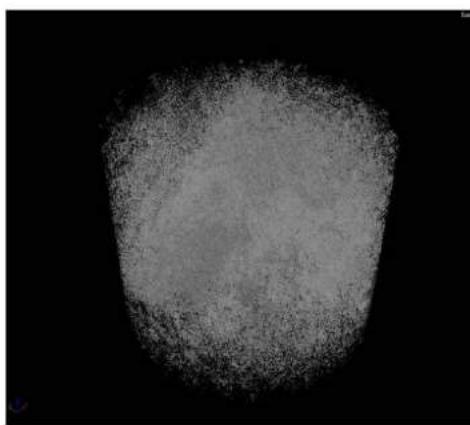


Рис. 5. Визуализация пустотного пространства образца № 139506 карбонатных пород: светлые участки – поровое пространство, матрикс не показан

Рис. 6. Фрагмент сетевой модели трещиноватой зоны образца 139506 (ребро куба 5 мм)

Таблица 5. Сравнение значений порового пространства образца, полученных лабораторными методами и в результате компьютерной томографии, %

№ п/п	№ цилиндра	Значения пористости	
		По газу	По данным компьютерной томографии
1	139455	9,5	9,38
2	139458	2,1	1,9
3	139461	7,4	8,2
4	139463	14,2	12,12
5	139464	14,3	14,08
6	139466	6,8	9,6
7	139471	13,5	15,8
8	139472	15,6	18,84
9	139481	9,8	12,22
10	139482	15,7	24,12
11	139483	8,8	9,88
12	139487	6,4	7,78
13	139497	3,7	4,1
14	139506	8,0	8,92
15	139508	7,6	11,28

Практическое применение разработанной методики имеет широкие перспективы. С помощью программного комплекса SIAMS LabDesk может быть построена сетевая модель порового пространства образца.

Суть обработки растрового изображения сводится к следующему. Каждой поре в растровой модели соответствует сфера в векторной модели, объем которой аналогичен объему поры. Каждый канал, соединяющий поры, моделируется цилин-

дром с площадью сечения, равного площади наименьшего сечения канала.

В результате обработки растровой модели создается векторная модель, пример которой представлен на рис. 6, где в правой части сетевой модели образца можно наблюдать наиболее проницаемую зону, связанную с трещиной, рассекающей весь образец. Центральная часть образца является наименее проницаемой. Левая часть сетевой модели отражает внутриформен-

ные связанные поры органогенного происхождения

В настоящий момент группой учёных из ООО «СИАМС» г. Екатеринбург разрабатывается программное обеспечение для расчёта относительной фазовой проницаемости (ОФП) с использованием векторной модели и данных комплексного минералогического исследования пород-

коллекторов (рис. 7). Исходный материал для расчётов ОФП был получен сотрудниками кафедры минералогии и петрографии ПГНИУ в результате комплексного исследования образцов горных пород, предоставленных ПермНИПИнефть. Следует отметить, что результаты расчёта ОФП требуют верификации утверждёнными методиками.

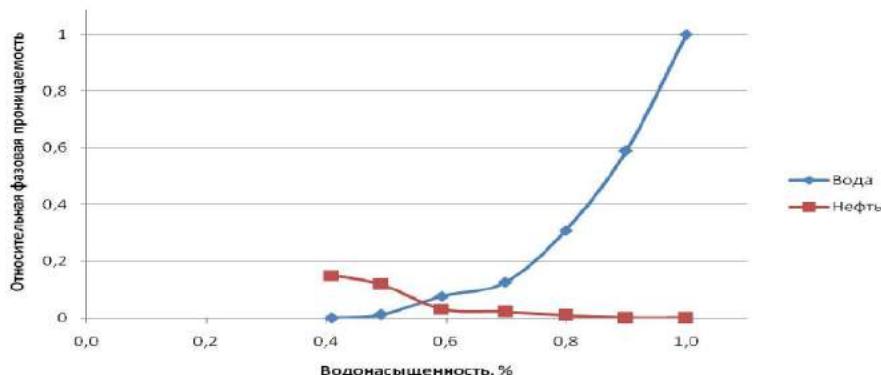
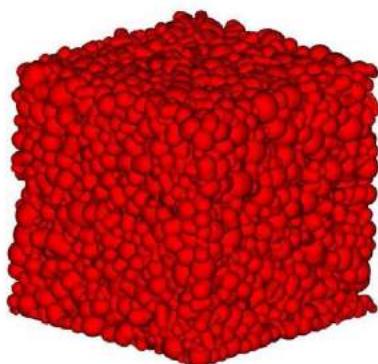


Рис. 7. Относительная фазовая проницаемость образца № 136342

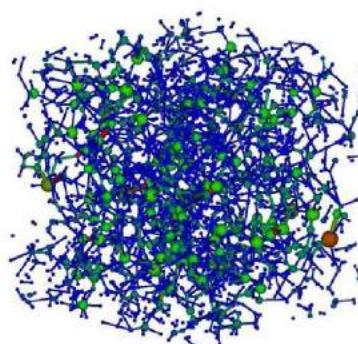
Для образцов, сложенных тонкодисперсным материалом, где размер пор и каналов слишком мал для разрешения томографа, может быть использован метод моделирования образца горной породы с использованием алгоритмов плотной упаковки несферических выпуклых частиц, в основу которого заложен алгоритм упаковки обломочного

материала, размер частиц которого получен методом электронной микроскопии (рис. 8).

В табл. 6 и на рис. 8 приведены расчетные параметры проницаемости по осям X, Y, Z, а также данные по относительной фазовой проницаемости смоделированного образца.



Векторная модель упаковки



Сетевая модель порового пространства

Рис. 8. Визуализация результатов моделирования упаковки несферических плотных частиц образца №136337

Таблица 7. Вычисленная закрытая пористость и абсолютная проницаемость по данным интерпретации микротомографического исследования терригенных образцов

№ п/п	Лаб. № образца	Общая пористость по 3Dмодели, %	Закрытая пористость по 3Dмодели, %	Абсолютная проницаемость по 3Dмодели, мД
1	136285	17,9	0,4	73,3
2	136304	14	4,1	1,7
3	136309	20,3	0,3	105,8
4	136322	15,6	0,9	2,4
5	136325	21,8	0,3	103,4
6	136328	21,2	0,3	249,2
7	136329	20,6	0,3	119,1
8	136334	18,1	0,3	17,8
9	136337	9	2,5	0,6
10	136340	17,1	0,6	249,8
11	136342	19,7	0,3	25,6
12	136343	16,3	0,4	4,2
13	136345	15,8	0,4	30,2
14	136347	15,5	0,6	24,0
15	136350	2,5	0,8	0,2

Таблица 6. Характеристика упаковки образца № 136337

Направление	Проницаемость, мД
Вдоль оси X	0.456
Вдоль оси Y	0.509
Вдоль оси Z	0.754

Одной из задач томографического исследования образцов являлось вычисление закрытой пористости. Для решения данной проблемы использовались несколько оригинальных специализированных программных пакетов в составе:

- SIAMS FC: Трехмерный анализатор изображений внутренней структуры твердых тел¹;
- SIAMS FC Flow: Симулятор фильтрационных процессов в пористых структурах твердых тел²;
- SIAMS FC: 3D Packing of Sphere-Polyhedra³.

В результате трехмерного и двумерного анализа получены воксельные модели поровых пространств по всем 15 образцам. Воксельные модели поровых пространств далее были преобразованы в сетевые поровые модели, по которым произведены модельные расчеты абсолютной проницаемости (табл. 7).

Дополнительно был проведен анализ томограмм стандартных образцов, полученных перед данным исследованием, на предмет наличия крупных пор, каверн и трещин. Трещины и каверны на образцах цементированы и не участвуют в фильтрации, однако на некоторых образцах (например, 136328) имеются крупные поры размером 100-200 мкм, равномерно распределенные по объему и связанные с более мелкими поровыми каналами

Выводы

Совместное использование данных томографии, рентгеноструктурного анализа, электронной спектрометрии, микроописания шлифов и электронно-зондового анализа позволило откалибровать математическую модель каждого исследуемого образца.

Созданный математический аналог (в пределах возможностей современной

¹Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014617236 от 16 июля 2014 г.

²Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014617237 от 16 июля 2014 г.

³Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2006610285 от 12января 2006 г.

приборной базы) горной породы с высокой степенью вероятности отражает реальную картину её внутреннего строения, распределения пор, каналов, их взаимосвязь, влияние минерального состава, гранулометрических характеристик, постгенетических изменений на фильтрационно-емкостные характеристики.

Математическое моделирование породы открывает широчайшие возможности практического применения полученных результатов. Данные сетевого моделирования использованы для расчета интенсивности процессов миграции флюидов различного типа (нефть, газ, вода, буровая жидкость) в пласте-коллекторе.

Результаты исследования по определению закрытой пористости пород в виде модельных расчетов в целом согласуются с экспериментальными данными и дают дополнительную информацию о закрытой пористости. Возникшие расхождения между моделью и экспериментом по оценке проницаемости связаны, в первую очередь, с различием в размерах образцов, используемых для компьютерного анализа (3-5 мм), и стандартных образцов. Крупные поры, выявленные при томографическом сканировании стандартных образцов, вносят большой вклад в проницаемость, однако на микрообразцах этот вклад незначителен.

Результаты математического моделирования позволяют рассчитать наиболее эффективные способы воздействия на пласти-коллекторы, оценить эффективность методов технологических операций по увеличению порового пространства, использовать полученные результаты при составлении моделей месторождений, определении наиболее подходящего типа буровых растворов для укрепления стенок скважин и т.д. В дальнейшем возможно на новой основе установить зависимости структурных характеристик от фациальной обстановки, прогнозировать распределение пластов-коллекторов и флюидоупоров по площади, проводить фациальное моделирование.

Работа выполнена сотрудниками Сектора наноминералогии кафедры минералогии и петрографии Пермского государственного национального исследовательского университета с использованием собственного уникального научного аналитического оборудования.

Библиографический список

1. Горбунов Н.И., Цюрюпа И.Г., Шуригина Е.А. Рентгенограммы, термограммы и кривые обезвоживания минералов, встречающихся в почвах и глинах. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 188 с.
2. Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н., Розинова Е.Л. Термический анализ минералов и горных пород. Л.: Недра, 1974. 400 с.
3. Осовецкий Б.М. Дробная гранулометрия аллювия / Перм. ун-т. Пермь, 1993. 43 с.
4. Осовецкий Б.М., Молошанова Н.Е. Литология (классификация, методы исследования, описание осадочных пород) / Перм. ун-т. Пермь, 2013. 158 с.
5. Рентгенографический количественный фазовый анализ (РКФА) глинистых минералов (каолинита, гидрослюды, монтморилонита): методические рекомендации №139 / НСОММИ ВИМС. М., 1999.
6. Рыжиков Н.И., Михайлов Д.Н., Шако В.В. Метод расчёта профилей распределения пористости и объёмных долей материалов в пористой среде с помощью анализа данных рентгеновской микротомографии // Прикладная механика. 2013. Т. 5, № 4. С. 161.
7. Экспрессный рентгенографический полу-количественный фазовый анализ глинистых минералов: методические рекомендации №68 / НСОММИ ВИМС. М., 1991.
8. Kato, Takahashi, Kawasaki and Kaneko Segmentation of multi-phase X-ray computed tomography images. <http://dx.doi.org/10.1680/envgeo.13.00036> Paper 13.00036 Received 13/05/2013; accepted 21/11/2013.
9. Schluter S., Weller U. and Vogel H-J. Segmentation of X-ray microtomography images of soil using gradient masks // Computers and Geosciences 36: 1246-1251, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2010.02.007>.

Integrated Methodology of Study of the Oil-bearing Rock

K.P. Kazymov, A.N. Bagaev, Zhdanov V.M.

Pem State University, 15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia

E-mail: mineral@psu.ru

Recent development of up-to-date instrumental tools and data processing software provides a new opportunity for working out the new methods of rock composition analysis, physico-chemical characteristics study, and further integration the obtained data for making the digital models of geological objects. In the article, we describe the integrated methodology of oil-bearing rock study, which allowed combining conventional methods of study of the reservoir rock (macroscopic, optical, etc.) with up-to-date methods of electron microscopy, X-ray tomography, and thermal analysis. The authors propose the digital model of carbonate and terrigenous samples, which have the same characteristics like the natural material. The correctness of the obtained digital models was confirmed by the petrophysical study of connected porosity and permeability to gas using direct extraction. Developed models allow making the optimal reservoir model, forecasting of the reservoir stimulation methods for increasing the oil recovery.

Keywords: *коллекторы нефти и газа; X-ray tomograph; компьютерное моделирование, porosity and permeability.*

References

1. Gorbunov N.I., Tsyuryupa I.G., Shurigina E.A. 1952. Rentgenogrammy, termogrammy i krivye obezvozhivaniya mineralov, vstrechayushchikhsya v pochvakh i glinakh [Roentgenograms, thermograms, and dehydration curves of the minerals encountered in soil and clay]. Moskva, Izd. AN, p. 188. (in Russian)
2. Ivanova V.P., Kasatov B.K., Krasavina T.N., Rozinova E.L. 1974. Termicheskiy analiz mineralov i gornykh porod [Thermal analysis of minerals and rock]. Leningrad, Nedra, p. 400. (in Russian)
3. Osovetskiy B.M. 1993. Drobnyaya granulometriya allyuviya [Fractional granulometry of alluvium]. Perm, Izd. Perm Univ., p. 43. (in Russian)
4. Osovetskiy B.M., Moloshtanova N.E. 2013. Litologiya (klassifikatsiya, metody issledovaniya, opisanie osadochnykh porod) [Lithology (classification, methods of study, description of sedimentation rock)]. Perm, PSU, p. 158. (in Russian)
5. Rentgenograficheskiy kolichestvennyy fazovyy analiz (RKFA) glinistykh mineralov (kaolinita, gidroslyudy, montmorilonita) [Roentgenographic quantitative phase analysis of clay minerals (kaolinite, illite, montmorillonite)]. Metodicheskie recommendatsii №139. NKOMMI BIMS, 1999. (in Russian)
6. Ryzhikov N.I., Mikhaylov D.N., Shako V.V. 2013. Metod rascheta profiley raspredeleniya poristosti i obyomnykh doley materialov v poristoy srede s pomoshchyu analiza danniyh rentgenovskoy mikrotomografii [Method of calculation of porosity distribution profiles and minerals bulk content in porous medium using analysis of x-ray microtomography data]. Trudy MFTI, Prikladnaya mehanika, 5 (4): 161. (in Russian)
7. Ekspressnyy rentgenograficheskiy polukolichestvennyy fazovyy analiz glinistykh mineralov [Express X-ray semi-qualitative phase analysis of clay minerals]. Metodicheskie rekommendatsii №68. NKOMMI VIMS, 1991. (in Russian)
8. Kato M., Takahashi M., Kawasaki S., Kaneko K. 2013. Segmentation of multi-phase X-ray computed tomography images. Environmental Geotechnics, doi: 10.1680/cnvgeo.13.00036.
9. Schluter S., Weller U., Vogel H-J. 2010. Segmentation of X-ray microtomography images of soil using gradient masks. Computers and Geosciences, 36: 1246-1251. doi: 10.1016/j.cageo.2010.02.00.

ГИДРОГЕОЛОГИЯ

УДК 556.32(470.54)

Гидрогеологическая характеристика разреза Аракаевской параметрической скважины

Г.Л. Беляева

ОАО «КамНИИКИГС», 614016, Пермь, ул. Краснофлотская, 15

E-mail: belka61@inbox.ru

(Статья поступила в редакцию 20 апреля 2015 г.)

Установлены границы гидрогеологических этажей и глубины залегания водоносных комплексов в разрезе Аракаевской параметрической скважины. Различными методами определен гидрохимический состав подземных вод. Учитывая большое число надвиговых дислокаций, осложняющих разрез, в комплексах выделены аллохтонные и автохтонные водовмещающие толщи.

Ключевые слова: *водоносный комплекс, поровые воды, буровой раствор, водовмещающая толща.*

DOI: 10.17072/psu.geol.27.26

В гидрогеологическом отношении участок Западно-Уральской складчато-надвиговой зоны, где пробурена Аракаевская параметрическая скважина, находится в Западно-Уральском районе подземных вод Предуральского сложного бассейна пластовых (блоково-пластовых) вод. Восточная граница Западно-Уральского района подземных вод проведена по восточной границе распространения пермских отложений, что обосновывается разной степенью литификации, а следовательно, и типом скопления подземных вод в пермских (Предуралье) и каменноугольных (Урал) отложениях [1].

Гидрогеологические комплексы рассматриваемой территории совпадают с тектоническими этажами, разделенными поверхностями углового и стратиграфического несогласия, надвигами, толщами слабопроницаемых и непроницаемых по-

род. Формированию современного тектонического строения осадочный комплекс рассматриваемой территории обязан позднегерцинским и альпийским тектоническим движениям, которые оказывали активное влияние и на гидродинамические условия водоносных комплексов.

Для района бурения Аракаевской параметрической скважины, как и для Западно-Уральской складчато-надвиговой зоны в целом, гидрогеологическая зональность и параметры пластовых вод различных стратиграфических подразделений характеризуются наличием сложных гидродинамических условий. С учетом литологических особенностей водовмещающих пород, наличия флюидоупорных глинисто-карбонатных толщ и особенностей гидрохимического разреза осадочных пород снизу вверх в районе бурения выделены следующие водонос-

ные комплексы (ВК): додевонский или рифейско-вендский терригенно-карбонатный; эмсско-тиманский или нижне-среднедевонский терригенный; верхнедевонско-турнейский карбонатный; визейский терригенный, визейско-башкирский карбонатный; московский карбонатно-терригенный водоносно-водоупорный комплекс; верхнекаменноугольный карбонатный; нижнепермский сульфатно-карбонатно-терригенный ВК, четвертичный ВК [2]. Указанная последовательность ВК в скважине осложнена рядом надвиговых дислокаций, по причине которых в комплексах выделены аллохтонные и автохтонные водовмещающие толщи (рисунок).

При рассмотрении гидрогеологических условий разреза Аракаевской параметрической скважины использованы результаты бурения и опробований, гидрохимических исследований буровых растворов и промывочной жидкости, гидрохимических и гидродинамических исследований скважин района бурения, а также печатные и фондовые материалы, посвященные гидрогеологическим исследованиям Западно-Уральской складчато-надвиговой зоны.

В процессе гидрогеологических исследований гидрохимическая зональность разреза установлена в основном косвенными гидрохимическими методами: изучением химического состава поровых вод (водных экстрактов пород) и фильтратов буровых растворов. Всего по разрезу скважины изучено две пробы пластовой воды, 40 проб фильтратов бурового раствора и 35 проб водных экстрактов.

Додевонский или рифейско-вендский терригенно-карбонатный ВК в районе бурения скважины и на прилегающих территориях ранее не изучался. Он сложен мощной толщей осадочных пород рифейского и вендского возраста и представлен конгломератами, песчаниками, известняками, доломитами, алевролитами и аргиллитами преимущественно розового цвета. Считается, что воды находятся в условиях застойного водного ре-

жима, благоприятного для формирования и сохранения залежей углеводородов [3].

Вскрытый Аракаевской скважиной додевонский ВК представлен в интервале 4930-5207 м толщиной осадочных пород рифейского и вендского возраста, сложенной полимиктовыми песчаниками и алевролитами с прослойями аргиллитов. При проходке данного интервала использовалась карбонатный буровой раствор с добавлением реагентов, содержащих в своем составе Na^+ (КМЦ-1100, Na_2CO_3) и карбонаты, в т.ч. известь, что необходимо учитывать при исследовании химического состава фильтрата бурового раствора. Интерпретация результатов анализа фильтрата позволяет сделать предположение о хлоридно-натриевом составе пластовых вод. Поровые воды хлоридные натриевые, характеризуются щелочной реакцией среды ($\text{pH}=10$). В целом воды рифейско-вендского комплекса элизионные, отжаты под влиянием давления и температуры в водопроницаемые слои песчаников и алевролитов.

Эмсско-тиманский (нижне-среднедевонский) терригенный ВК объединяет водонефтенасыщенные породы от венда до тиманского горизонта среднего девона. Это толща преимущественно терригенных пород с небольшими прослойками карбонатов и глинисто-карбонатных отложений. Воды комплекса вскрыты в зоне застойного режима на расположенной рядом Бухаровской площади в интервале 4036-4166 м. Вода по основным гидрохимическим показателям близка к водам отложений терригенного девона, высокое содержание HBO_2 может быть связано с внедрением вод нижнепермского комплекса при эпейрогенических движениях.

В Аракаевской скважине этот комплекс представлен отложениями тиманского горизонта в интервале 4900-4930 м (см. рисунок) и сложен карбонатными породами (известняками, доломитами, мергелями) с песчаниками в верхней части.

Воды верхнедевонско-турнейского карбонатного ВК на прилегающих территориях характеризуются повышенным

П а		л е о з о		и с к а я		Эратема	
PR	Рифей	Девонская	Каменноугольная	Девонская	Каменноугольная	П е р м с к а я	Система
V ₂	D ₃	C ₁	C ₂	D ₃	C ₁	C ₂	Отдел
R ₂	D ₃ fr	C ₁ IV	C ₂ m	D ₃ fm	C ₁ s	C ₂ m	Ярус
R ₃	D ₃ fr	C ₁ t	C ₂ m	D ₃ fr	C ₁ s	C ₂ b	Глубина, м
R ₄	D ₃ fr	C ₁ t	C ₂ m	D ₃ fr	C ₁ s	C ₂ m	Тектонические нарушения
R ₅	D ₃ fr	C ₁ t	C ₂ m	D ₃ fr	C ₁ s	C ₂ b	Интервалы опробований в процессе бурения
R ₆	D ₃ fr	C ₁ t	C ₂ m	D ₃ fr	C ₁ s	C ₂ m	О положение
R ₇	D ₃ fr	C ₁ t	C ₂ m	D ₃ fr	C ₁ s	C ₂ b	Водоносный комплекс
R ₈	D ₃ fr	C ₁ t	C ₂ m	D ₃ fr	C ₁ s	C ₂ m	Тип пластовых вод, притекающих территории
R ₉	D ₃ fr	C ₁ t	C ₂ m	D ₃ fr	C ₁ s	C ₂ b	Тип пластовых вод в разрезе скважины
R ₁₀	D ₃ fr	C ₁ t	C ₂ m	D ₃ fr	C ₁ s	C ₂ b	Пребывающий состав поровых вод пород
R ₁₁	D ₃ fr	C ₁ t	C ₂ m	D ₃ fr	C ₁ s	C ₂ b	По данным оперативного слежения за буровым раствором
R ₁₂	D ₃ fr	C ₁ t	C ₂ m	D ₃ fr	C ₁ s	C ₂ b	Гидрологические этажи
П А Р А В Т О Х Т О Н		А Л Л О Х Т О Н		A L O X T O N		H	
ПАРАВТОХТОН		4067-4138,4		4782,5-4825,5		1860-1910	
ПАРАВТОХТОН		3553-3602,5		3020,5-3046,4		2917-2946	
ПАРАВТОХТОН		2452-2496,8		2321-2374,5		2321-2374,5	
ПАРАВТОХТОН		3597		3753		3087	
ПАРАВТОХТОН		4915		4000		3905	
ПАРАВТОХТОН		5000		4275		4275	
ПАРАВТОХТОН		5110		4365		4365	
ПАРАВТОХТОН		4782,5-4825,5		4067-4138,4		3553-3602,5	
ПАРАВТОХТОН		3020,5-3046,4		2917-2946		3087	
ПАРАВТОХТОН		2452-2496,8		2321-2374,5		3087	
ПАРАВТОХТОН		3597		3753		3087	
ПАРАВТОХТОН		4915		4000		3905	
ПАРАВТОХТОН		5000		4275		4275	
ПАРАВТОХТОН		5110		4365		4365	
ПАРАВТОХТОН		4782,5-4825,5		4067-4138,4		3553-3602,5	
ПАРАВТОХТОН		3020,5-3046,4		2917-2946		3087	
ПАРАВТОХТОН		2452-2496,8		2321-2374,5		3087	
ПАРАВТОХТОН		3597		3753		3087	
ПАРАВТОХТОН		4915		4000		3905	
ПАРАВТОХТОН		5000		4275		4275	
ПАРАВТОХТОН		5110		4365		4365	
ПАРАВТОХТОН		4782,5-4825,5		4067-4138,4		3553-3602,5	
ПАРАВТОХТОН		3020,5-3046,4		2917-2946		3087	
ПАРАВТОХТОН		2452-2496,8		2321-2374,5		3087	
ПАРАВТОХТОН		3597		3753		3087	
ПАРАВТОХТОН		4915		4000		3905	
ПАРАВТОХТОН		5000		4275		4275	
ПАРАВТОХТОН		5110		4365		4365	
ПАРАВТОХТОН		4782,5-4825,5		4067-4138,4		3553-3602,5	
ПАРАВТОХТОН		3020,5-3046,4		2917-2946		3087	
ПАРАВТОХТОН		2452-2496,8		2321-2374,5		3087	
ПАРАВТОХТОН		3597		3753		3087	
ПАРАВТОХТОН		4915		4000		3905	
ПАРАВТОХТОН		5000		4275		4275	
ПАРАВТОХТОН		5110		4365		4365	
ПАРАВТОХТОН		4782,5-4825,5		4067-4138,4		3553-3602,5	
ПАРАВТОХТОН		3020,5-3046,4		2917-2946		3087	
ПАРАВТОХТОН		2452-2496,8		2321-2374,5		3087	
ПАРАВТОХТОН		3597		3753		3087	
ПАРАВТОХТОН		4915		4000		3905	
ПАРАВТОХТОН		5000		4275		4275	
ПАРАВТОХТОН		5110		4365		4365	
ПАРАВТОХТОН		4782,5-4825,5		4067-4138,4		3553-3602,5	
ПАРАВТОХТОН		3020,5-3046,4		2917-2946		3087	
ПАРАВТОХТОН		2452-2496,8		2321-2374,5		3087	
ПАРАВТОХТОН		3597		3753		3087	
ПАРАВТОХТОН		4915		4000		3905	
ПАРАВТОХТОН		5000		4275		4275	
ПАРАВТОХТОН		5110		4365		4365	
ПАРАВТОХТОН		4782,5-4825,5		4067-4138,4		3553-3602,5	
ПАРАВТОХТОН		3020,5-3046,4		2917-2946		3087	
ПАРАВТОХТОН		2452-2496,8		2321-2374,5		3087	
ПАРАВТОХТОН		3597		3753		3087	
ПАРАВТОХТОН		4915		4000		3905	
ПАРАВТОХТОН		5000		4275		4275	
ПАРАВТОХТОН		5110		4365		4365	
ПАРАВТОХТОН		4782,5-4825,5		4067-4138,4		3553-3602,5	
ПАРАВТОХТОН		3020,5-3046,4		2917-2946		3087	
ПАРАВТОХТОН		2452-2496,8		2321-2374,5		3087	
ПАРАВТОХТОН		3597		3753		3087	
ПАРАВТОХТОН		4915		4000		3905	
ПАРАВТОХТОН		5000		4275		4275	
ПАРАВТОХТОН		5110		4365		4365	
ПАРАВТОХТОН		4782,5-4825,5		4067-4138,4		3553-3602,5	
ПАРАВТОХТОН		3020,5-3046,4		2917-2946		3087	
ПАРАВТОХТОН		2452-2496,8		2321-2374,5		3087	
ПАРАВТОХТОН		3597		3753		3087	
ПАРАВТОХТОН		4915		4000		3905	
ПАРАВТОХТОН		5000		4275		4275	
ПАРАВТОХТОН		5110		4365		4365	
ПАРАВТОХТОН		4782,5-4825,5		4067-4138,4		3553-3602,5	
ПАРАВТОХТОН		3020,5-3046,4		2917-2946		3087	
ПАРАВТОХТОН		2452-2496,8		2321-2374,5		3087	
ПАРАВТОХТОН		3597		3753		3087	
ПАРАВТОХТОН		4915		4000		3905	
ПАРАВТОХТОН		5000		4275		4275	
ПАРАВТОХТОН		5110		4365		4365	
ПАРАВТОХТОН		4782,5-4825,5		4067-4138,4		3553-3602,5	
ПАРАВТОХТОН		3020,5-3046,4		2917-2946		3087	
ПАРАВТОХТОН		2452-2496,8		2321-2374,5		3087	
ПАРАВТОХТОН		3597		3753		3087	
ПАРАВТОХТОН		4915		4000		3905	
ПАРАВТОХТОН		5000		4275		4275	
ПАРАВТОХТОН		5110		4365		4365	
ПАРАВТОХТОН							

Гидрогеологический разрез Аракаевской скважины

содержанием сульфат-ионов. Данный ВК вскрыт скважиной дважды: в интервале 4275-4900 м в паравтохтоне и в альлохтоне в интервале 3013-3597 м. Паравтохтонная, более глубинная часть комплекса, представлена доломитизированными известняками, доломитами и мергелями франко-фаменского возраста и турнейскими известняками, верхним флюидоупором являются косьвинские аргиллиты. На такой глубине верхнедевонско-турнейский ВК вскрыт впервые.

Поровые воды паравтохтонного интервала комплекса исследовались в интервале 4614,3-4818,22 м. Очень высокая сульфатность вод ($\text{SO}_4^{2-} = 40\text{-}99 \%$) характерна для зон разрушения нефтяных залежей, особенно на больших глубинах, где из-за высоких температур окислительная агрессивность сульфатов возрастает. Однако данные выводы в большей степени правомочны для пластовых вод, а не для поровых. Кроме того, ангидритово-карбонатный состав вмещающих пород также оказывает значительное влияние на высокое содержание сульфат-ионов в водных экстрактах пород.

Воды открытых пор, извлеченные из доломитовой толщи того же возраста, перекрывающей ангидритово-карбонатную, имеют открытую пористость 0,74-2,99 %, $\text{pH} 8,2\text{-}8,8$. Повышенная сульфатность вод сохраняется ($\text{SO}_4^{2-} = 29\text{-}42 \%$), но значительно возрастает доля гидрокарбонат-иона ($\text{HCO}_3^- = 27\text{-}60 \%$).

Состав пластовых вод паравтохтонной части комплекса с большой долей вероятности сульфатно-кальциевый, что в целом соответствует составу подземных вод верхнедевонско-турнейского ВК данной территории [2].

Выше по разрезу в интервале 3019-3597 м карбонатные отложения верхнедевонско-турнейского водоносного комплекса, ограниченные сверху верхнетурнейскими (косьвинскими) аргиллитами, снизу – швом надвига, встречены повторно в альлохтоне, в самой нижней его части. Опробованный при проходке скважины интервал 3020,5-3046,4 м представлен во-

донасыщенными мелкозернистыми трещиноватыми известняками турнейского возраста. Пластовые воды имеют плотность 1,157-1,158 г/дм³, соленые на вкус. Содержание сульфат-иона составляет 0,81-0,84 г/дм³, что в два раза ниже, чем в водах данного комплекса в зонах разгрузки. По результатам исследований воды отнесены к хлоридному кальциевому типу. Общая минерализация составила 221,9 г/дм³, $\text{pH}=6,06\text{-}6,07$.

В интервале 3553-3602,5 м при аналогичном опробовании франской части этого же ВК получен приток газированной смеси пластового флюида с сильным запахом УВ и жидкости из подпакерного пространства общим объемом 100 л. Минерализация полученного флюида составила 16,5-17,54 г/дм³, состав сульфатно-хлоридно-кальциевый. По сравнению с паравтохтонным блоком в пластовых водах альлохтонной части наблюдалось высокое содержание хлорид-ионов (до 5400 мг/дм³).

Визейский терригенный ВК объединяет водонефтенасыщенные породы терригенных отложений визейского яруса нижнего карбона, мощность которых на рассматриваемой территории не превышает 100 м. Флюидоупором в кровле служат глинистые известняки тульского горизонта, а в подошве – глинистые и окремнелые турнейские известняки или аргиллиты косьвинского горизонта. Воды в зоне активного водообмена (Западный склон Урала) обогащены кальцием и почти не содержат сульфатов [2]. Об исследовании вод визейского терригенного ВК в зоне затрудненного и застойного водообмена (глубже 500 м) сведений нет.

Визейский терригенный ВК вскрыт скважиной в альлохтонной (2920-3013 м) и в паравтохтонной (4121-4275 м) частях разреза. Кроме того, в паравтохтонной части комплекса наблюдается сдвоение разреза: визейская терригенная толща повторяется дважды, разделенная швом надвига на глубине 4189 м. За счет этого мощность визейского терригенного ВК в паравтохтоне увеличена по сравнению с

аллохтоном. Подошвенным водоупором комплекса служат верхнетурнейские (косынинские) аргиллиты, в кровле ВК водоупор представлен глинистыми известняками нижней толщи верхневизейского подъяруса.

Поровые воды терригенных пород паравтохтона низкоминерализованные ($0,09 \text{ г/дм}^3$), гидрокарбонатно-натриевые, с повышенным содержанием магния (до 19 % мас. на породу). Это самая высокая концентрация магния из всех исследованных водных экстрактов Аракаевской скважины.

В экстрактах водных растворов пород зоны надвигового шва (4180-4189,5 м) количество гидрокарбонат-ионов резко возрастает до 86 %, доля сульфат- и хлорид-ионов падает соответственно до 9 и 5 %. В катионном составе по-прежнему преобладает натрий (58 %), но количество кальция возрастает до 40 %, $\text{Mg}^{2+}=2\%$.

Поровые воды визейской аллохтонной терригенной толщи имеют щелочную реакцию среды ($\text{pH}=10,05$), минерализация составляет 0,17 % масс. на породу. В анионном составе большое количество хлорид- и карбонат-ионов (по 35 %), среди катионов резко доминирует Na^+ - 93 %.

В процессе испытания аллохтонной части комплекса зафиксирован интенсивный выход горючего газа из труб с выбросом флюида над запорным клапаном. Состав флюида (смеси пластовой и технической воды) сульфатный натриевый с повышенным содержанием Cl^- . Газ углеводородный, содержание метана 93-96 %.

Визейско-башкирский карбонатный ВК объединяет карбонатные породы визейского (окский надгоризонт), серпуховского и башкирского ярусов карбона. На прилегающих территориях отложения характеризуются закарстованностью, а также общностью химического состава и сходными гидродинамическими условиями. Данная толща пород в целом характеризуется наличием трещинно-карстовых коллекторов и изучалась ранее преимущественно как водонефтевмещающая, пер-

спективная для получения притоков нефти.

Визейско-башкирский карбонатный ВК в Аракаевской скважине также встречен и в аллохтоне, и в паравтохтоне. В интервале 3753-4122 м паравтохтона башкирская часть комплекса отсутствует, а визейские породы интенсивно доломитизированы, сульфатизированы, разбиты тектоническими швами и оперяющими их трещинами. В поровых водах визейских карбонатов в анионном составе преобладает HCO_3^- (57 %), меньше SO_4^{2-} (34 %). Среди катионов доминирует Ca^{2+} (59 %).

Выше по разрезу комплекс вскрыт в аллохтоне в интервале 2314-2920 м. Вмещающие породы представлены известняками с прослойями доломитов и мергелей. Опробование серпуховских отложений в интервале 2452-2496,8 м установило наличие УВ газа метанового состава. Визейские карбонаты в интервале 2672-2902 м характеризуются поровыми водами с $\text{pH}=8,05-9,7$ и минерализацией $M=0,05-0,066$ % масс. на породу. В целом поровые воды визейской аллохтонной карбонатной толщи гидрокарбонатные и карбонатные, кальциево-натриевые и натриево-кальциевые.

Состав поровых вод вышележащих серпуховских доломитов от визейских карбонатных пород отличается более высоким содержанием хлорид-иона (до 48 %), по составу воды преимущественно гидрокарбонатные и карбонатные, кальциево-натриевые и натриево-кальциевые.

В целом пластовые воды визейско-башкирского ВК, исследованные в аллохтонной и паравтохтонной частях разреза только косвенными методами, можно охарактеризовать как преимущественно гидрокарбонатные, натриево-кальциевые и кальциево-натриевые.

Московский карбонатно-терригенный водоносно-водоупорный комплекс (ВВК) объединяет водонасыщенные пласти карбонатно-терригенных отложений московского яруса. Комплекс опробован на Бухаровской площади, где он присутствует в объеме подольского и мячковско-

го горизонтов среднего карбона. При испытании газонасыщенных мячковских пород установлено высокое содержание водорствованного сероводорода (до 1000 мг/дм³).

Московский ВК в аллохтонной части разреза Аракаевской скважины сдвоенный: в верхней части он пройден в интервале 1867-2314 м и представлен породами московского яруса в полном объеме, преимущественно известняками, часто окремнелыми, с прослойями аргиллитов. В подошве комплекса залегают плотные алевролиты, прослойми известковистые, перекрываются комплекс алевролитами и мергелями верхнего карбона.

Повторное появление вмещающих пород данного ВК в объеме только нижней части яруса (верейского подъяруса) отмечено ниже по разрезу в интервале 3597-3753 м. Здесь верейские отложения встречены дважды: между швами надвигов на отметках 3597 м и 3637 м при мощности нижнемосковской толщи 40 м и ниже шва основного надвига (3637 м) до глубины 3753 м, где зафиксировано сбросовое нарушение. Здесь мощность пород этого ВК составляет 116 м.

Фильтраты бурового раствора, отобранные в процессе оперативного слежения за циклами бурения, характеризуются повышением минерализации от подачи раствора в скважину до выхода. Увеличение минерализации связано с повышением концентрации гидрокарбонат-ионов и ионов натрия, поступивших из пластовых вод гидрокарбонатного натриевого типа.

Верхнекаменноугольный карбонатный ВК в зоне западно-уральских складок экранирован плотными монолитными известняками и доломитами в кровле и подошве отела и характеризуется гидродинамической зоной застойного режима. В разрезе скважины ВК представлен преимущественно флюидоупорной мергельно-алевролитовой толщей в интервале 1760-1867 м, экранирующей сверху московский карбонатно-терригенный ВК. При опробовании в процессе бурения интервала 1860-1910 м получен приток го-

рючего газа с последующим изливом жидкости сульфатно-хлоридно-натриевого состава под напором. Жидкость, скорее всего, является технической, газ преимущественно метановый (93,8-94,6 % CH₄ в пересчете на безвоздушный).

Фильтрат бурового раствора, отобранный из интервала 1900,1-1901,2 м, характеризуется начальной общей минерализацией 11,4 г/дм³ и повышением ее до 11,6 г/дм³ на выходе. Увеличение минерализации связано с повышением концентрации гидрокарбонат-ионов и ионов кальция, поступивших из пластовых вод.

Нижнепермский сульфатно-карбонатно-терригенный ВК объединяет водонасыщенные пласти нижней перми (асельские, сакмарские и артинские отложения) с общим падением на запад. Породы представлены в основном мергелями. Это самый верхний из изученных ВК Аракаевской скважины, залегающий на глубине 10-1760 м и представленный в полном объеме. Анализ водных экстрактов пород подтвердил довольно высокую минерализацию (до 0,1-0,2 %) поровых вод гидрокарбонатно-натриевого состава, что близко к гидрокарбонатно-хлоридно-натриевым пластовым водам артинских песчаников Бухаровской антиклинали [2].

Поровые воды аллохтонных отложений артинского возраста (интервал исследования 1494,4-1760 м) имеют щелочную реакцию среды (pH=8,82-10,65), минерализацию 0,11-0,27 % масс. на породу. Анионный состав поровых растворов существенно различается. Повышенное содержание сульфат-иона (до 46 %) зафиксировано на глубине 1815,8 м в мергелях, а в терригенных породах интервала 1494-1519 м доминируют карбонат- и гидроксил-ионы.

Фильтраты бурового раствора в наблюдаемых циклах бурения характеризуются повышением минерализации, связанной с увеличением концентрации гидрокарбонат- и хлорид-ионов, а также кальция и натрия. На основании анализов фильтратов бурового раствора можно

сделать предположение о гидрокарбонатно-натриево-кальциевом составе пластовых вод нижнепермского сульфатно-карбонатно-терригенного ВК.

Водоносный комплекс четвертичных отложений при бурении скважины не изучался.

В целом вертикальная гидрохимическая зональность подземных вод в Западно-Уральской складчато-надвиговой зоне фактически не изучена. Анализ отрывочных данных по отдельным площадям (Бухаровская, Урминская) и различным водоносным комплексам [2] позволяет сделать вывод о том, что в зоне застойного водного режима отложения содержат в основном рассолы хлоридно-кальциевого типа. Характерной особенностью вод являются высокие содержания кальция (до 15–16 г/дм³) при минерализации рассолов до 183 г/дм³, воды также обогащены магнием, йодом, бромом, бором и аммонием. При складкообразовании и надвиговых тектонических движениях и вмещающие отложения, и подземные воды подвергались более интенсивному метаморфизму. Все поровые воды, полученные из образцов Аракаевской скважины, характеризуются очень низкой минерализацией (менее 5 г/дм³).

Осадочные породы зоны развития Предуральского сложного бассейна пластовых (блоково-пластовых) вод на одних участках разреза значительно уплотнены, на других рассланцованны, разбиты трещинами. Химический состав подземных вод по условиям метаморфизма и обогащения вод отдельными микрокомпонентами в целом близок к водам аналогичных комплексов, вскрытых на прилегающих территориях.

Анализируя гидрогеохимический разрез скважины, построенный на основании результатов преимущественно косвенных исследований, по анионному составу пластовых вод можно условно выделить три гидрогеологических этажа. Третий, самый нижний автохтонный этаж, представлен хлоридными водами додевонских отложений. Вышележащий гидрогеологический

этаж преимущественно сульфатных вод объединяет эмсско-тиманский терригенный, верхнедевонско-турнейский карбонатный, визейский терригенный и визейско-башкирский карбонатный ВК и распространяется на верхнюю часть автохтона, весь паравтохтон и аллохтонную часть разреза до глубины 23214 м. Небольшой по мощности визейский терригенный ВК, входящий в выделенный этаж, встречается дважды и в обоих случаях приурочен к участкам тектонических нарушений. При опробовании визейского комплекса в интервале 2917–2946 м произошел выброс флюида сульфатно-натриевого состава, но воды нижележащей части комплекса определены как преимущественно гидрокарбонатные. Выявленные в разрезе скважины надвиги, сбросы и сопровождающие их зоны дробления и повышенной трещиноватости в период тектонической активности обеспечивали возможные перетоки пластовых вод между водоносными комплексами, а также изменение их гидрохимического состава за счет активизации вторичного минералообразования. Такие геологические процессы могли повлиять на состав пластовых вод визейского терригенного ВК и московского карбонатно-терригенного ВВК, попадающего нижним интервалом распространения во второй гидрогеологический этаж и приуроченного к зоне шва основного надвига (интервал 3597–3753 м).

Верхний, аллохтонный гидрогеологический этаж преимущественно гидрокарбонатных вод не осложнен тектоническими нарушениями и включает московский водоносно-водоупорный комплекс, а также верхнекаменноугольный и нижнепермский водоносные комплексы.

Формирование горных сооружений Урала оказало активное влияние на гидродинамику зоны сочленения передовых складок Западного Урала с восточным бортом Русской плиты. В настоящее время гидродинамической связи между этими территориями не прослеживается. Наличие многочисленных надвиговых структур и сбросов, а также сильно уп-

лотненных пород затрудняет фильтрацию пластовых флюидов с Урала в сторону Предуральского краевого прогиба [2]. Однако в районах активных тектонических движений, особенно в узлах сочленения разнонаправленных трещин, создавались наиболее благоприятные условия для вертикальной миграции углеводородов.

Библиографический список

1. Перечень бассейнов подземных вод территории СССР для ведения Государствен-

ного водного кадастра. М.: ВСЕГИНГЕО, 1988. 146 с.

2. Шестов И.Н. и др. Анализ результатов испытания продуктивных отложений поисково-разведочных скважин Соликамской впадины и ПСУ с использованием гидрохимических критериев оценки перспектив нефтегазоносности / КамНИИКИГС. Пермь, 2003. 88 с.

3. Воды нефтяных и газовых месторождений СССР: справочник / под ред. Л.М. Зорькина. М.: Недра, 1989. 382 с.

Hydrogeologic Characteristic of Arakaevskaya Parametric Well

G.L. Belyaeva

JSC "KAMNIKIGS", 15 Krasnoflotskaya Perm 614016, Russia

E-mail: belka61@inbox.ru

In the paper, the boundaries and depth of water-bearing units in the Arakaevskaya parametric well are established. The methods of aquifers hydro-chemical composition study and its results are described. Due to occurrence of overthrust structures at the observed area, the allochthon and autochthon water-bearing units are defined. Analysis of hydrodynamic regime showed that the interaction between Urals aquifers and those at the area of study is not observed.

Key words: *water-bearing complex; pore water; mud; aquifer.*

References

1. Perechen basseynov podzemnykh vod territiorii SSSR dlya vedeniya Gosudarstvennogo vodnogo kadastra [List of underground water basins at the USSR territory for management of the State water register]. Moskva, VSEG-INGEO, 1988, p. 146. (in Russian)
2. Shestov I.N. et al. 2003. Analiz rezul'tatov ispytaniya produktivnykh otlozheniy poiskovo-razvedochnykh skvazhin Solikamskoy vpadiny i PSU s ispolzovaniem hidro-
- geokhimicheskikh kriteriev otsenki perspektiv neftegazonosnosti [Analysis of test results at productive sediments of Solikamskaya Basin and Urals Foreland Faults exploration boreholes using hydro-geochemical criteria of oil and gas potential assessment]. Perm, KamNIKIGS, p. 88. (in Russian)
3. Vody neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy SSSR: Spravochnik [Waters of oil and gas deposits of USSR: Guidebook]. Ed. Zorkin L.M., Moskva, Nedra, 1989, p. 382. (in Russian)

ГЕОФИЗИКА, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 550.8

A Case Study on Usage of Electrical Resistivity Tomography for Dam Seepage Location, Chesterfield, Missouri

E.V. Torgashov^a, O.N. Kovin^b, N.L. Anderson^a

^aDepartment of Geosciences and Geological and Petroleum Engineering, Missouri University of Science&Technology, 290 McNutt Hall, 1400 N. Bishop, Rolla, MO 65409-0140, USA. E-mail: Evgeniy@mst.edu , nanders@mst.edu

^bGeological Faculty, Perm State University, 15 Bukireva Street, Perm 614990, Russia. E-mail: onk2004@netscape.net

(Статья поступила в редакцию 12 мая 2015 г.)

Four Electrical Resistivity Tomography (ERT) profiles and borehole data were acquired on the front face of the earth-filled dam and on the flanks, constituting Lake #1, in order to locate the seepage zone, the flow path, and to determine possible reasons of the seepage. The seepage, observed a year after the construction in the southwestern part of the lake, was severe and could cause further softening, slippage and erosion of soil, developing of pipe holes, increasing the water outflow and risk to the embankment integrity. The owner agreed to drain the lake in order to acquire geophysical and borehole data. Based on the analyses of the acquired ERT and borehole data, four solution-widened fracture zones trending from southwest to northeast were identified. It was concluded that the seepage pathway beneath the dam was through a solution-widened fracture zone, the top of which constituted the original stream channel.

Keywords: *dam seepage; resistivity and borehole data; fracture zone; ERT profiles.*

DOI: 10.17072/psu.geol.27.34

Introduction

The earth-filled dam was constructed and the lake was subsequently filled in 2008 (Figure 1). The embankment is 30 ft high, the normal surface area of the lake is 20 acres, and its height is 51 ft with a length of 425 ft. Lake #1 was constructed on a creek (Figure 2), with a purpose of recreation and housing development. The maximum water depth in the lake is 20 ft.

A year later, after the construction the wet area was noted on the downslope near the southwest corner of the lake. Initially the wet

area was considered to be due to groundwater seeping from the higher ground south of lake.



Figure 1. Aerial image of the study site Lake #1, Missouri

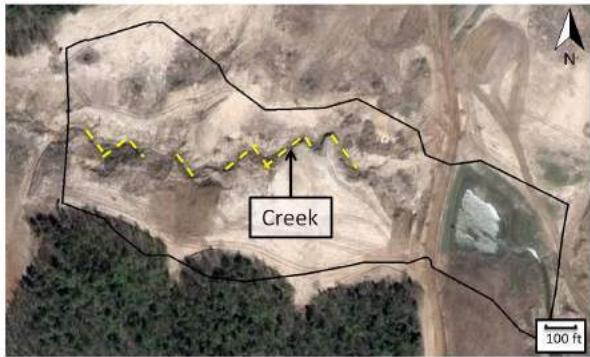


Figure 2. Aerial image of the study site prior to the lake construction. The dam was constructed in the valley with a creek. Black outline shows the lake area, constructed later. Yellow dashed line shows the stream flow, following the joints sets orientation in the study area

The visual observation and measurements of the lake level and drainage from an outfall were conducted on a periodic basis after the wet area was noted. Later, based on the review of these observations and site photographs, it was concluded that the seepage area was a result of escaping lake water. Previous investigations showed that ERT is a reliable tool for studying of the fault and karstic features [6, 7]. Total four ERT profiles and nineteen boreholes data sets were acquired at the study site in order to locate the seepage zone and to determine possible reasons of the seepage.

Site location and geological settings

The study site was located in the east-central Missouri (Figure 3) and the geophysical and borehole investigation was focused on rocks of the late Mississippian System and overlying Quaternary soil [5].

The Mississippian rocks are exposed or occurred near the surface in about one-fourth of the state of Missouri (Figure 3). The formations vary laterally and vertically, and often their successions differ in different parts of the state. The Mississippian System is divided into four series: the Kinderhook, Osage, Meramec, and Chester, which have been deposited between the rising Ozark dome and the Transcontinental Arch.

The Kinderhook is mostly comprised of the Hannibal Formation clayey sandstone and fissile siltstone. The Chouteau Group is overlying the Hannibal, and mostly is represented by a sequence of interbedded limestone. The Kinderhook rocks of the Mississippian are followed by a thick limestone section of the Osagean Series of more than 100 ft of thickness. Meramecian Series conformably overlie the Osagean Series in the east-central Missouri and consist of up to 100 ft thick limestone of the Warsaw, Salem, St. Louis, and Ste. Genevieve Formations [8].

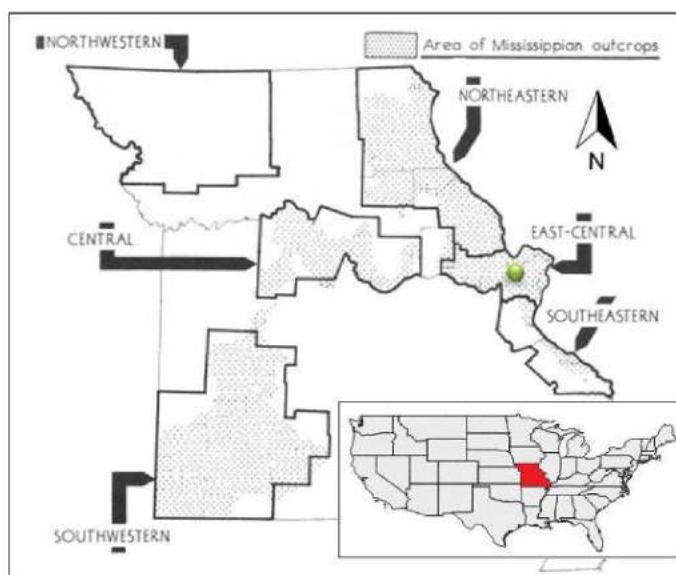


Figure 3. Regional distribution of outcrops of the Mississippian System in Missouri (modified from [8]). Study site is marked as the green dot

Surficial material is represented by alluvium comprised of sorted and unsorted gravelly to clayey sediments, colluvium weathered from Pennsylvanian-, Mississippian-, Devonian- and Ordovician-age bedrock, loess, and man-made fill or cut [1].

The thickness of the surficial sediments is variable because of irregularities in the bedrock surface upon which it was deposited. According to the borehole data depth to bedrock at the study site varies from 40 ft to over 60 ft (bedrock was not encountered at the depth of borehole termination).

The study area is located in one of the major karst regions in the state [9]. It is estimated there are about 1,500 caves in the Mississippian rocks through the state of Missouri. Springs are also associated with karst development, and over 1,100 springs are on record [10]. Sinkholes occur in Mississippian and Ordovician carbonate rocks. Mapped faults, known sinkholes and springs in the study area are shown in Figure 4 according the GIS data from [2, 3]. Majority of the faults are trending northwest to north-northwest. It is interesting to note that the major rivers in the area have the same orientation of the flow as the faults. This is related to the joint sets orientation.

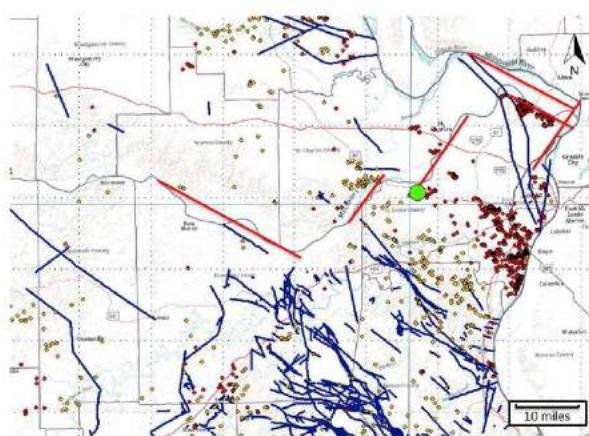


Figure 4. Mapped faults (marked as blue lines) in the study area trending SSE- NNW. Orientation of the preferential surface water flow (marked as red lines) is similar to the faults orientation. Known sinkholes are marked as red dots. Yellow dots show locations of known springs. Study site is marked as the green dot

Methodology and layout of study site

Borehole data. Total nineteen boreholes were drilled at the study site. Boreholes B-104, B-103, B-101, B-1, B-102, B-106, B-107, B-112 were located near or on Traverse A (Figure 5). Boreholes B-101, B-106, B-107, B-112 were located approximately at the elevation of 520 ft, at the same elevation as the crest of the dam. Weathered bedrock and fragments of chert were encountered in these boreholes at the depth of 28.5 ft to 40.5 ft. The variation in the depth to bedrock might be explained by the fact that the lake was constructed in the old stream channel valley and the boreholes were located south from the original channel.

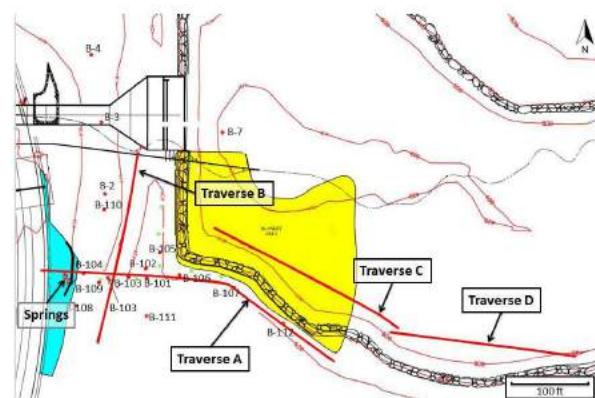


Figure 5. Map showing location of ERT traverses and boreholes

Electrical resistivity tomography (ERT) data. Four electrical resistivity profiles were acquired on the surface along A, B, C, and D traverses (Figure 5) in an effort to determine the seepage zone on the west downslope of the embankment dam south of the spillway.

The ERT data were acquired using an AGI SuperSting R8/IP resistivity unit equipped with a dipole-dipole array consisted of 64 electrodes. Typical depth of investigation is 20 percent of the length of the electrical resistivity array. With 64 available electrodes and the required minimum depth of investigation of 60 ft, a 5 ft spacing between the electrodes was chosen for this ERT survey. The ERT data were acquired in January, after several days of heavy rains.

ERT Profile A, acquired on 510-ft Traverse A, was a result of concatenation of two data sets. ERT Profiles B, C and D, acquired on Traverses B, C and D, were 315 ft long each. Traverse A, oriented west-east, was located partially on the constructed embankment and partially on the southern flank of the lake. Traverse B was located on the front face of the embankment and oriented south-north. Traverses C and D were located on the bottom of the lake, which was drained two weeks prior to the ERT data acquisition (Figure 6). The acquired ERT field data were of good quality and were processed using RES2DINV software [4].



Figure 6. Photograph of the study site on the bottom of the lake (looking west.). ERT cables are set along Traverse C

Results of interpretation and discussion

All electrical resistivity field data sets were transformed into contoured two-dimensional resistivity images. The contoured values on each ERT profile show distribution of the resistivity in the subsurface along the respective traverses. The depth of investigation extends to the depth of approximately 70 ft in the middle portion of the profiles and decreases toward the ends of the profiles to 0 ft.

The estimated top of bedrock, where imaged, has been correlated across each resistivity profile (Figure 7). The depths to bedrock correlation was based on available borehole control and the contoured resistivity values. Bedrock, as mapped on the profiles,

is typically characterized by resistivity values equal to or in excess of 200 ohm-m, whereas soil and fragments of weathered rock, and chert are typically characterized by resistivity values lower than 200 ohm-m.

Linear features, observed on all four profiles, were interpreted as sets of solution-widened joints, characterized by different degree of clay infill.

The first set of solution-widened joint trends southwest-northeast and was imaged on resistivity Profile A (centered at 70 ft mark; Figure 7a) and resistivity Profile B (centered at 180 ft mark; Figure 7b). This prominent geologic feature, on Profile A, is characterized by a zone (~30 ft wide, extending from top of rock to depths in excess of 20 ft) of anomalously low resistivity values (relative to surrounding resistivity at comparable depths on the same profile and other profiles). This zone of anomalously low bedrock resistivity was interpreted as an area in which rock has been extensively leached and partially replaced by clay or other fine-grained sediment. The same feature, on profile B, is characterized by a zone (~35 ft wide, from top of rock to depths in excess of 20 ft) of low resistivity (relative to surrounding resistivity at comparable depths on the same profile and other profiles).

The fourth set of solution-widened joints trends southwest-northeast and was imaged on resistivity Profile A (centered at 460 ft mark; Figure 7a) and resistivity Profile C (centered at 235 ft mark; Figure 7c). This prominent geologic feature, on Profile A, is characterized by a wide zone (~70 ft wide, extending from top of rock to depths in excess of 30 ft) of anomalously low resistivity values (relative to surrounding resistivity at comparable depths on the same profile and other profiles). This zone of anomalously low bedrock resistivity was interpreted as a possible area in which rock has been extensively leached and partially replaced by clay or other fine-grained sediment. The same feature, on Profile C, is characterized by a zone (~40 ft wide, from top of rock to depths in excess of 40 ft) of low resistivity (relative to surrounding resistivity at comparable depths on

the same profile and other profiles). Unfortunately, the ERT image at this location was limited in depth and no conclusion regarding the extent of this lineament could be drawn.

A solution-widened fracture zone mapped on profile D at 225-ft mark (Figure 7d) appears to be wide (over 40 ft) that may be caused by the orientation of this zone. Most

likely, this zone is oriented north-west at oblique angle relative to a profile line; however, the orientation cannot be determined confidently due to lack of data. All four mapped lineaments were superposed on a photograph (Figure 8) and a map of faults and structural lineaments in Missouri (Figure 9).

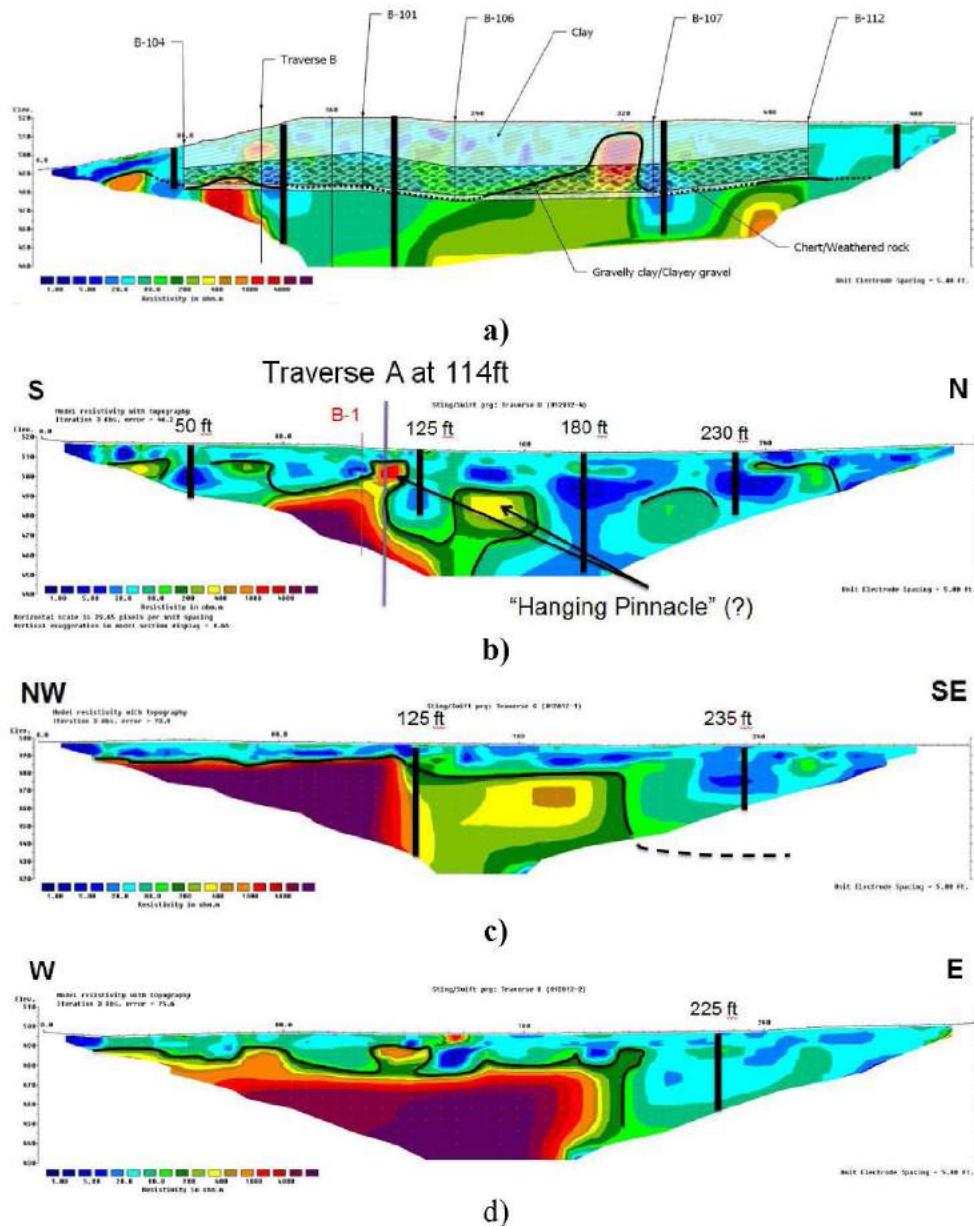


Figure 7. Interpreted ERT Profiles: a) Profile A with superposed borehole cross-section; b) Profile B; c) Profile C; d) Profile D. Black contour line represents depths to interpreted bedrock (dashed black line represents estimated depth to bedrock). Interpreted solution widened joints are marked as black vertical lines

Conclusion

Based on the analysis of the acquired electrical resistivity profiles and borehole data, four

sets of solution-widened joints trending southwest-northeast were mapped. Orientation of the interpreted solution-widened fracture zones is supported by the geologic stud-

ies and mapped faults and lineaments in the study area. It was concluded that the seepage pathway beneath the dam was through a trending southwest-northeast solution-widened fracture zone.



Figure 8. Interpreted solution-widened joint sets superposed on an aerial photograph of the study site (mark as yellow lines). ERT profile locations are marked as red lines. Lineaments orientation is southeast-northwest

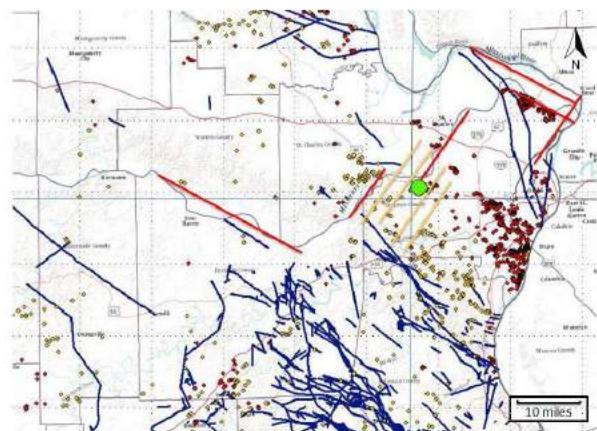


Figure 9. Interpreted solution-widened joints superposed (not to scale) on a map of known faults and structural lineaments in Missouri [Geoport]. Study site is marked as the green dot. Yellow lines trending southwest-northeast represent orientation of the interpreted lineaments. Red lines show orientation of major rivers in the study area

References

1. Butler, Grant and Michael A. Siemens. 2010. Surficial Material Geologic Map of the Chesterfield 7.5' Quadrangle St. Charles and St. Louis Counties, Missouri.
2. Chung Jae-Won, Rogers D. 2010. GIS-Based Virtual Geotechnical Database for the St. Louis Metro Area. Department of Geological Sciences and Engineering, Missouri University of Science and Technology, Rolla, MO.
3. Geoportal Missouri Spatial Data Information Service (MSDIS). URL: <http://geoportal.missouri.edu/geoportal> (Accessed 8th June 2015)
4. Loke M.N., Barker R.D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosection by quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, V. 44, 131-152.
5. Middendorf M.A. et al., 2003. Geologic Map of Missouri. Department of Natural Resources.
6. Myat M., Wamweya A., Kovin O., Anderson N., Robison J. 2008. Application of Electrical Resistivity Method in Steeply Dipping Karst Terrane. Proc. of 11th Multidisciplinary Conf. "Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst (GSP 183)", Tallahassee, FL, September 22-26, pp 91-97.
7. Torgashov E.V., Anderson N.A., Kovin O. 2010. Fault Detection Using Electrical Resistivity Tomography. Proceedings of SAGEEP 2010, Keystone, CO, pp. 865-876.
8. Unklesbay, A.G., Vineyard J.D. 1992. Missouri Geology: Three Billion Years of Volcanoes, Seas, Sediments, and Erosion. University of Missouri Press, Columbia and London.
9. Vandike J. 1997. Karst in Missouri, an Overview. Part 1. Missouri Department of Natural Resources.
10. Vineyard J.D., Feder G.L. 1982. Springs of Missouri. Missouri Department of Natural Resources, Division of Geology and Land Survey, U.S. Geological Survey. Water Resources Report Number 29.

Пример использования метода электротомографии для определения мест утечки в теле плотины, Честерфилд, Миссури

Е. В. Торгашов^a, О. Н. Ковин^b, Н. Л. Андерсон^a

^aДепартамент Наук о Земле, геологической и нефтяной инженерии, Миссурийский университет науки и технологии, 290 McNutt Hall, 1400 N. Bishop, Rolla, MO 65409-0140, USA. E-mail: Evgeniy@mst.edu, [anders@mst.edu](mailto:nanders@mst.edu)

^bГеологический факультет, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, ул. Букирева 15, Россия

В статье представлены результаты исследования земляной плотины пруда и её флангов по данным четырех профилей электротомографии (ERT) и сети скважин для определения зон повышенной проницаемости, путей фильтрации и выяснения возможных причин утечки воды. Утечка в юго-западной части водоема, выявленная через год после окончания строительства, могла привести к разуплотнению, деформации и супфозии грунта, развитию сквозных размывов, обусловливая при этом увеличение стока и риск разрушения дамбы. Владелец согласился осушить водоем для сбора геофизических и скважинных данных. На основе анализа полученных данных электротомографии и бурения были выявлены четыре зоны трещиноватости, ориентированные с юго-запада на северо-восток. В результате работ было установлено, что повышенный уровень фильтрации воды под телом плотины связан с зоной трещиноватости, в верхней части которой образовался канал утечки.

Ключевые слова: *утечка плотины, электротомография, скважинные данные, зона трещиноватости, профили ERT*.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЁРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 549.211:549.553

Об особенностях алмазов перспективных терри- торий Сибирской платформы

Н.Н. Зинчук, В.И. Коптиль

Западно-Якутский научный центр АН РС (Я), г. Мирный

E-mail: nnzinchuk@rambler.ru

(Статья поступила в редакцию 10 февраля 2015 г.)

По результатам проведенных исследований и обобщения материалов об особенностях алмазов в кимберлитах Сибирской платформы сделаны выводы, что существуют индикаторные признаки на всех уровнях их нахождения: от кимберлитовых провинций, субпровинций, полей, диатрем до рудных столбов. Совокупность разновидностей алмаза в кимберлитовых породах образует не парагенетические, а парастерические ассоциации, связанные общностью их сонахождения в кимберлитах. Сформулированы морфологические критерии алмазоносности кимберлитов в зависимости от количественного содержания в них округлых алмазов. Не установлено существенных различий в алмазоносности кимберлитов на разведенную глубину диатрем (до 1200 м).

Ключевые слова: алмазы, кимберлиты, Сибирская платформа, паастегнические ассоциации, критерии алмазоносности.

DOI: 10.17072/psu.geol.27.41

Комплексное исследование алмазов показало [1–6, 9–13, 15–18], что минерал характеризуется комплексом кристалломорфологических и структурных особенностей, отражающих своеобразие термодинамических и геохимических условий его образования. Алмаз – полигенный минерал, образующийся не только в условиях земных недр, но и при сверхскоростном соударении космических тел с Землей. В настоящее время в мире известно четыре геолого-генетических типа коренных месторождений алмазов:

а) на протяжении более сотни лет успешно эксплуатируются [8, 17] коренные месторождения, связанные с кимберлитовыми трубками взрыва;

б) в 70-х гг. прошедшего столетия в Австралии открыты трубки взрыва, выполненные лампроитами – алмазоносными породами, отличающимися от кимберлитов высокими содержаниями Ti, K, Р и некоторых других элементов;

в) в середине прошлого столетия в нашей стране выявлен новый генетический тип коренных месторождений алмазов, связанный с импактитами – породами, сформировавшимися в результате удара космических тел о поверхность Земли, приведшего к твердофазным переходам графита в алмаз при шоковых давлениях;

г) в этот же период был открыт [17, 18] еще один новый генетический тип корен-

ных месторождений алмаза, приуроченный к кристаллическим породам метаморфического комплекса, локализованного в Кокчетавском массиве Казахстана, который является пока единственным представителем этого типа.

Характерной особенностью промышленных месторождений алмазов, связанных с кимберлитами и лампроитами, является их приуроченность в основном к трубкам взрыва. В некоторых случаях экономически рентабельные концентрации алмазов наблюдаются в дайках, обычно тесно связанных с диатремами кимберлитов. Два других типа коренных месторождений алмазов локализуются в коровых породах. Алмазы в них обычно мелкие – преобладают индивиды размером в сотые или десятые доли миллиметра. Импактные алмазы характеризуются специфической морфологией зерен, часто унаследованной от формы выделений замещенного графита, и содержат иногда гексагональную модификацию алмаза – лонсдейлит. Кристаллы метаморфогенного алмаза обычно имеют кубический габитус или скелетные формы и их сростки. Импактные и метаморфогенные алмазы могут быть использованы только для технических целей. Форма месторождений импактных алмазов – изометрическая, в то время как метаморфические комплексы с мелкими алмазами могут иметь различные размеры и форму.

Алмазоисковые работы на Сибирской платформе проводятся уже на протяжении более 60 лет, в результате которых было открыто более 1000 кимберлитовых тел (трубы, дайки и жилы) и установлено широкое развитие россыпной алмазоносности в разновозрастных (от рифейского до современного возраста) коллекторах различных генетических типов. Все известные на платформе кимберлитовые тела распределяются по площади крайне неравномерно. Они в основном сосредоточены в центральной и северной частях платформы и группируются [8, 17] в 25 кимберлитовых полях.

Из восьми известных эпох континентального корообразования и кимберлитового магматизма наиболее перспективными считаются четыре:

- рифейская, убого алмазоносная (Присаянье),
- нижне- и среднепалеозойская, преимущественно высоко алмазоносная (центральная часть платформы),
- мезозойская, низко- или неалмазоносная (северо-восток платформы).

Кроме известных эксплуатирующихся (трубы Мир, Интернациональная, Удачная, Юбилейная, Айхал, Краснопресненская, Комсомольская, Зарница, Сытынская, Нюбинская) и подготавливаемых к промышленной разработке (трубы Ботуобинская, Заря, Дальняя, диатремы Верхнемунского поля – Заполярная, Комсомольская-Магнитная, Новинка, Поисковая и др.) коренных месторождений алмазы установлены в порядка 150 телах, среди которых полупромышленную или близкую к промышленной алмазоносность имеет на порядок меньше диатрем.

В отдельных трубах (Дачная, имени ХХIII съезда КПСС и др.) руда выбрана на возможную глубину открытой разработки и вследствие их существенного сужения на глубину дальнейшая разработка прекращена.

В процессе многолетних прогнозно-поисковых, разведочных и эксплуатационных работ извлекаемые алмазы подвергались всестороннему и комплексному исследованию с применением ранее описанных методик. При этом мы пользовались минералогической классификацией Ю.Л. Орлова [14], по которой выделяется 11 разновидностей алмазов, имеющих глубокое физическое обоснование, свидетельствующих о своеобразии термодинамических и геохимических условий его образования, с разделением минерала различных генетических разновидностей на подразновидности по габитусу и морфологическим типам кристаллов. В основу выделения минералогических разновидностей алмазов положены: окраска, структурно-текстурные особенности, примес-

ные оптически-активные центры, изотопный состав углерода, фото- и рентгенолюминесцентные особенности, минералогия и химический состав твердых включений и т.д. В качестве дополнительных типоморфных признаков привлекаются характер двойников и сростков, скульптуры травления, сохранность, трещиноватость и характер сколов. Использование комплекса типоморфных признаков алмазов позволяет выяснить с генетических позиций как их эндогенную историю в магматических очагах (кимберлитовых телах), так и последующую историю под воздействием наложенных процессов автометаморфизма кимберлитов в постмагматический этап (пластиическая деформация, растворение и коррозия).

Результаты комплексного изучения минералогии и физико-механических свойств алмазов (более 200 тысяч кристаллов) из порядка более 150 кимберлитовых тел Сибирской платформы позволили выделить [1–6, 8–13] типоморфные особенности и установить их связь с алмазоносностью. Это дало возможность провести минералогическое районирование провинций на геолого-структурной основе по алмазам на субпровинции, области, поля и кусты трубок.

Выделено [10, 11] четыре субпровинции: Центрально-Сибирская, Лено-Анабарская (Анабаро-Оленекская и Приленская области), Тунгусская (Байкитская и Южно-Тунгусская области) и Алданская, в пределах которых установлено существенное различие типоморфных особенностей кристаллов кимберлитовых диатрем с различной степенью алмазоносности (первоисточник I и II типов кимберлитового генезиса).

Основная масса известных кимберлитовых тел с алмазами находится в пределах Центрально-Сибирской субпровинции: Мирнинское, Накынское, Алакит-Мархинское, Далдынское и Верхнемунское кимберлитовые поля, в которых сконцентрированы все известные эксплуатируемые и подготавливаемые к промышленному освоению коренные место-

рождения алмазов, а также подавляющее большинство кимберлитовых тел с полу-промышленной продуктивностью. Алмазы характеризуются заметной дифференциацией типоморфных особенностей как по отдельным трубкам или рудным столбам, так и по кимберлитовым полям в целом.

В пределах *Мирнинского кимберлитового поля* выделяются три группы кимберлитовых тел, резко отличающихся по типоморфным особенностям алмазов, связанные, по-видимому, с тремя разделенными по времени фазами кимберлитового магматизма (I – жила А-21, II – трубы Тажная и Амакинская и III – трубы Мир, Интернациональная, им. XXIII съезда КПСС, Дачная и Спутник).

Для *первой* (наиболее ранней) группы характерно низкое содержание октаэдров с преобладанием индивидов ромбододекаэдрического габитуса, представленных в основном окрашенными в дымчато-коричневые цвета додекаэдроидами с шагренью и полосами пластической деформации «жильного» типа, и преобладание алмазов с сине-голубым и зеленым свечением.

Во *второй* группе отмечается (рис. 1) примерно равное соотношение кристаллов октаэдрического и ромбододекаэдрического габитусов при сравнительно низком (первые проценты) содержании



Рис. 1. Алмазы из кимберлитов трубы Тажная (Малоботуобинский алмазоносный район)

типичных округлых алмазов и превалированием минерала с сине-голубой фотолюминесценцией.

Третья, наиболее высокопродуктивная группа кимберлитовых тел характеризуется преобладанием груболаминарных кристаллов октаэдрического (рис. 2) и переходного от него к ромбододекаэдрическому габитусов при низком (менее 10%) содержании индивидов ромбододекаэдрического габитуса, среди которых практически отсутствуют типичные округлые алмазы.



Рис. 2. Алмазы из кимберлитов трубы Мир (Малоботубинский алмазоносный район)

Отмечается малое количество двойников и сростков, преобладание кристаллов с розово-сиреневой фотолюминесценцией и без признаков видимого свечения, при низком содержании камней с сине-голубым свечением. Имеющиеся данные свидетельствуют об отсутствии резких отличий алмазов в пределах отдельных рудных столбов из группы высокопродуктивных кимберлитовых диатрем.

Из других типоморфных особенностей можно отметить также низкое содержание поликристаллических агрегатов и индивидов с признаками природного растворения и травления, превалирование среди включений в алмазах минералов-узников ультраосновной ассоциации.

В Накынском кимберлитовом поле (Среднемархинский алмазоносный район) трубы Ботубинская и Нюрбинская характеризуются [9-13] комплексом типо-

морфных особенностей, присущих богатым диатремам (рис. 3), с преобладанием кристаллов октаэдрического (О), переходного (ОД) и ромбододекаэдрического (Д) (их соотношением О:ОД:Д=1:1:1) габитусов, при отсутствии типичных округлых алмазов, и заметным (до 5%) содержанием кристаллов псевдоромбододекаэдрического габитуса, сложенных тригональными слоями роста «мархинского» типа. Кимберлитовые диатремы этого поля характеризуются также присутствием в небольшом (около 5%) количестве алмазов с тонкой окрашенной оболочкой 1V разновидности и низким содержанием двойников и сростков, превалированием индивидов с розово-сиреневой фотолюминесценцией, с высоким содержанием примесного азота в форме А-центра. Большинство встреченных сингенетических включений представлены минералами-узниками ультраосновной ассоциации.



Рис. 3. Алмазы из кимберлитов трубы Нюрбинская (Средне-Мархинский алмазоносный район)

В пределах Далдынского и Алакит-Мархинского кимберлитового полей для трубок с повышенной алмазоносностью характерно [10-13] низкое содержание типичных округлых алмазов «уральского» («бразильского») типа, при различном соотношении (рис. 4) кристаллов октаэдрического и ромбододекаэдрического габитусов (в трубках Удачная, Сытыканская, Комсомольская и Юбилейная содержание ромбододекаэдров менее 50%, а в трубках Айхал, Краснопресненская и Дальняя –

более 50%). Следует отметить, что каждая из этих трубок индивидуальна по типоморфным особенностям алмазов. Из других черт следует выделить высокое содержание двойников и сростков, а также поликристаллических агрегатов, преобладание кристаллов с сине-голубой, реже с зеленой фотолюминесценцией.



Рис. 4. Алмазы из кимберлитов трубы Айхал (Далдыно-Алакитский алмазоносный район)

Наблюдается сравнительно частая встречаемость окрашенных алмазов II, III и IV разновидностей эклогитового генезиса, что отличает Далдынское и Алакит-Мархинское кимберлитовые поля от Мирнинского и свидетельствует о заметном различии состава мантии Земли в этих алмазоносных регионах. Среди сингенетических твердых включений в алмазах I разновидности преобладают (до 99,9%) минералы-узники ультраосновной ассоциации.

По характеру связи кристалломорфологических особенностей алмазов с их крупностью выделяется две группы кимберлитовых тел. Первая из них, наиболее высокопродуктивная, отличается повышенным содержанием кристаллов октаэдрического габитуса с увеличением крупности (Айхал, Удачная и др.), а вторая (Юбилейная и др.) характеризуется обратным соотношением, причем содержание типичных округлых алмазов среди последней достигает 10-15%.

Среди кимберлитовых тел этих полей с убогой алмазоносностью по соотношению габитусных форм кристаллов выде-

ляются три группы трубок: I – октаэдры + переходные формы – 35%; II – О+ОД+2О – 50% и III (промежуточная) – О+ОД=35%, для которых характерно повышенное содержание типичных округлых алмазов, в основном, додекаэдроидов с шагренью и полосами пластической деформации. Такие алмазы являются типоморфным признаком не только кимберлитовых жил, но и трубок с убогой алмазоносностью, относящихся к самостоятельной фазе кимберлитового магматизма, которая, в большинстве случаев, предшествовала образованию высокопродуктивных тел обоих полей Далдыно-Алакитского алмазоносного района.

Алмазы из кимберлитовых тел Верхнемунского поля по своим типоморфным особенностям занимают обособленное положение в пределах рассматриваемой субпровинции. Они характеризуются морфологическим спектром кристаллов с преобладанием додекаэдроидов с шагренью и полосами пластической деформации, которые присутствуют в кимберлитовых телах с убогой алмазоносностью. Это находится в противоречии с их сравнительно высокой (полупромышленной) алмазоносностью, достигающей в некоторых трубках (Заполярная) промышленных концентраций (рис. 5), т.е., с одной сторо-



Рис. 5. Алмазы из кимберлитов трубы Заполярная (Верхнемунское поле)

ны, им присущ комплекс типоморфных особенностей алмазов, свойственных в целом этому полю, а с другой – заметно

индивидуализированных по некоторым свойствам (двойники и сростки, фотолюминесценция, содержание примесного азота в форме А-центра) как в отдельных трубках, так и в рудных столбах кимберлитовых тел сложного геологического строения.

Основными типоморфными особенностями алмазов из трубок этого поля являются [10, 11]: резкое преобладание кристаллов ромбододекаэдрического габитуса I разновидности, среди которых превалируют окрашенные в дымчато-коричневые цвета додекаэроиды с шагренью и полосами пластической деформации, при сравнительно низком содержании ламинарных ромбододекаэдротов, а также кристаллов октаэдрического и переходного от него к ромбододекаэдрическому габитусов. Для них также характерно высокое содержание поликристаллических агрегатов VIII разновидности, которое положительно коррелируется с алмазоносностью отдельных кимберлитовых тел или рудных столбов. Количество «экзотических» алмазов II, III и IV разновидностей является низким, не превышая первых процентов, причем по своим типоморфным особенностям они не отличаются от аналогичных разновидностей из кимберлитовых тел Далдыно-Алакитского района и отличны от камней Мирнинского и Накынского кимберлитовых полей. Алмазы II, V и VII разновидностей обнаружены не только в россыпи р. Уулаах-Муна, но и в трубках Верхнемунского поля, находящихся в верховье этой реки.

В последние годы при проведении ревизионно-опробовательских работ на известных и вновь открытых кимберлитовых телах северо-востока Сибирской платформы (Лено-Анабарская субпровинция) получены принципиально новые данные об их продуктивности и установлены месторождения с полупромышленной алмазоносностью (трубка Малокуонапская) мезозойского возраста, что существенно меняет имеющиеся представления о перспективах коренной алмазоносности этого обширного региона. Ре-

зультаты минералогических исследований пород некоторых известных на сегодня кимберлитовых тел свидетельствуют о типоморфных особенностях алмазов как каждой в отдельности трубки, так и кимберлитовых полей в целом и их резком отличии от кристаллов большинства россыпей северо-востока Сибирской платформы, коренные источники которых до настоящего времени не установлены.

Типоморфные особенности алмазов из кимберлитовых тел *Лено-Анабарской субпровинции* не менее индивидуализированы, чем таковые Центрально-Сибирской. Среди известных кимберлитовых полей этой обширной территории представительное для статистической характеристики количество алмазов установлено [10–13] только в девяти телах пяти полей (Омонос-Укукитском, Куранахском, Чомурдахском, Верхнемоторчунском и Куойском). По мнению большинства исследователей, для кимберлитовых тел северо-востока Сибирской платформы (преимущественно мезозойского возраста) характерен комплекс особенностей вещественного состава, отличающий их от аналогичных диатрем других субпровинций. Кимберлитовые породы представлены здесь интрузивной и эксплозивной фазой [17, 18]. Среди первых присутствуют мелилит и монтичеллит, а также перовскит, алатит и рудные минералы. В трубках взрыва основную роль играют кимберлитовые брекчи, но встречаются и порфировые разности интрузивной фации. В изученных трубках отмечено много слюдистых кимберлитов. Характерно в целом невысокое содержание минералов-спутников алмаза, причем пикроильменит преобладает над пиропом. Среди последних редки разности алмазной ассоциации [15]. Кимберлиты характеризуются повышенными концентрациями титана, железа, фосфора, алюминия и калия. Количество ксенолитов глубинных пород в диатремах данной территории понижено и в их составе почти не встречаются нодули алмаз-пироповой фации глубинности. По комплексу типоморфных особенностей

алмазы из описываемых кимберлитовых тел резко отличаются от кристаллов из разновозрастных россыпей этого обширного региона, в первую очередь, пониженным содержанием типичных округлых алмазов «уральского» («бразильского») типа I разновидности и полным отсутствием кристаллов II, V и VII разновидностей. В этих кимберлитовых телах преобладают обычные для диатрем Центрально-Сибирской субпровинции ламинарные кристаллы ряда октаэдр-ромбододекаэдр (рис. 6) октаэдрического, ромбододекаэдрического и переходного между ними га-

битусов I разновидности, причем в большинстве трубок их содержание нередко выше, чем в богатых диатремах Далдыно-Алакитского и Верхнемунского алмазоносных районов. Это в значительной мере подчеркивает несостоятельность высказываний некоторых исследователей о существовании зональности Сибирской платформы по алмазам и о закономерном снижении доли октаэдров по направлению с юга на север региона. При этом следует подчеркнуть факт наличия для каждого кимберлитового поля своих типоморфных

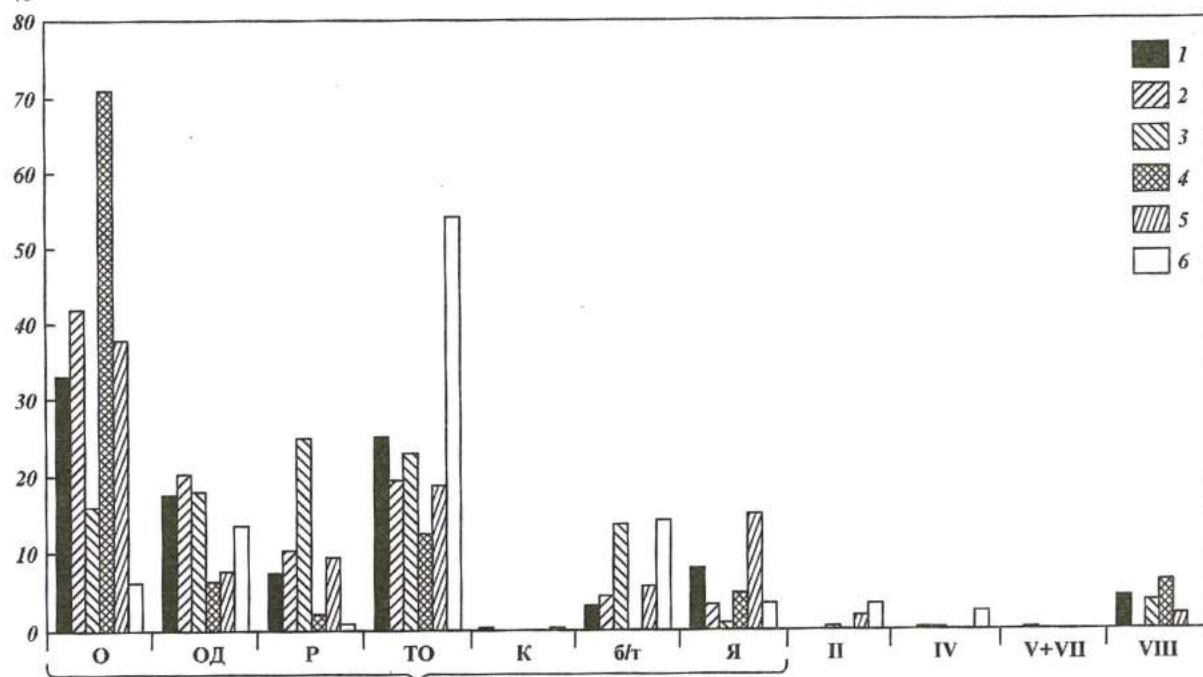


Рис. 6. Типоморфные особенности алмазов из кимберлитов северо-востока Сибирской платформы: 1, П, 1У, У + УП, УШ – разновидности по Ю.Л. Орлову [14]; принятые сокращения: О – октаэдры, ОД – переходные формы, Р – ламинарные ромбододекаэдры, ТО – сумма типично округлых алмазов, К – кубы, б/т – осколки, Я – янусы; 1-6 – кимберлитовые трубки: 1 – Ленинград, 2 – Светлана, 3 – Университетская, 4 – дайка Ан-21/79, 5 – Аэрогеологическая, 6 – Дьянга

особенностей алмазов, а в пределах Омнос-Укукитского поля наблюдается даже резкое отличие кристаллов двух пространственно разобщенных кустов трубок (северный – трубки Ленинград и Русловая, южный – Светлана и Лорик).

Диатремы Омнос-Укукитского поля характеризуются повышенным (более 2/3) суммарным содержанием кристаллов октаэдрического и переходного от октаэд-

рического к ромбододекаэдрическому габитусов I разновидности, представленных преимущественно индивидами с тригональными слоями роста и полицентрически растущими гранями, также сложенными тригональными слоями роста, что свидетельствует [11] об отсутствии признаков природного растворения. Алмазы с пятнами пигментации и ожелезненные отсутствуют. По фотолюминесцентным

особенностям преобладают (до 37%) алмазы с розово-сиреневым свечением при примерно сопоставимых между собой количествах кристаллов с сине-голубым свечением (до 20%) и без признаков такого (18–23%).

Подавляющее большинство (52–62%) кристаллов содержит твердые включения с резким преобладанием среди них эпигенетических графит-сульфидных. Южный куст Омонос-Укукитского поля близок по кристалломорфологическим особенностям к алмазам северного куста, характеризуясь преобладанием (42–46%) октаэдров, но отличается повышенным (до 36%) содержанием двойников и сростков, кристаллов с признаками природного травления (76–85%), более высокой прозрачностью и пониженным (не выше 15%) количеством окрашенных камней, резким преобладанием (64–67%) кристаллов с сине-голубой фотолюминесценцией и включений ультраосновного парагенезиса.

Алмазы Чомурдахского поля характеризуются аномально высоким (до 71%) содержанием кристаллов октаэдрического габитуса, среди которых преобладают (до 48%) плоскогранные острореберные октаэдры, представленные шпинелевыми двойниками, часто в комбинации с незакономерными сростками, преимущественно с коррозией. Большинство алмазов из кимберлитов дайки АН-21/79 в той или иной степени прозрачные, содержание полупрозрачных (до 15%) и окрашенных в лилово-коричневый цвет (12,5%) кристаллов небольшое. В целом спектр алмазов из упомянутой дайки не имеет аналогов на СП при их некоторой близости по высокому содержанию двойников и сростков октаэдров к микроалмазам отдельных кимберлитовых тел Алакит-Мархинского поля с убогой алмазоносностью [10,11].

В Верхнемоторчунском поле наиболее крупной по размерам (17 га) на северо-востоке СП является трубка Аэрогеологическая, в которой доминируют кристаллы октаэдрического и переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитусов I разновидности (в сумме около

60%) при в целом низком (до 19%) содержании додекаэдроидов с шагренью и полосами пластической деформации. Содержание двойников и сростков является (рис.8) повышенным (до 38%) при резком преобладании (до 25%) двойников по шпинелевому закону. Скульптуры травления представлены преимущественно (до 22%) кавернами. Алмазы отличаются повышенной степенью прозрачности при высоком (до 36%) содержании кристаллов чистой воды и прозрачных. Окрашенных камней немного (24,5%) и представлены они лилово-коричневыми кристаллами I разновидности. Характерной особенностью алмазов из диатремы является преобладающая (до 57%) зеленая фотолюминесценция, что сближает их с кристаллами трубки Поисковая в Верхнемунском районе. Концентрация алмазов с сине-голубым свечением не превышает 6%. Среди общего содержания алмазов с твердыми включениями (до 43%) около 28% занимают эпигенетические включения графита, часто в ассоциации с сульфидами. Характерной особенностью алмазов из описываемой диатремы является сравнительно высокое (до 15%) содержание сингенетических включений, представленных преимущественно минералами-узниками ультраосновной ассоциации (оливин, часто в парагенезисе с хромитом). Степень сохранности (целостность) алмазов очень высокая при резком преобладании (до 77%) целых и в значительной степени поврежденных камней. Большинство (68%) кристаллов не имеют трещин и в целом преобладают техногенные сколы.

Кимберлитовые диатремы с убогой алмазоносностью Курнахского поля заметно отличаются как от трубки Малокуонапская этого поля, так и от других трубок северо-востока СП по типоморфным особенностям алмазов. Для них характерна [10, 11] «далыно-алакитская» минералогическая ассоциация с преобладанием (до 25%) ламинарных ромбододекаэдров и при заметном суммарном содержании (до 35%) кристаллов октаэдрического и переходного от октаэдрического

к ромбододекаэдрическому габитусов. При этом среди них преобладают индивиды с занозистой штриховкой. Содержание типичных округлых алмазов довольно низкое (4–21%), причем половину из них составляют додекаэроиды с шагренью и полосами пластической деформации. Низким (2–4%) является содержание поликристаллических агрегатов VIII разновидности [14], единичны находки алмазов IV разновидности с оболочкой. Количество двойников и сростков небольшое (6–16%), преобладают незакономерные сростки (5–9%). Довольно значительно (до 32%) содержание кристаллов с признаками природного травления, представленных исключительно шрамами. Большинство алмазов – в той или иной степени прозрачные камни при заметном (20–40%) количестве полупрозрачных индивидов. Общее содержание окрашенных камней составляет около 25%, преобладает (16–20%) лилово-коричневая окраска кристаллов I разновидности при заметном (около 5%) количестве серых кристаллов VIII разновидности. Ожелезненные алмазы являются редкостью (до 1,5%). По фотолюминесцентным особенностям доминируют (30–36%) алмазы с розово-сиреневым свечением при сравнительно небольших (9–21%) содержаниях кристаллов с другими цветами фотолюминесценции. Общее количество твердых включений в алмазах сравнительно невысокое (до 32%), причем среди них преобладают эпигенетические образования графита, ассоциирующего с сульфидами.

Главной в этом поле является *кимберлитовая трубка Малокуонанская*, расположенная в верхнем течении р. Малая Куонапка, на её левом берегу в 0,5 км от русла. Она прорывает отложения верхнего протерозоя и нижнего кембрия, перекрываясь лишь маломощным чехлом элювиально-делювиальных отложений. На уровне современного эрозионного среза трубка характеризуется близкой к грушевидной формой с расширенной южной частью и более узкой северной. Трубка состоит из двух сопряженных между со-

бой рудных столбов (северного и южного), отвечающих двум этапам формирования диатремы и сложенных различными типами кимберлитовых пород. Северная часть трубы сложена преимущественно порфировым кимберлитом первой фазы внедрения, по трещинам инъецированным автолитовой кимберлитовой брекчией второй фазы, сформировавшей в основном южную часть трубы (южный рудный столб). Большая часть южной части трубы сложена автолитовой кимберлитовой брекчией второй фазы внедрения, содержащей в виде включений обломки порфировых кимберлитов второй фазы внедрения (типа «кимберлит в кимберлите»). Вдоль восточного и юго-восточного контактов южного рудного столба выделяется так называемая зона смешения кимберлитовых пород, сложенная автолитовой брекчией, насыщенной (до 10% объема) обломками порфировых кимберлитов. Размеры алмазов трубы Малокуонанская являются обычными для кимберлитовых тел и колеблются в значительных пределах – от мельчайших кристаллов массой 0,1 мг до довольно крупных камней массой свыше 1 кар. Среди изученных алмазов свыше 95% составляют кристаллы I разновидности – бесцветные, реже эпигенетически окрашенные в дымчато-коричневые цвета слабой интенсивности. Незначительное содержание желтых кубоидов II разновидности (0,5%), алмазов с оболочкой IV разновидности (0,5%) и поликристаллических агрегатов VIII разновидности (1,3%). Кроме того, алмазы характеризуются высоким содержанием типоморфных для богатых кимберлитовых тел позднепалеозойского возраста ламинарных кристаллов октаэдрического, ромбододекаэдрического и переходного между ними габитусов (в сумме около 65%) при сравнительно низком количестве типичных округлых алмазов «уральского» («бразильского») типа (около 20%) и заметном (до 10%) содержании бесформенных осколков, имеющих в основном техногенный характер. Типичные округлые алмазы, являющиеся неблагоприятным

фактором алмазоносности, полностью отсутствуют в крупных классах. Особенностью изученных алмазов является высокое (около 20%), по сравнению с другими месторождениями, содержание кристаллов с блоковой скелеттурой, в основном ромбододекаэдрического габитуса, что сближает их с ассоциацией кристаллов «кьютюнгдинского» типа. Из других морфологических типов кристаллов преобладающим распространением пользуются алмазы со спиральной и занозистой штриховкой, реже с полицентрически растущими гранями. Количество двойников и сростков здесь одно из наиболее низких (12-13%) среди известных кимберлитовых тел Сибирской платформы, приближаясь к алмазам из месторождений Малоботубинского района. Среди них наиболее распространеными являются двойники по шпинелевому закону и незакономерные сростки. Число алмазов со скелеттурами травления, представленных в основном шрамами, относительно небольшое, не превышающее 25%. При этом содержание кристаллов с кавернами и коррозией составляет всего 2,5%. Подавляющее большинство (свыше 93%) изученных алмазов – в той или иной степени прозрачные камни при высоком (в сумме около 65%) содержании кристаллов чистой воды и весьма прозрачных. Количество окрашенных камней является в целом невысоким и редко превышающим 15%. Наиболее распространены дымчато- и лилово-коричневая слабой интенсивности окраска алмазов I разновидности (21%), значительно реже наблюдается серая и черная (из-за включений графита) окраска камней VIII разновидности. Встречены единичные алмазы с желтой и зеленой (цвета морской волны) окраской, а также с зелеными пятнами пигментации. Кристаллы с признаками ожелезнения отсутствуют.

По характеру свечения в ультрафиолетовых лучах больше алмазов с розово-сиреневым свечением при заметном (до 20%) содержании кристаллов без признаков видимого свечения и с зеленой фотoluminesценцией. Общее количество ал-

мазов с твердыми включениями иногда превышает 25%. Преобладают эпигенетические включения графита в ассоциации с сульфидами. Установлено различие в содержании алмазов в различных рудных столбах диатремы.

Особо следует отметить для диатрем северо-востока Сибирской платформы типоморфизм алмазов II, III и IV разновидностей, которые по своим особенностям близки к кристаллам аналогичных разновидностей Далдынского, Алакит-Мархинского и Верхнемунского кимберлитовых полей, имеющих, вероятно, эклогитовый генезис и резко отличающихся от камней этих же разновидностей из известных россыпей северо-востока Сибирской платформы. Типоморфные для этих россыпей кристаллы V и VII, а также II разновидностей (по комплексу признаков) в кимберлитовых телах этого региона полностью отсутствуют [10, 11]. Свообразной является также кристалломорфология преобладающих в кимберлитовых телах Анабаро-Оленекской области алмазов I разновидности, среди которых выделяются формы роста, растворения и коррозии. Так, в кимберлитовых телах Западно-Укукитского, Чомурдахского, Куранахского и Верхнемоторчунского полей чаще встречаются кристаллы октаэдрического и переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитусов, причем их содержание заметно увеличивается с уменьшением крупности (особенно в классе -1+0,5 мм). Следует при этом отметить, что в первых двух полях преобладают октаэдры с тригональными слоями роста и с полицентрически растущими гранями, также сложенными тригональными слоями роста, характерными для высокопродуктивных кимберлитовых трубок Мирнинского поля. Резко индивидуальными являются типоморфные особенности алмазов южного куста трубок Лучаканского кимберлитового поля (Отрицательная, Двойная, Флажок и Ан.79а) с повышенным (до 25%) содержанием бесцветных кубоидов I разновидности и своеобразных молочно-белых кубоидов

IV разновидности с «облегченным» изотопным составом ($\delta^{13}\text{C} = -17 - -20\text{\textperthousand}$) [14] углерода, а также трубы Дьянга (Куойское поле), в котором резко преобладают додекаэдроиды с шагренью и полосами пластинчатой деформации со сплошными кавернами и с резко преобладающей эклогитовой ассоциацией (гранат оранжевый + омфацит) твердых включений в алмазах.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что алмазы из кимберлитов изученных субпровинций СП характеризуются значительной дифференциацией типоморфных особенностей, что, в свою очередь, указывает как на своеобразие термодинамических и геохимических условий их образования, так и на гетерогенность строения верхней мантии Земли. Об имеющих место неоднородностях в строении верхней мантии показывает и различие в содержании и типоморфизме алмазов из широко распространенных на северо-востоке СП россыпей и кимберлитовых диатрем. Кристалломорфологические особенности алмазов, в частности, высокое содержание кристаллов октаэдрического и переходного от него к ромбододекаэдрическому габитусов (кроме трубы Дьянга), свидетельствуют о существовании благоприятных условий для сохранности алмазов.

При этом следует отметить, что полученные в последние годы на представительном статистическом материале результаты исследований типоморфных особенностей алмазов из кимберлитовых тел северо-востока СП меняют имеющиеся представления о закономерном изменении с юга на север провинции морфологии алмазов: снижение кристаллов октаэдрического габитуса и увеличение количества индивидов ромбододекаэдрического, в том числе и типичных округлых алмазов.

Эти представления были основаны на некорректном сопоставлении алмазов из кимберлитовых тел центральной части провинции и кристаллов из россыпей северо-востока СП, так как на это время достоверное количество кристаллов из

кимберлитовых тел этой части платформы еще не было установлено и комплексно не изучено. Результаты проведенных исследований алмазов СП позволяют сделать вывод, что существуют индикаторные признаки этого интересного минерала на всех уровнях его нахождения: от кимберлитовых – провинции, субпровинции, поля, тела до рудного столба. Типоморфизм алмазов из кимберлитов мы рассматриваем с позиций гипотезы о его полигенезе и ксеногенности в геологических образованиях. В связи с этим вся совокупность разновидностей алмазов в кимберлитах образует не парагенетические, а парастерические ассоциации, связанные с общностью сонахождения в этих своеобразных породах. Анализ результатов исследований алмазов СП указывает, что разнообразие морфологических ассоциаций определяется условиями кристаллизации алмаза в материнских породах и местами заложения кимберлитовых очагов, а также особенностями протекания извержений кимберлитовых расплавов, существенным образом влияющих на растворение и коррозию кристаллов минерала, что приводит к преобразованию его первоначальной формы вплоть до полного уничтожения. В итоге для каждого кимберлитового тела присущ индивидуальный характер типоморфных особенностей алмазов, причем в диатремах многофазного строения зачастую отличаются кристаллы отдельных рудных столбов.

Проведенный анализ особенностей алмазов позволяет сформулировать морфологический критерий алмазоносности, отрицательным фактором которой является повышенное (более 18–20%) содержание типичных округлых алмазов «уральского» («бразильского») типа. В свою очередь, имеющиеся данные по типоморфизму алмазов из кимберлитовых тел Сибирской платформы свидетельствуют об отсутствии горизонтальной концентрической зональности в изменении их типоморфных особенностей.

Существует несколько площадей, характеризующихся определенными разли-

чиями их структурного положения и неодинаковой глубиной заложения магматических очагов, а также динамикой проявления кимберлитового магматизма и различием окислительных условий, способствующих растворению и коррозии алмазов. Это противоречит мнению отдельных исследователей, предлагающих модель концентрического строения кимберлитовых провинций по результатам исследования вещественного состава магматитов, при которой от центра древних платформ к их периферии алмазоносность диатрема резко уменьшается. Следует подчеркнуть, что пока не установлено и уменьшение алмазоносности с глубиной кимберлитовых диатрем.

Разработанные методические приёмы изучения алмазов и особенности его распространения можно успешно использовать при оценке перспектив алмазоносности и других древних платформ Мира.

Библиографический список

1. Аргунов К.П., Захарова В.Р., Зинчук Н.Н. Методическое руководство по изучению и использованию алмазов при типизации кимберлитовых трубок / Уралгегология. Свердловск, 1985. 105 с.
2. Аргунов К.П., Зинчук Н.Н. Некоторые вопросы онтогенеза природных алмазов // Исследование высокобарических минералов. М.: ИФЗ АН СССР, 1987. С.166-186.
3. Афанасьев В.П., Ефимова Э.С., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Атлас морфологии алмазов России. Новосибирск: НИЦ ОИГМ СО РАН, 2000. 291 с.
4. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похilenko Н.П. Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. Новосибирск: Гео, 2001. 276 с.
5. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похilenko Н.П. Поисковая минералогия алмаза. Новосибирск: Гео, 2010. 650 с.
6. Бартошинский З.В., Квасница В.Н. Кристалломорфология алмаза из кимберлитов. Киев: Наукова думка, 1991. 172 с.
7. Галимов Э.М., Клюев Ю.А., Ивановская И.Н. и др. Корреляция изотопного состава углерода, морфологии и структурных особенностей монокристаллических алмазов из некоторых россыпей Якутии // Докл. АН СССР. 1979. Т.249. №-4. С.958-961.
8. Зинчук Н.Н., Зуев В.М., Коптиль В.И., Черный С.Д. Стратегия ведения и результаты алмазоискательных работ // Горный вестник. 1997. №-3. С.53-57.
9. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Особенности алмазов из кимберлитовой трубы Нюрбинская (Якутия) // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001. С.368-376.
10. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Особенности коренной алмазоносности Сибирской платформы // Российская Арктика: геологическая история, минералогия, экология. СПб., 2002. С.586-602.
11. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра, 2003. 603 с.
12. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфные особенности алмазов в связи с проблемой прогнозирования их коренных источников // Мінеральні ресурси України. 2014. №-1. С.17-23.
13. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И., Борис Е.И., Чипашова А.Н. Типоморфные особенности алмазов из кимберлитовых тел Сибирской платформы в связи с прогнозированием и поисками месторождений алмазов // Вестник Воронежского ун-та. Геология, 1999. №-7. С. 155-166.
14. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1984. 264 с.
15. Соболев Н.В. О минералогических критериях алмазоносности кимберлитов // Геология и геофизика. 1971. №-3. С. 70-80.
16. Соболев Н.В., Ефимова Э.С. Парагенетические типы природных алмазов // Петрология и минералогия земной коры и верхней мантии. Новосибирск: ИГМ СО АН СССР. 1981. С.70-77.
17. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов Мира. М.: Недра, 1998. 556 с.
18. Харьков А.Д., Квасница В.Н., Сафонов А.Ф., Зинчук Н.Н. Типоморфизм алмаза и его минералов-спутников из кимберлитов. Киев: Наукова думка, 1989. 183 с.

About Characteristics of Diamonds of Perspective Areas of the Siberian Platform

N.N. Zinchuk, V.I. Koptil

West-Yakutian Scientific Center of Academy of Sciences of the Sakha Republic, 4/1 Lenina Str., Mirny 678170, Yakutiya, E-mail: nnzinchuk@rambler.ru

As a result of carried out research and summarized materials on specific features of diamonds of the Siberian platform, conclusions were made that indications exist at all the levels of their occurrence: from diamondiferous provinces, sub-provinces, fields, diatremes, to ore columns. All the diamond varieties in kimberlite rocks forms not paragenetic, but parasteric associations based on the similarity of their co-existence in the kimberlites. Morphological criteria of kimberlite diamondiferousness according the quantitative content of rounded diamonds were formulated. Sufficient differences in diamondiferousness of kimberlites through all the explored depth of diatremes (up to 1200 m) were not revealed.

Keywords: diamonds; kimberlites; Siberian platform; parasteric association, diamondiferousness criteria.

References

- Argunov K.P., Zakharova V.R., Zinchuk N.N. 1985. Metodicheskoe rukovodstvo po izucheniyu i ispolzovaniyu almazov pri tipizatsii kimberlitovykh trubok [Methodical guidebook on the study and usage of diamonds for classification of kimberlite pipes]. Uralgeologiya, Sverdlovsk, p. 105. (in Russian)
- Argunov K.P., Zinchuk N.N. 1987. Nekotorye voprosy ontogenii prirodnnykh almazov [Some problems of ontogenesis of natural diamonds]. Study of high-pressure minerals. Moskva, IFZ AN SSSR, p. 166-186. (in Russian)
- Afanasiev V.P., Efimova E.S., Zinchuk N.N., Koptil V.I. 2000. Atlas morfologii almazov Rossii [Atlas of morphology of diamonds of Russia]. Novosibirsk, NITS OIGGM SO RAS, p. 291. (in Russian)
- Afanasiev V.P., Zinchuk N.N., Pokhilenko N.P. 2001. Morfologiya i morfogeneza indikatornykh mineralov kimberlitov [Morphology and morphogenesis of mineral indicators of kimberlites]. Novosibirsk, Geo, p. 276. (in Russian)
- Afanasiev V.P., Zinchuk N.N., Pokhilenko N.P. 2010. Poiskovaya mineralogiya almaza [Exploration mineralogy of diamonds]. Novosibirsk, Geo, p. 650. (in Russian)
- Bartoshinskiy Z.B., Kvasnitsa V.N. 1991. Kristallomorfologiya almaza iz kimberlitov [Crystallomorphology of diamond from kimberlites]. Kiev, Naukova Dumka, p. 172. (in Russian)
- Galimov E.M., Klyuev Yu.A., Ivanovskaya I.N. et al. 1979. Korrelyatsiya izotopnogo sostava ugleroda, morfologii i strukturnykh osobennostey monokristallicheskikh almazov iz nekotorykh rossyseych Yakutii [Correlation of isotopic content of carbon, morphology, and structural features of monocystalline diamonds from some Yakutian placers]. Dokl. AN SSSR, 249 (4): 958-961. (in Russian)
- Zinchuk N.N., Zuev V.M., Koptil V.I., Chornyy S.D. 1997. Strategiya vedeniya i rezul'taty almazopoiskovykh rabot [Strategy of conducting and results of diamond exploration]. Gornyy vestnik. 3: 53-57. (in Russian)
- Zinchuk N.N., Koptil V.I. 2001. Osobennosti almazov iz kimberlitovoy trubki Nyurbinskaya (Yakutia) [Characteristics of diamonds from kimberlite pipe Nyurbinskaya, Yakutiya]. Problemy almaznoy geologii i nekotorye puti ikh resheniya, Voronezh, VGU, pp. 368-376. (in Russian)
- Zinchuk N.N., Koptil V.I. 2002. Osobennosti korennoy al'mazonosnosti Sibirskoy platformy [Characteristics of primary diamondiferousness of the Siberian platform]. Rossiyskaya Arktika: geologicheskaya istoriya, mineralogiya,

- mineralogiya, ekologiya. St. Peterburg, pp. 586-602. (in Russian)
11. Zinchuk N.N., Koptil V.I. 2003. Tipomorfizm almazov Sibirskoy platformy [Typomorphizm of diamonds of the Siberian platform]. Moskva, Nedra, p. 603. (in Russian)
12. Zinchuk N.N., Koptil V.I. 2014. Tipomorfnye osobennosti almazov v svyazi s problemoy prognozirovaniya ikh korennyykh istochnikov [Diamond typomorphic characteristics related to the problem of their source]. Mineralni resursy Ukrayiny, 1: 17-23. (in Russian)
13. Zinchuk N.N., Koptil V.I., Boris E.I., Lipashova A.N. 1999. Tipomorfnye osobennosti almazov iz kimberlitovykh tel Sibirskoy platformy v svyazi s prognozirovaniem i poiskami mestorozhdeniy almazov [Typomorphic characteristics of diamonds from kimberlites of the Siberian platform relative to the forecasting and exploration of diamond deposits]. Vestnik Voronezh. Univ. Geologiya. 7: 155.
14. Осько (и др.). 1984. Mineralogiya almaza [Mineralogy of diamond]. Moskva, Nauka, p. 264. (in Russian)
15. Sobolev N.V. 1971. O mineralogicheskikh kriteriyakh alamazonosnosti kimberlitov [On mineralogical criteria of kimberlites diamond content]. Geologiya i geofizika. 3: 70-80. (in Russian)
16. Sobolev N.V., Efimova E.S. 1981. Parageneticheskie tipy prirodnnykh almazov [Paragenetic types of natural diamond]. petrologiya i mineralogiya zemnoy kory i verkhney mantii. Novosibirsk, IGGM SO AN SSSR, p. 70-77. (in Russian)
17. Kharkiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I. 1998. Korennye mestorozhdeniya almazov Mira [Primary diamond deposits of the World]. Moskva, Nedra, p. 556. (in Russian)
18. Kharkiv A.D., Kvasnitsa V.N., Safronov A.F., Zinchuk N.N. 1989. Tipomorfizm almaza i ego mineralov-sputnikov iz kimberlitov [Typomorphizm of diamond and its accessory minerals from kimberlites]. Kiev, Naukova Dumka, p. 183. (in Russian)

УДК 549.211:549.553

Применение геохимических индикаторов для определения генезиса сильвинитов Тюбетатанского месторождения

Н.Е. Молоштанова, Г.А. Исаева

Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: mineral@psu.ru

(Статья поступила в редакцию 9 февраля 2015 г.)

Приведены результаты изучения соляных пород продуктивного пласта Нижний 2 Тюбетатанского месторождения калийных солей. Отмечено, что исследованные отложения являются перекристаллизованными, о чем свидетельствуют их структурно-текстурные особенности. На основании рассчитанных геохимических показателей – бром-хлорного коэффициента и рубидий-калиевого отношения сделаны выводы о вторичном происхождении некоторых слоев, сложенных сильвинитом из карналлитовых пород. Показано, что условия формирования сильвинитов пласта Нижний 2 близки породам Карлюкского месторождения и пестроокрашенным сильвинитам пласта «Б» Верхнекамского месторождения.

Ключевые слова: *сильвинит, каменная соль, карналлит, Тюбетатанское месторождение, рассол, бромхлорный коэффициент, рубидий-калиевое отношение.*

DOI: 10.17072/psu.geol.27.55

Введение

Следует отметить три главных направления современной геохимии. Первое из них, как отмечал В.И. Вернадский, охватывает проблемы поисков различных видов полезных ископаемых в целях расширения минерально-сырьевой базы; второе связано с наиболее актуальной проблемой современности – охраной окружающей среды; третье – с проблемой происхождения химического состава нашей планеты.

Кроме того, геохимические методы позволяют уточнить генезис многих полезных ископаемых, установить генетические типы различных осадочных пород, в том числе выделить первично-седиментационные и вторичные процессы кристаллизации солей.

Изоморфное замещение микроэлементами макроэлементов в природных соединениях можно использовать как эффективный и чувствительный индикатор, позволяющий решать некоторые вопросы условий образования и истории развития отдельных минералов. К таким микроэлементам относятся бром и рубидий в минералах солей хлоридного состава. Бром изоморфно замещает хлор, а рубидий – калий в сильвите и карналлите.

В геологии калийных и калийно-магниевых солей геохимия брома и рубидия применяется весьма широко как отечественными исследователями, так и за рубежом [13, 14]. Многолетний опыт работы в данном направлении отражен в работах М.Г. Валяшко и его последователей, в том числе в тематическом сборнике статей [2], посвященном закономерностям

распределения брома в соляных месторождениях, где обобщен мировой опыт.

В настоящей работе рассматривается применение геохимических показателей распределения брома и рубидия в калийных отложениях Тюбегатанского месторождения и их сравнительная характеристика с аналогами из других месторождений для решения генетических задач.

Характеристика месторождения

Тюбегатанское месторождение калийных солей расположено на границе Узбекистана и Туркменистана и относится к Среднеазиатскому соляному бассейну. В

тектоническом отношении территория месторождения приурочена к северо-западному крылу Тюбегатанской брахиантиклинали. Калийные породы Тюбегатанского месторождения содержатся в составе трех горизонтов галитовой (соленосной) подсвиты гаурдакской свиты (J_3gd) киммеридж-титонского возраста (рис. 1) и относятся к верхнеюрской галогенной формации.

Соляные отложения сложены каменной солью и сильвинитом и перекрыты верхнеюрскими, нижнемеловыми и четвертичными терригенными (с редкими пачками известняков) породами. Промышленные содержания KCl установлены

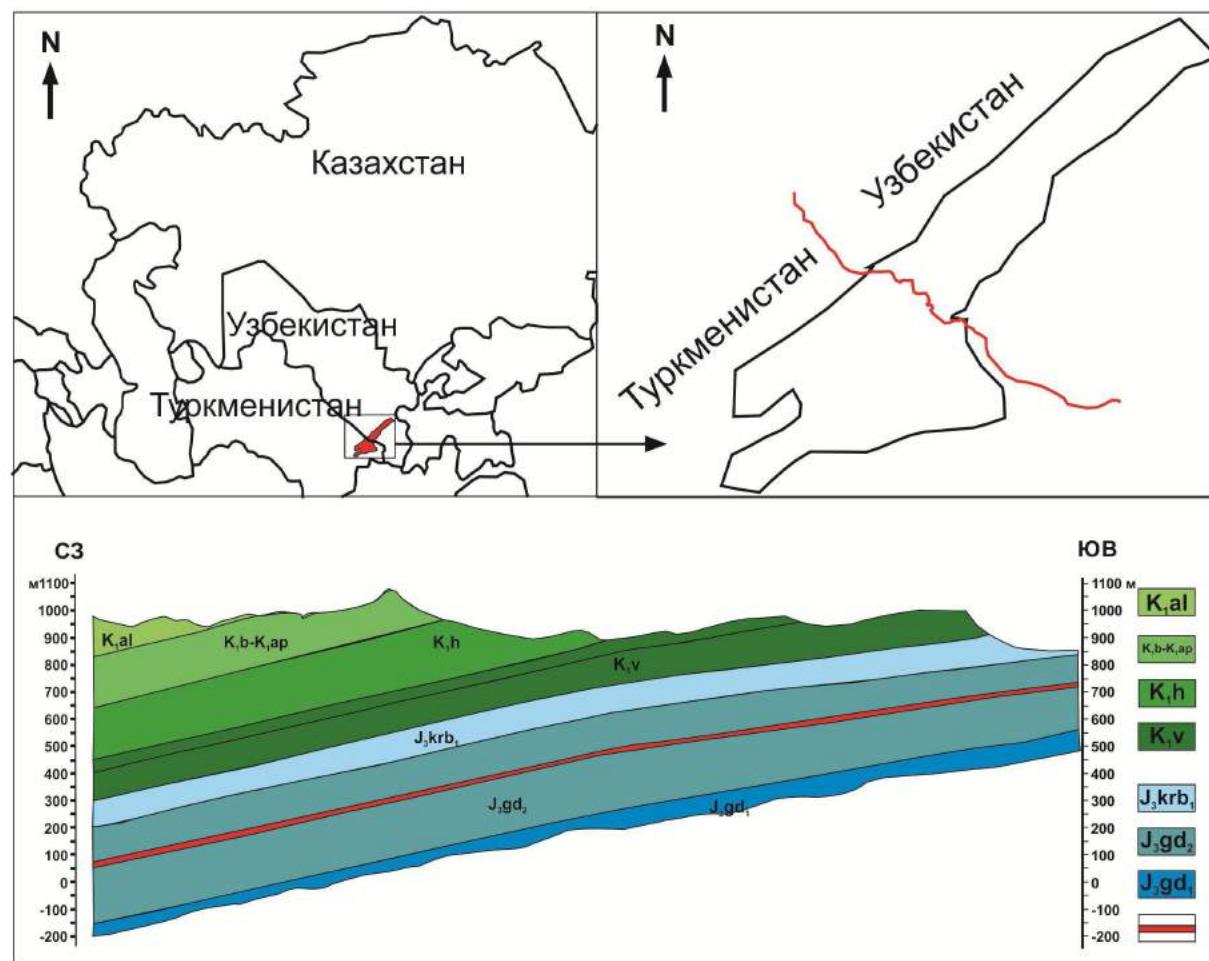


Рис. 1. А – обзорная карта Средней Азии, Б – схематическая карта Тюбегатанского месторождения в контуре подсчета запасов, В – геологический разрез месторождения (условные обозначения снизу вверх: пласт Нижний 2, верхнеюрские отложения гаурдакской и карабильской свит киммириджского-титонского ярусов; нижнемеловые отложения валанжинского, готтеривского, баррем-аптского и альбского ярусов)

во втором пласте (Нижний 2) нижнего горизонта и составляют от 15,6 до 50,5 % (среднее – 34,3 %) при мощности 0,8 до 12,8 м (среднее – 5,65 м) [11]. Запасы калийных солей по категориям А+В+С₁ составляют порядка 400 млн т, а по категории С₂ – 286 млн т [10].

Продуктивный подгоризонт подразделяется на два пласта Нижний 2а и Нижний 2б. Соляные породы представлены сильвинитом, каменной солью, галит-ангидрит-карbonатной и галит-карbonатной породами [7]. Отложения перекристаллизованы, для них характерны круп-

но- и гигантокристаллические структуры и неяснослоистые текстуры, годовые слои не выделяются (рис. 2, а,б). Окраска пород неравномерная, обусловлена распределением гематита и глинисто-карbonатного материала, концентрирующегося в межзерновом пространстве (рис. 2, в,г). Содержание нерастворимого остатка невелико: по данным опробования разведочных скважин колеблется от 0,6 до 3,6 %. Минералы нерастворимого остатка представлены в основном ангидритом, доломитом, магнезитом, кварцем, хлоритом, иллитом [8].

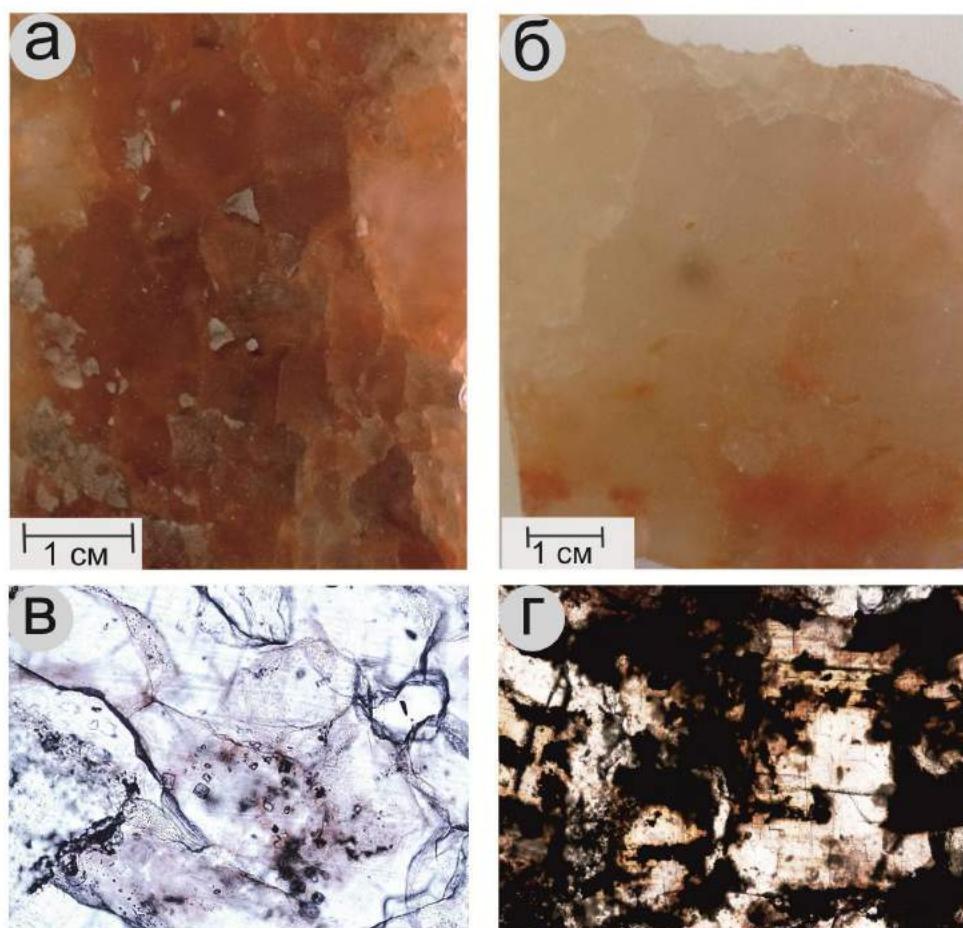


Рис. 2. Фото образцов: а – сильвинит, б – каменная соль; микрофотографии пород в шлифе (увеличение 50 раз): в – ксеноморфные кристаллы сильвина и микровключения ангидрита по контуру зерен, г – глинисто карбонатное вещество между кристаллами галита в каменнойсоли

Считается, что познеюрский солеродный бассейн был связан с открытым морем, а эвапориты верхнеюрской формации являются глубоководными образованиями и их мощность отражает глубину соле-

родного бассейна. Отмечается также, что депрессионные структуры, в которых происходило накопление хлоридных солей, приурочены к зонам приразломных прогибов [1].

По данным геохимического изучения солей Среднеазиатского бассейна, соляные породы верхнеюрской галогенной формации сильно обеднены бромом [12]. Это связано, по мнению исследователей, с изначально низкими содержаниями брома в рассолах в результате воздействия на них вод континентального стока, десцентных (образовавшихся за счет ранее разрушенных древних солей и выщелачивания) рассолов и эпигенетических процессов.

Геохимические исследования

Экспериментальными исследованиями М.Г. Валяшко, Т.В. Мандрыкиной и Н.С. Петровой [4, 5] было установлено,

что изменение величины бромхлорного ($\text{Br}/\text{Cl} \cdot 10^3$) и рубидий-калиевого отношений ($\text{Rb}/\text{K} \cdot 10^4$) может служить показателями условий кристаллизации и преобразования солей в период диагенетических и катагенетических процессов, протекающих при формировании главных породообразующих минералов соляной толщи.

Для сильвина установлена прямая связь между содержаниями брома и рубидия в процессе кристаллизации из морской воды, а для карналлита характерна обратная корреляция элементов, так как концентрация рубидия снижается от первых кристаллов к последним. Поведение элементов при прогрессирующем осолонении схематически показано на рис. 3.

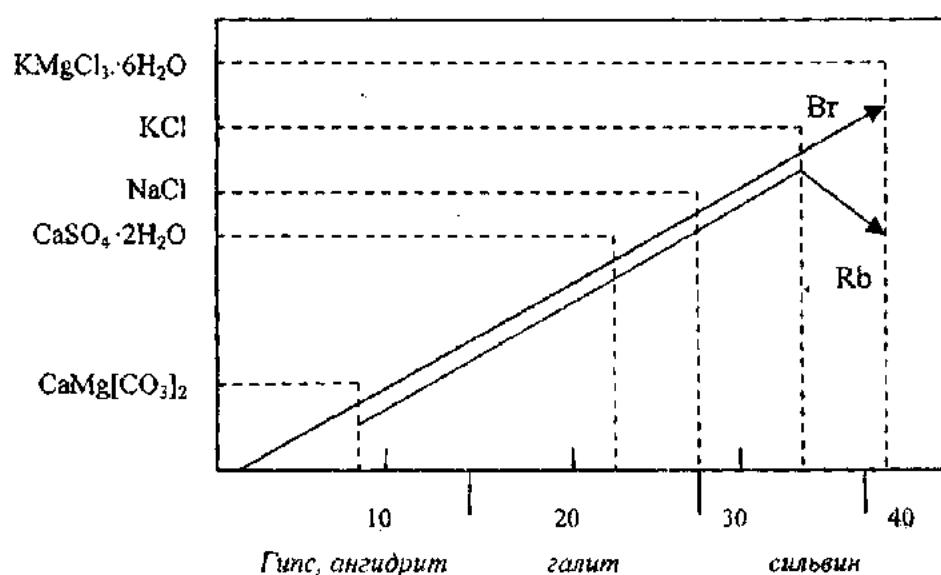


Рис. 3. Концентрация брома и рубидия в эваторитах при прогрессирующем осолонении бассейна [9]

Существует несколько путей образования сильвина [5].

1. Из сгущающейся морской воды, лишенной сульфат-иона (метаморфизованной). В этом случае от начала до конца кристаллизации содержание брома в кристаллах сильвина будет изменяться от 0,13 до 0,20 мас. %, $\text{Br}/\text{Cl} \cdot 10^3$ составит 2,9 – 4,2. Содержание рубидия в таком сильвинае будет колебаться в пределах 0,0017 –

0,0053 мас. %, а отношение $\text{Rb}/\text{K} \cdot 10^4$ составит 0,32 – 1,02.

2. Выделение сильвина за счет растворения первичных карналлитов. Для сильвина будут характерны содержания брома в два раза ниже относительно количества этого элемента в исходном карналлите. Количество рубидия в сильвинае может достигать 0,0542 мас.% и более.

3. Вторичная кристаллизация сильвина из рассолов, возникших при растворении

первично-седиментационных сильвинитов. При таком способе образования сильвин будет характеризоваться минимальными содержаниями брома и рубидия, при этом количество рубидия может снижаться до следов.

Для сравнения геохимических показателей соляных пород Тюбетекинского месторождения были использованы результаты рентгенофлуоресцентного анализа, выполненного на приборе S8 Tiger (Bruker). Были рассчитаны бромхлорные коэффициенты и рубидий-калиевые от-

ношения для 16 проб, в которых были определены содержания рубидия. Показатели нанесены на соответствующие диаграммы для сопоставления с литературными данными по калийным месторождениям хлоридного типа (рис. 3), а также с ранее полученными результатами по сильвинитам Верхнекамского месторождения [9]. Расчеты проведены для сильвинитов из всех слоев пласта Кр-II, полосчатых разностей пласта «А» и пестроокрашенных из пласта «Б».

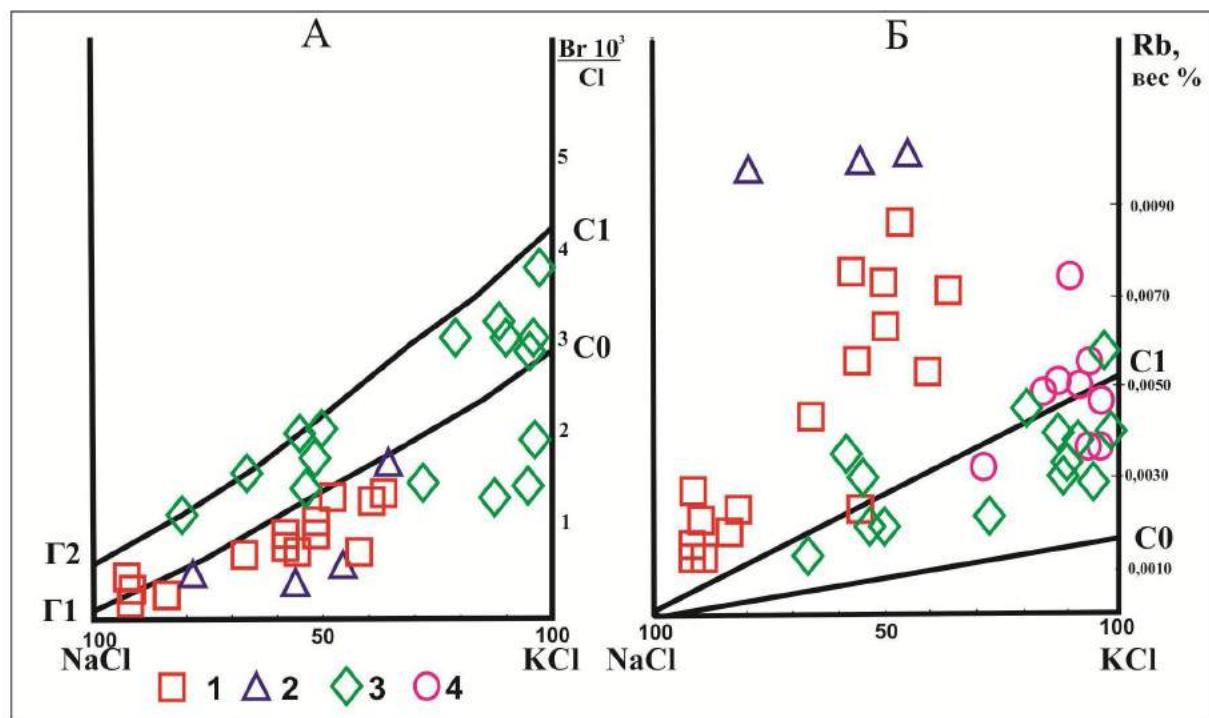


Рис. 3. Шкала нормальных величин геохимических показателей для сильвинитов, выделившихся из морской воды в процессе её сгущения. Геохимические показатели сильвинитов: А – бромхлорные коэффициенты; Б – содержание рубидия [4, 5]: 1 – Тюбетекинское месторождение, пласти нIа и нIб; 2 – Карлюк, Средняя Азия; 3 – Верхнекамское месторождение, пласти Кр-II и А; 4 – Верхнекамское месторождение, пласт «Б». Г1-С0 – кривая, характеризующая начало кристаллизации сильвина, Г2-С1 – значения показателя к концу формирования сильвина

На диаграмме область значений геохимических показателей, характерных для образования сильвинитов из сгущающейся морской воды (первый случай), ограничена кривыми Г1-С0 и Г2-С1. Отчетливо видно, что большая часть фигуративных точек бромхлорных коэффициентов сильвинитов пласта Нижний 2 попадает в область с пониженными от нормальных условий кристаллизации сильвина. Со-

держания рубидия, напротив, являются повышенными. Такая ситуация характерна для второго пути образования сильвина – из растворившихся карналлитов. Показатели являются наиболее близкими к сильвинитам Карлюкского месторождения, для которого ранее указывалось формирование сильвинитов из первичных карналлитов [5]. Сильвиниты продуктивных пластов «Кр-II» и «А» Верхнекамско-

го месторождения относятся к первично-седиментационным образованиям: их геохимические показатели попадают в поле нормальных значений. Исключение составляет пестро-окрашенный сильвинит из пласта «Б», который по распределению рассчитанных показателей сходен тюбетанским сильвинитам. Примечательно также сходство сильвинитов пласта «Б» с отложениями пластов подгоризонта Нижний 2 по структурно-текстурным особенностям: крупно- и гигантокристаллические структуры, неоднородные, часто пятнистые текстуры.

Таким образом, использование геохимических индикаторов показало, что образование сильвинитов продуктивного пласта Тюбетанского месторождения происходило в том числе и за счет перекристаллизации их из первичных карналлитов. Это значит, что сгущение морской воды на начальном этапе формирования месторождения происходило до садки калийно-магнезиальных солей, которые затем были растворены под воздействием вторичных процессов. Наличие карналлитовых пластов в Карлюкском и ряде других месторождений Среднеазиатского бассейна, и отсутствие их в Тюбетанском обусловлено тектоническим фактором, а именно положением и глубиной депрессионных структур, в которых накапливались толщи калийных солей, а также благоприятными условиями для их сохранения при постседиментационном преобразовании пород.

Библиографический список

1. Бабаев А.Г. Позднепалеозойские эвaporиты Средней Азии // Проблемы соленакопления. Новосибирск: Наука, 1977. С. 285-289.
2. Борисенков В.И., Валяшко М.Г., Виноградов А.П. и др. Бром в соляных отложениях и рассолах. М., 1976. 455 с.
3. Валяшко М.Г. Геохимические закономерности образования месторождений калийных солей. М.: Изд-во МГУ, 1961. 374 с.
4. Валяшко М.Г., Мандрыкина Т.В. Бром в соляных месторождениях как генетический и поисковый признак // Труды ВНИИГа. 1952. Вып. 23. С. 108-117.
5. Валяшко М.Г., Петрова Н.С. Использование брома и рубидия в качестве геохимических индикаторов при оценке генезиса калийных солей // Бром в соляных отложениях и рассолах. М., 1976. С. 418-427.
6. Жеребцова И.К. Отношение калия к брому в рассолах выщелачивания – чувствительный гидрохимический индикатор на калийные соли // Бром в соляных отложениях и рассолах. М., 1976. С. 371-381.
7. Исаева Г.А. Вещественный состав сильвинитов продуктивного пласта Тюбетанского месторождения калийных солей // Геология и полезные ископаемые Западного Урала / Перм. ун-т. Пермь, 2014. С. 29-33.
8. Исаева Г.А., Молоштанова Н.Е. Минеральный состав нерастворимого остатка сильвинитов Тюбетанского месторождения // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении / Перм. ун-т. Пермь, 2014. С. 55-59.
9. Молоштанова Н.Е., Кропачев А.М. Модель формирования сильвинитов Верхнекамского месторождения калийных солей // Геология и полезные ископаемые Западного Урала / Перм. ун-т. Пермь, 2008. С. 122-128.
10. Кудряшов А.И., Грибков Д.С. Горно-геологические условия разработки Тюбетанского месторождения калийных солей // Рудник будущего. 2010. Вып. 1. С. 11-14.
11. Поздеев А.А., Земсков А.Н., Ибрагимов Г.И. Некоторые аспекты освоения Тюбетанского месторождения калийных солей // Рудник будущего. 2010. Вып. 1. С. 6-10.
12. Попов В.С., Осичкина Р.Г., Касымходжаева У.С. и др. Геохимические особенности верхнеюрской галогенной формации юга Средней Азии // Проблемы соленакопления. Новосибирск: Наука, 1977. С. 291-294.
13. Bukiowski K., Czapowski G., Karoly S., Babel M. Sedimentology and geochemistry of the Middle Miocene (Badenian) salt-bearing succession from East Slovakian Basin (Zbudza Formation) // Evaporates Through Space and Time. 2007. Vol. 285, 247-265.
14. Rahimpour-Ronab H., Shariatinia Z., Shiemann M.G. Role of rifting in evaporate deposition in the Great Kavir Basin, central Iran //

Evaporates Through Space and Time. 2007.

Vol. 285, 69-85.

Use of Geochemical Indicators to Determine the Genesis of Sylvinites of the Tubegatan Deposit

N.E. Moloshtanova, G.A. Isaeva

Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia

E-mail: mineral@psu.ru

This article presents the results of study of salt rock from productive bed "nizhniy 2" of the Tubegatan potash deposit located at the southern territory of the Uzbekistan Republic. Analysis of structural and textural features of the studied sediments showed that they were recrystallized. Calculated geochemical indicators, such as bromine-chlorine ratio and rubidium-potassium ratio, confirmed the conclusion about the secondary origin of some sylvinites from carnallite strata. It is shown that the formation conditions of the "nizhniy 2" sylvinite bed were similar to those of Karlyuk deposit and to multi-colored sylvinites from bed "B" of the Verkhnekamskoe deposit (Upper Kama potash deposit).

Keywords: *sylvinites; salt rock; halite; carnallite; Tubegatan deposit; brine; bromine-chlorine ratio; rubidium-potassium ratio.*

References

1. Babaev A.G. 1977. Pozdnepaleozoyskie evaporty Sredney Azii [Late Paleozoic evaporites of the Central Asia]. In Problemy sole-nakopleniya. Novosibirsk, Nauka, pp. 285-289. (in Russian)
2. Borisov V.I., Valyashko M.G., Vinogradov A.P. et al. 1976. Brom v solyanykh otlozheniakh i rassolakh [Bromine in the brines and salt sediments]. Moskva, P. 455. (in Russian)
3. Valyashko M.G. 1961. Geohimicheskie zakonomernosti obrazovaniya mestorozhdeniy kaliynyh soley [Geochemical regularities of potash deposits formation]. Moskva, p. 374. (in Russian)
4. Valyashko M.G., Mandrykina T.V. 1952. Brom v solyanykh mestorozhdeniyakh kak geneticheskiy i poiskovyy priznak [Bromine of the salt deposits as genetic and search indicator]. Trudy VNIIIGa, 23: 108-117. (in Russian)
5. Valyashko M.G., Petrova N.S. 1976. Ispolzovanie broma i rubidiya v kachestve geokhimicheskikh indikatorov pri otsenke genezisa kaliynyh soley [The use of bromine and rubidium as geochemical indicators for assessment of the genesis of potash salts]. In Brom v solyanykh otlozheniakh i rassolakh. Moskva, Pp. 418-427. (in Russian)
6. Zherebtsova I.K. 1976. Otnoshenie kaliya k bromu v rassolakh vyshchelachivaniya - chuvstvitelnnyy gidrokhimicheskiy indikator na kaliynye soli [The ratio of potassium to bromine in the leached brines as a sensitive hydrochemical indicator for potash salts]. In Brom v solyanykh otlozheniakh i rassolakh. Moskva, Pp. 371-381. (in Russian)
7. Isaeva G.A. 2014. Veshchestvennyy sostav sylvinov produktivnogo plasta Tubegatanskogo mestorozhdeniya kaliynykh soley [The mineral composition of sylvinites of the productive bed of the Tyubegatanskoe potash deposit]. Proc. conf. Geologiya i polznye iskopaemye Zapadnogo Urala. Perm, Perm State University, pp. 29-33. (in Russian)
8. Isaeva G.A. Moloshtanova N.E. 2014. Mineralnyy sostav nerastvorimogo ostatka sylvinov Tubegatanskogo mestorozhdeniya [The mineral composition of the insoluble residue of sylvinites of the Tubegatan deposit]. In Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Perm, Perm State University, pp. 55-59. (in Russian)

9. Moloshtanova N.E., Kropachev A.M. 2008. Model formirovaniya sylvinitov Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliynykh soley [Model of formation of sylvinite of the Verkhnekamskoye potash deposit]. Proc. conf. Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala. Perm, Perm State University, pp. 122-128. (in Russian)
10. Kudryashov A.I., Gribkov D.S. 2010. Gorno-geologicheskie usloviya razrabotki Tubegatanskogo mestorozhdeniya kaliynyh soley [Mining and geological conditions of development of the Tubegatan potash deposit]. Rudnik budushchego, Per, 1: 11-14. (in Russian)
11. Pozdeev A.A., Zemskov A.N., Ibragimov G.I. 2010. Nekotorye aspekty osvoeniya Tubegatanskogo mestorozhdeniya kaliynyh soley [Some aspects of development of the Tubegatan potash deposit]. Rudnik budushchego, Perm, 1: 6-10. (in Russian)
12. Popov V.S., Osichkina R.G., Kasymkhodzhaeva U.S. et al. 1977. Geokhimicheskie osobennosti verkhneyurskoy galogennoy formacii yuga Sredney Azii [Geochemical features of the Upper Jurassic halogen formation of south Central Asia]. In Problemy solenakopleniya. Novosibirsk, Nauka, pp. 291-294. (in Russian)
13. Bukowski K., Czapowski G., Karoly S., Babel M. 2007. Sedimentology and geochemistry of the Middle Miocene (Badenian) salt-bearing succession from East Slovakian Basin (Zbudza Formation). Evaporates Through Space and Time. Geological Society, London, Special Publications, 285: 247-265. doi: 10.1144/SP285.14 0305-8719
14. Rahimpour-Ronab H., Shariatinia Z., Shieemann M.G. 2007. Role of rifting in evaporate deposition in the Great Kavir Basin, central Iran. Evaporates Through Space and Time. Geological Society, London, Special Publications, 285: 69-85. doi: 10.1144/SP285.5 0305-8719

УДК 550.8.053:658.012.45

О двух способах расчётного определения объёмной массы сильвинитовых руд по их химическому составу на примере Талицкого участка Верхнекамского месторождения

В.И. Набиуллин

Открытое акционерное общество «Камский научно-исследовательский институт комплексных исследований глубоких и сверхглубоких скважин» (ОАО «КамНИИКИГС»), 614016, Пермь, ул. Краснофлотская, 15

E-mail: kamniiikigs@inbox.ru

(Статья поступила в редакцию 26 марта 2015 г.)

Рассмотрены два способа расчётного определения объёмной массы сильвинитовых руд по их химическому составу. Первый способ основан на пересчёте компонентного состава сильвинитов на минеральный и получении расчётной формулы объёмной массы, учитывающей теоретическую плотность входящих в состав руды минералов. Особенностью метода является необходимость корректировки результатов путём умножения на постоянный поникающий коэффициент K с целью устранения систематического завышения расчётных величин объёмной массы по отношению к лабораторным определениям. Для решения той же задачи автором предложен второй способ – метод множественной линейной регрессии. Метод позволяет обосновать расчётную формулу объёмной массы напрямую через данные о химическом составе руд без промежуточных довольно громоздких пересчётов химического состава на минеральный. Особенно важно, что метод не требует последующей корректировки результатов вычислений ввиду отсутствия систематических расхождений между экспериментальными и расчётными величинами объёмной массы.

Ключевые слова: *объёмная масса, сильвинитовые руды, химический состав, расчётные и экспериментальные величины, множественная регрессия.*

DOI: 10.17072/psu.geol.27.63

При подсчёте запасов калийных и калийно-магниевых солей на Верхнекамском месторождении (ВКМС) с 1958 г. применяется расчётный способ определения объёмной массы полезных ископаемых по данным об их химическом составе, что соответствует методическим рекомендациям ГКЗ, в том числе и действующим [4]. При этом в отношении солей

разного состава применяются разные методики расчётов. В частности, для определения объёмной массы сильвинитов используются данные о содержании только главного компонента KCl и регрессионный способ расчётов по уравнениям простой среднеквадратической регрессии вида

$$d_{\text{лаб.}} = a - b \cdot C_{\text{KCl}}, \quad (1)$$

которые отражают зависимость лабораторных определений объёмной массы образцов сильвинитов d_{lab} от содержаний в них хлористого калия (C_{KCl}).

Для вычисления объёмной массы карналлитовых пород и смешанных солей используются данные о содержании трёх компонентов KCl, NaCl и MgCl₂ и метод пересчёта химического состава солей на минеральный с последующим определением массы входящих в состав руды минералов пропорционально их содержанию и минералогической плотности. На действующих рудниках ВКМС объёмные массы калийно-магниевых руд рассчитываются теми же способами.

В 2005 г. при рассмотрении ТЭО разведочных кондиций по Соликамскому и Ново-Соликамскому участкам детальной разведки ВКМС экспертная комиссия ГКЗ Роснедра рекомендовала разработать единую для всех типов солей методику расчётного определения объёмной массы по данным об их химическом составе. Эта рекомендация была выполнена в 2006 г. в рамках переоценки запасов по Соликамскому, Ново-Соликамскому и Быгельско-Троицкому участкам, после апробации в ГКЗ была рекомендована к применению на других участках ВКМС. В представленной статье проанализированы результаты применения данной методики для расчётного определения объёмной массы сильвинитовых руд Талицкого участка ВКМС.

Методика 2006 г. является развитием ранее применявшегося метода пересчёта химического состава солей на минеральный и отличается увеличением количества компонентов, учитываемых при определении объёмной массы, с трёх до пяти (KCl, NaCl, MgCl₂, CaSO₄ и нерастворимый в воде остаток H.O.).

Метод базируется на следующей формуле теоретической объёмной массы руд, в которой используется соотношение сумм масс и объёмов минералов, входящих в природную многокомпонентную минеральную систему:

$$d_{theor} = \frac{\sum m_i}{\sum V_i} = \frac{\sum (m_0 \cdot C_i)}{\sum \frac{(m_0 \cdot C_i)}{d_i}} = \frac{\sum C_i}{\sum \frac{C_i}{d_i}}, \quad (2)$$

где d_{theor} – теоретическая минералогическая объёмная масса пробы; m_i , V_i , C_i , d_i – соответственно масса, объём, содержание и минералогическая плотность i -го минерала; m_0 – масса пробы.

К числу основных минералов, от которых зависит объёмная масса солей ВКМС, авторы методики относят сильвин, карналлит, галит, ангидрит и комплекс минералов нерастворимого в воде остатка H.O. На Талицком участке в состав последнего входят кварц, полевые шпаты, глинистые минералы, сульфаты и карбонаты.

Пересчёт химического состава солей на минеральный для сильвина и карналлита производится с использованием стехиометрических соотношений по MgCl₂ [5]

$$\begin{aligned} C_{\text{силь}} &= C_{KCl} - C_{MgCl_2} \cdot 0.7830, \\ C_{\text{карн}} &= C_{MgCl_2} \cdot 2.9182, \end{aligned} \quad (3)$$

а для галита, ангидрита и комплекса минералов H.O. – по формулам:

$$\begin{aligned} C_{\text{гал}} &= C_{NaCl}, & C_{\text{анг.}} &= C_{CaSO_4}, \\ C_{\text{комп.Н.О.}} &= C_{H.O.}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $C_{\text{силь}}$, $C_{\text{карн}}$, $C_{\text{гал}}$, $C_{\text{анг}}$ и $C_{\text{комп.Н.О.}}$ – расчётные содержания сильвина, карналлита, галита, ангидрита и комплекса минералов H.O., % масс.; C_{KCl} , C_{MgCl_2} , C_{NaCl} , C_{CaSO_4} , $C_{H.O.}$ – содержания соответствующих компонентов солей, % масс.

Для вычислений по формуле (2) методикой рекомендованы следующие значения плотности (г/см³): сильвина – 1.989, карналлита – 1.60, галита – 2.16, ангидрита – 3.00, комплекса минералов нерастворимого в воде остатка – 2.70.

С учетом указанных значений плотности минералов и соотношений (3-4) формула (2) для определения теоретической минералогической объёмной массы солей ВКМС приводится к виду:

$$d_{meop} = \frac{C_{\text{сил}} + C_{\text{карн}} +}{\frac{C_{\text{сил}}}{1.989} + \frac{C_{\text{карн}}}{1.60} +} \\ + \frac{C_{\text{каар}} + C_{\text{анн}} + C_{\text{комп.Н}_2\text{O}}}{\frac{C_{\text{каар}}}{2.16} + \frac{C_{\text{анн}}}{3.00} + \frac{C_{\text{комп.Н}_2\text{O}}}{2.70}} \quad (5)$$

или

$$d_{meop} = \frac{(C_{\text{KCl}} - C_{\text{MgCl}_2} \cdot 0.7830) +}{C_{\text{KCl}} - C_{\text{MgCl}_2} \cdot 0.7830 +} \frac{1.989}{+} \\ + \frac{(C_{\text{MgCl}_2} \cdot 2.9182) + C_{\text{NaCl}} + C_{\text{CaSO}_4} + C_{\text{H}_2\text{O}}}{\frac{C_{\text{MgCl}_2} \cdot 2.9182}{1.60} + \frac{C_{\text{NaCl}}}{2.16} + \frac{C_{\text{CaSO}_4}}{3.00} + \frac{C_{\text{H}_2\text{O}}}{2.70}} \quad (6)$$

Для сильвинитовых руд Талицкого участка формула (6) после соответствующих преобразований и без учёта карналлитовой составляющей приобретает вид:

$$d_{meop} = \frac{C_{\text{KCl}} - 0.783 \cdot C_{\text{MgCl}_2} +}{0.5028 \cdot C_{\text{KCl}} - 0.3937 \cdot C_{\text{MgCl}_2} +} \frac{}{} \quad (7) \\ + \frac{C_{\text{NaCl}} + C_{\text{CaSO}_4} + C_{\text{H}_2\text{O}}}{+ 0.463 \cdot C_{\text{NaCl}} + 0.333 \cdot C_{\text{CaSO}_4} + 0.370 \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Следует отметить, однако, что величины теоретической объёмной массы, рассчитанные по формулам (5-7), будут всегда завышены по сравнению с действительной объёмной массой природных типов солей, определенной в лаборатории методом взвешивания ненарушенных образцов солей в жидкости. Причиной этого является то, что в знаменателях формул (2) и (5-6) используется не объёмная масса, а плотность минералов, которая не учитывает влияния пористости, трещиноватости, естественной влажности образцов соли и наличия газовожидких включений. Приводимые в формулах величины минералогической плотности характеризуют исследуемое вещество в плотном состоянии, т.е. только его твёрдую фазу без учёта пор, каверн, трещин и влажности, так как определяются пикнометрическим методом [5] по навеске предварительно измельчённого до крупности менее 0,1 мм и при этом сухого вещества. При определении же объёмной массы испытуемый

образец имеет ту же самую структуру, текстуру, пористость, кавернозность, трещиноватость и влажность, что и в естественных природных условиях (в массиве полезного ископаемого). Поэтому объёмная масса учитывает не только твёрдую фазу вещества, но и наличие жидкой и газообразной составляющих. Для лабораторного определения объёмной массы солей, растворимых в воде, используется метод взвешивания исследуемого образца в керосине (толуоле) или взвешивания предварительно покрытого парафином образца в воде [5].

Для устранения такого систематического завышения рассчитанной объёмной массы по сравнению с лабораторными определениями методикой 2006 г. в формулу (2) введён понижающий коэффициент $K < 1$, который отражает суммарное влияние всех неучтённых факторов: пористости, трещиноватости, естественной влажности, присутствия в солях газово-жидких включений, а также некоторого количества второстепенных и акцессорных минералов. Поэтому для природных типов сырых солей ВКМС формулы (2) и (5-7) приведены к виду:

$$d_{\text{расч.прир.}} = d_{meop} \cdot K, \quad (8)$$

где $d_{\text{расч.прир.}}$ – расчёчная объёмная масса природного типа солей; K – коэффициент, отражающий влияние неучтённых фаз ($K < 1$). При этом коэффициент K рассчитывается через отношение средних значений экспериментальных и вычисленных по формулам (6) и (7) величин объёмной массы солей на основе имеющихся по участку месторождения лабораторных определений, причём величина коэффициента K принимается постоянной по исследуемому участку ($K=const$).

Проанализируем результативность методики 2006 г. на примере сильвинитовых руд Талицкого участка. При детальной разведке участка в 1968–1969 гг. было выполнено 47 лабораторных определений объёмной массы образцов сильвинитов, отобранных из пластов КрIII (2 шт.), КрII (24 шт.), КрI (3 шт.), А (14 шт.) и Б (4

шт.). Исследования проводились методом гидростатического взвешивания проб в очищенном керосине. Однако при сопоставлении экспериментальных и расчётных по формуле (8) величин объёмной массы из этой выборки пришлось исключить данные по 5 аномальным пробам, так как на графике сопоставления двух указанных параметров (рис. 1, Б) точки, соответствующие упомянутым 5 пробам, оказались за пределами области допустимых отклонений для уровня значимости 0.05.

Проведенный корреляционный анализ (таблица) показал наличие тесных и статистически значимых, а в некоторых случаях – очень тесных корреляционных связей изученных шести параметров друг с другом,

кроме содержания $MgCl_2$, которое не коррелируется ни с объёмной массой сильвинитов, ни с содержаниями других компонентов. Корреляционные графики экспериментальных и рассчитанных по формулам (7, 8) величин объёмной массы по 42 образцам сильвинитов отражены на рис. 1, где показаны также теоретические и эмпирические линии регрессии и границы области допустимых отклонений. Последняя ограничена линиями, проведёнными по отношению к теоретической линии $Y=X$ на расстояниях, равных удвоенным относительным среднеквадратическим отклонениям расчётных величин объёмной массы от лабораторных определений, что отвечает уровню значимости 0.05.

Матрица коэффициентов корреляции объёмной массы и содержаний основных компонентов сильвинитовых руд Талицкого участка по изученной выборке

Параметр	Объёмная масса образцов Y	Содержания компонентов					
		KCl	$MgCl_2$	NaCl	$CaSO_4$	H.O.	
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	
Объёмная масса образцов	Y	1.000	-0.913	-0.046	0.903	0.587	0.437
Содержание KCl	X_1	-0.913	1.000	-0.036	-0.990	-0.635	-0.455
Содержание $MgCl_2$	X_2	-0.046	-0.036	1.000	0.009	-0.103	0.166
Содержание NaCl	X_3	0.903	-0.990	0.009	1.000	0.562	0.328
Содержание $CaSO_4$	X_4	0.587	-0.635	-0.103	0.562	1.000	0.586
Содержание H.O.	X_5	0.437	-0.455	0.166	0.328	0.586	1.000

Примечание: объём выборки $N = 42$, $r_{\text{крит. } \alpha=0.05} = |0.303|$. Жирным шрифтом выделены статистически незначимые оценки коэффициентов корреляции

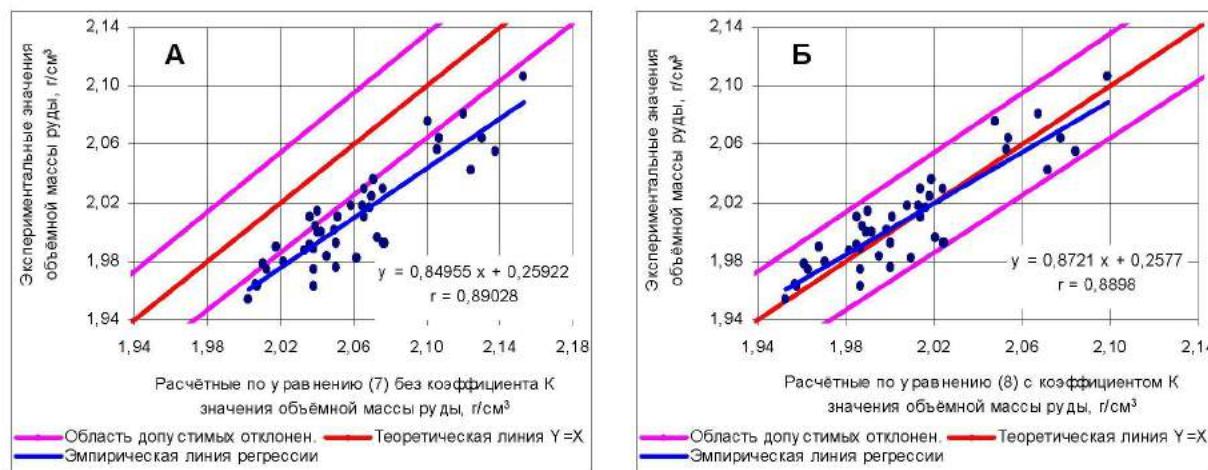


Рис. 1. Графики зависимости экспериментальных и расчётных величин объёмной массы сильвинитов Талицкого участка: А – без коэффициента K , Б – с коэффициентом K

Как видно на рис. 1, А, большинство точек двумерного распределения (34 из

42) оказались за пределами области допустимых отклонений, в то время как при

полном соответствии коррелируемых параметров друг другу все точки должны группироваться в границах доверительного интервала вблизи теоретической линии $Y-X$, проведенной под углом 45° к осям координат. При этом эмпирическая линия регрессии, аппроксимирующая зависимость лабораторных определений объёмной массы от рассчитанных по формуле (7) теоретических значений, отражает, как и следовало ожидать, систематическое и при этом довольно существенное завышение расчётных величин относительно экспериментальных.

Для устранения этого несоответствия теоретические значения объёмной массы откорректированы, согласно методике 2006 г., по формуле (8) путем умножения на постоянный понижающий коэффициент $K=const$, который рассчитан через отношение средних по выборке Талицкого участка экспериментальных и вычисленных по формуле (7) значений объёмной массы сырых сильвинитовых руд: $K = -2.009 : 2.060 = 0.975$. Эта величина сопоставима с аналогичным коэффициентом по соседнему Быгельско-Троицкому участку, где $K = 0.979$. В качестве абсолютной погрешности принято среднеквадратическое отклонение рассчитанных по формуле (8) величин объёмной массы относительно лабораторных данных, что составило $0.017 \text{ г}/\text{см}^3$, относительная погрешность 0.85% . Указанные величины сопоставимы с аналогичными показателями по Быгельско-Троицкому участку – $0.015 \text{ г}/\text{см}^3$ и 1.3% .

Как видно на рис. 1, Б, после корректировки расчётных величин объёмной массы с помощью постоянного понижающего коэффициента K данные всех включенных в выборку 42 анализов не выходят за пределы области допустимых отклонений, а эмпирическая линия регрессии очень близка к теоретической линии $Y-X$. Профессором В.Ф. Мягковым в работах [6, 7] показано, что соотношение, подобное случаю, отражаемому графиком рис. 1, Б, свидетельствует о приемлемом уровне случайных погрешностей определения

анализируемого параметра, не превышающем допустимых величин, а также об отсутствии статистически значимых систематических погрешностей.

В отношении анализируемой выборки вывод о допустимом уровне случайных погрешностей подтверждается расчётами F -критерия Фишера, вычисленного по известной методике [1, 2, 3, 8], эмпирическое значение которого ($F_{эмп} = 1.039$) оказалось меньше критического ($F_{крит.0.05} = 1.70$) для уровня значимости 0.05 при количестве степеней свободы $f_1 = f_2 = N - 1 = 41$. Вывод об отсутствии статистически значимой систематической погрешности доказывается сравнением эмпирического значения критерия Стьюдента ($t_{эмп} = 0.30$) с критическим значением ($t_{крит.0.05} = 1.99$) для уровня значимости 0.05 при количестве степеней свободы $f = N_1 + N_2 - 2 = 82$.

Следует отметить, однако, что, судя по графику рис. 1, Б, небольшая систематическая погрешность, хоть и статистически незначимая, в расчётах по формуле (8) всё-таки присутствует. Причём эта погрешность является знакопеременной [6, 7], так как меняет знак относительно точки пересечения теоретической и эмпирической линий регрессии с координатами $d_{pK} = d_s = 2.015 \text{ г}/\text{см}^3$, которая очень близка к центру двумерного распределения (двумерному среднему с координатами $d_{pK} = d_s = 2.009 \text{ г}/\text{см}^3$). На графике рис. 1, Б это выражается в том, что теоретическая и эмпирическая линии регрессии расходятся влево и вправо от точки их пересечения и чем дальше, тем больше. Причем влево от точки пересечения при $d_{pK} < 2.015 \text{ г}/\text{см}^3$ эмпирическая линия регрессии отражает завышение экспериментальной объёмной массы по отношению к теоретической расчётной с коэффициентом K , а вправо (при значениях $d_{pK} > 2.015 \text{ г}/\text{см}^3$), наоборот, занижение.

Следовательно, поправочный коэффициент K в формуле (8) не должен быть постоянным, как предусмотрено методикой 2006 г., а его величина должна зависеть от самих значений рассчитанной по формуле (7) объёмной массы сильвинитов. Что ка-

сается способа определения коэффициента K , принятого обсуждаемой методикой, то он действителен лишь для условий, близких к центру двумерного распределения.

В работах В.Ф. Мягкова [6, 7] справедливо отмечено, что способ сравнения средних значений сопряженных измерений, как и критерий Стьюдента, позволяет оценить систематичность расхождений сравниваемых замеров только в среднем и поэтому отражает лишь статику изучаемого явления, но не учитывает его динамики, т.е. того, как изменяются систематические погрешности в зависимости от самих значений измеренного свойства. Этого недостатка лишён регрессионный метод обработки результатов измерений, который позволяет регулировать размер вводимых поправок с помощью уравнения регрессии в зависимости от величины самих замеров [6, 7]. При этом регрессионный способ помогает обнаружить систематические погрешности даже в тех случаях, когда при сравнении средних они просто не выявляются, как в рассматриваемом случае с объёмной массой сильвинитов, когда систематические погрешности меняют знак относительно точки пересечения теоретической и эмпирической линий регрессии, а положительные и отрицательные отклонения эмпирических значений от теоретических взаимно компенсируют друг друга.

Для устранения отражаемых графиком рис. 1, Б статистически незначимых систематических расхождений экспериментальных и рассчитанных по формуле (8) значений объёмной массы сильвинитов необходимо использовать уравнение регрессии, показанное на графике рис. 1, А. Другими словами, для Талицкого участка при расчётах объёмной массы сырых сильвинитовых руд $d_{\text{расч.прир.испр.}}$ правильнее использовать не формулу (8), а уравнение

$$d_{\text{расч.прир.испр.}} = 0.84955 \cdot d_{\text{теор.}} + 0.25922, \quad (9)$$

где $d_{\text{теор.}}$ – теоретическая минералогическая объёмная масса, рассчитанная по формуле (7) на основе данных о химическом составе руд.

Как видно на рис. 2, отражающем ре-

зультаты такой корректировки, введение поправок по уравнению (9) в расчёты объёмной массы сильвинитов позволило полностью устраниТЬ не только систематическое завышение расчётных по формуле (7) величин по отношению к экспериментальным данным (рис. 1, А), но и то небольшое статистически незначимое систематическое расхождение экспериментальных и расчётных по формуле (8) значений, которое отражает график на рис. 1, Б. При этом эмпирическая линия регрессии на рис. 2 полностью совпала с теоретической линией $Y=X$. Кроме того, с помощью уравнения (9) удалось немного уменьшить размер среднеквадратических отклонений откорректированных расчётных величин от лабораторных определений объёмной массы: абсолютных – с 0.017 до 0.016 г/см³, относительных – с 0.85 до 0.80 %. На рис. 2 это выражено как небольшое уменьшение ширины доверительного интервала по сравнению с рис. 1.

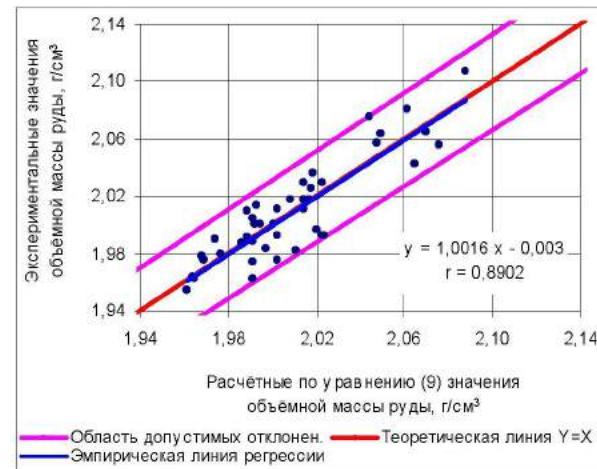


Рис. 2. График корреляции экспериментальных и расчётных по уравнению (9) значений объёмной массы сильвинитовых руд Талицкого участка

Отметим при этом, что расчёты по уравнению (9) равносильны использованию в уравнении (8) не постоянного понижающего коэффициента $K=const$, равного отношению средних по выборке экспериментальных и вычисленных по формуле (7) величин объёмной массы сильвинитов, а динамического коэффициента $K_{\text{дин.}}$, равного отношению

$$K_{\text{дин.}} = \frac{0.84955 \cdot d_{\text{меп.}} + 0.25922}{d_{\text{меп.}}} = \\ = 0.84955 + \frac{0.25922}{d_{\text{меп.}}} \quad (10)$$

Как следует из формулы (10) и рис. 3, величина динамического понижающего коэффициента $K_{\text{дин.}}$ практически функционально зависит от рассчитанных по формуле (7) значений объёмной массы сильвинитов, что и обуславливает фактически полное устранение систематических расхождений рассматриваемых величин.

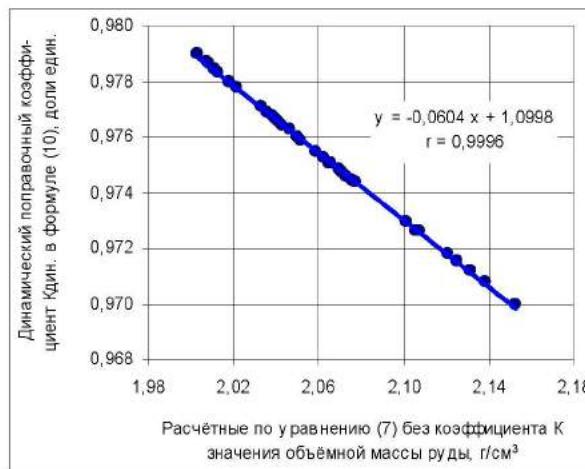


Рис. 3. Зависимость динамического поправочного коэффициента $K_{\text{дин.}}$ в формуле (10) от значений рассчитанной по формуле (7) объёмной массы руд

Как видим, предусмотренный методикой 2006 г. расчётный способ определения объёмной массы сильвинитовых руд характеризуется, во-первых, громоздкостью пересчётов по уравнению (7) компонентного состава руд на минеральный, во-вторых, необходимостью корректировки результатов с помощью постоянного для данного объекта поправочного коэффициента K . Однако этот коэффициент не устраняет полностью систематических расхождений экспериментальных и вычисленных по формуле (7) величин.

Указанных недостатков лишён регрессионный метод, который позволяет рассчитать объёмную массу с помощью уравнения множественной линейной регрессии напрямую через данные о химическом

составе сильвинитовых руд без промежуточных пересчётов их компонентного состава на минеральный. При этом очень важно, что регрессионный метод не требует последующей корректировки результатов вычислений, так как при его использовании систематические расхождения между экспериментальными и расчётыми величинами объёмной массы просто отсутствуют. Проанализируем результативность этого способа на примере Талицкого участка.

Множественная линейная регрессия вида

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i \cdot X_i \quad (11)$$

строится на основе учёта всех возможных взаимодействий между переменными и их сочетаниями [1-3, 8-11]. Оценка общего вклада независимых переменных X_i в изменчивость зависимой переменной Y производится с помощью коэффициента множественной корреляции $r_{\text{мн.}}$, а оценка относительного влияния каждой независимой переменной X_i – с помощью коэффициентов регрессии a_i . Такое уравнение наилучшим образом (в смысле метода наименьших квадратов) описывает тенденцию распределения исходных данных в m -мерном пространстве признаков и позволяет оценить совместное влияние на зависимую переменную всех анализируемых независимых параметров [2-3, 10-11].

Для расчётов коэффициента множественной корреляции и коэффициентов множественной регрессии по выборке из тех же 42 лабораторных определений объёмной массы сырых сильвинитовых руд Талицкого участка использована матрица парных коэффициентов корреляции между изученными шестью параметрами, отражённая в представленной выше таблице. В качестве независимых переменных X_1, X_2, \dots, X_5 приняты содержания основных компонентов $\text{KCl}, \text{MgCl}_2, \text{NaCl}, \text{CaSO}_4$ и H_2O по данным химических анализов изученных образцов сильвинитовых руд, а в качестве зависимой переменной Y – их объёмная масса.

Оценка коэффициента множественной корреляции рассчитана по формуле [1, 3]

$$r_{mn} = r_{y(x_1, x_2, \dots, x_5)} = \sqrt{1 - \frac{|R|}{A_{yy}}}, \quad (12)$$

где $|R|$ – определитель матрицы $[R]$ парных коэффициентов корреляции, представленной в таблице, A_{yy} – алгебраическое дополнение зависимой переменной Y с самой собой.

Коэффициенты множественной регрессии a_i и a_0 определены по формулам [1, 3]

$$a_i = -\frac{A_{yx_i} \cdot (-1)^k}{A_{yy}} \cdot \frac{S_y}{S_{x_i}}, \quad (13)$$

$$a_0 = \bar{Y} - a_1 \cdot \bar{X}_1 - a_2 \cdot \bar{X}_2 - \\ - a_3 \cdot \bar{X}_3 - a_4 \cdot \bar{X}_4 - a_5 \cdot \bar{X}_5, \quad (14)$$

где $A_{yx_1}, A_{yx_2}, \dots, A_{yx_5}$ – алгебраические дополнения зависимой переменной Y с независимыми переменными X_1, X_2, \dots, X_5 , S_y и S_{x_i} – стандартные отклонения соответствующих переменных, \bar{Y} , $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_5$ – выборочные оценки средних значений этих переменных.

Алгебраические дополнения $A_{yy}, A_{yx_1}, A_{yx_2}, \dots, A_{yx_5}$ рассчитаны, согласно методике [1, 3], как детерминанты вспомогательных матриц парных коэффициентов корреляции размерами на единицу меньше исходной, т.е. 5×5 . Эти матрицы получены из исходной матрицы 6×6 в представленной выше таблице путём удаления той её строки и того столбца, которые соответствуют индексам алгебраического дополнения. Так, для расчётов A_{yy} требуемая матрица составлена путём удаления первой строки и первого столбца матрицы $[R]$, а для расчётов $A_{yx_1}, A_{yx_2}, A_{yx_3}, A_{yx_4}, A_{yx_5}$ – путём удаления первой строки и соответственно второго, третьего, четвёртого, пятого и шестого столбцов.

Требуемые детерминанты вычислены с помощью библиотеки встроенных функций в программе MS Excel 2003. При этом знаки алгебраических дополнений в фор-

муле (13) определяются множителем $(-1)^k$, где k – сумма номера строки и номера столбца исходной матрицы $[R]$. Поскольку алгебраические дополнения в формуле (13) относятся к одной и той же первой строке исходной матрицы и отличаются только номерами столбцов, то множитель $(-1)^k$ будет равен +1 для столбцов с нечётным номером и -1 для столбцов с чётным номером.

Рассчитанное по данным исходной матрицы $[R]$ значение множественного коэффициента корреляции для выборки из 42 лабораторных определений объёмной массы составило $r_{mn} = 0.922$, что свидетельствует об очень тесной множественной корреляционной связи объёмной массы сырьих сильвинитовых руд Талицкого участка с содержаниями выбранных пяти компонентов. Наличие статистически значимой множественной корреляционной связи подтверждается сравнением эмпирического значения F -критерия Фишера $F_{эмп} = 52.6$ с теоретическим для 5 %-ного уровня значимости $\alpha_{0.05}$ при числе степеней свободы $f_1 = N - m = 42 - 5 = 37$ и $f_2 = m - 1 = 5 - 1 = 4$, которое равно $F_{теор.0.05} = 5.74$. Так как $F_{эмп} >> F_{теор.}$, то нулевая гипотеза о равенстве коэффициента корреляции нулю отвергается и связь считается статистически значимой.

Рассчитанное уравнение множественной регрессии для определения объёмной массы сырьих сильвинитовых руд Талицкого участка по данным химических анализов о содержаниях пяти основных компонентов имеет вид:

$$d_{расч.сыр.} = 0.02062 \cdot C_{KCl} + \quad (15) \\ + 0.01255 \cdot C_{MgCl_2} + 0.02252 \cdot C_{NaCl} + \\ + 0.02058 \cdot C_{CaSO_4} + 0.02363 \cdot C_{H_2O} - 0.12046,$$

где $d_{расч.сыр.}$ – расчётная объёмная масса сырьих сильвинитовых руд ($\text{г}/\text{см}^3$), C_{KCl} , C_{MgCl_2} , C_{NaCl} , C_{CaSO_4} , C_{H_2O} – содержания основных компонентов сильвинитов по данным их химического состава (% масс.).

График корреляции лабораторных определений и рассчитанных по формуле (15) величин объёмной массы сырьих силь-

винитовых руд Талицкого участка приведён на рис. 4, который свидетельствует об очень хорошей сходимости сопоставляемых параметров: коэффициент корреляции равен 0.9218 при критическом значении $r_{крит.0,05} = 0.303$ для уровня значимости 0,05. При этом соотношение дисперсии тренда [8] ($S_{mp}^2 = 0.001051$), описываемого уравнением (15), и остаточной дисперсии ($S_\delta^2 = 0.000185$) в относительных величинах составляет 85 % и 15 %, т.е. предложенное уравнение (15) учитывает 85 % общей дисперсии ($S_y^2 = 0.001236$) зависимой переменной Y . Поэтому оно вполне может использоваться для прогнозирования объёмной массы сырьих сильвинитовых руд Талицкого участка по данным об их химическом составе.

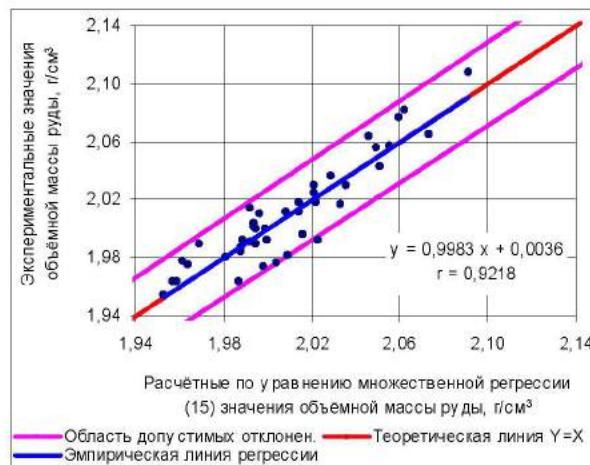


Рис. 4. График корреляции экспериментальных и расчётных по уравнению множественной регрессии (15) значений объёмной массы сырьих сильвинитовых руд Талицкого участка

Проведённое сопоставление результатов расчётов объёмной массы сырьих сильвинитовых руд Талицкого участка двумя способами (по откорректированной с помощью уравнения (9) методике 2006 г. и методом множественной регрессии по уравнению (15)) показало их очень хорошую сходимость (рис. 5): график корреляции демонстрирует очень тесную корреляционную связь между результатами расчётов ($r = 0.962$). При этом угловой коэффициент эмпирической линии регрессии

приближается к единице, а сама линия регрессии – к теоретической линии $Y=X$.

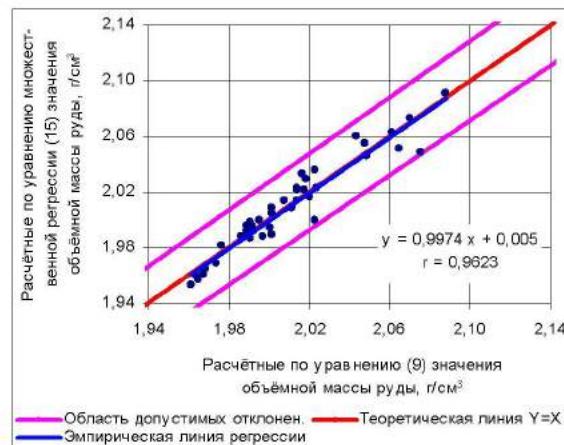


Рис. 5. График корреляции величин объёмной массы сырьих сильвинитовых руд Талицкого участка, рассчитанных по уравнению (9) и уравнению множественной регрессии (15)

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о предпочтительности предложенного способа определения объёмной массы сильвинитовых руд по уравнению множественной регрессии (15), т.е. напрямую через данные о химическом составе сильвинитов без промежуточных пересчётов компонентного состава солей на минеральный.

Важно отметить, что метод множественной регрессии не требует последующей корректировки результатов вычислений ввиду отсутствия систематических расходжений между экспериментальными и расчётыми величинами объёмной массы.

В заключение следует отметить, что вычисления объёмной массы сильвинитов по формуле (1) (т.е. как функции от содержаний только главного компонента KCl) с коэффициентами регрессии, принятыми при подсчёте запасов Талицкого участка в 1969 г. ($a = 2.135$ и $b = 0.0018$), также характеризуются систематическим завышением расчёты по формуле (1) величин объёмной массы по сравнению с лабораторными определениями. Это хорошо видно на рис. 6, А, где приведены данные по выборке из тех же 42 определений объёмной массы сильвинитов, как и на

графиках рис. 1 и 2. Такое расхождение связано с недостаточной точностью вычисления коэффициентов регрессии a и b в 1969 г. Этот вывод подтверждается тем, что после выполненных нами уточнённых расчётов объёмной массы сильвинитов по той же формуле (1), но с откорректированными коэффициентами $a = 2.1286$ и $b = 0.00188$, систематическое расхождение экспериментальных и расчётных величин объёмной массы было устранено полностью, что отражает график на рис. 6, Б.

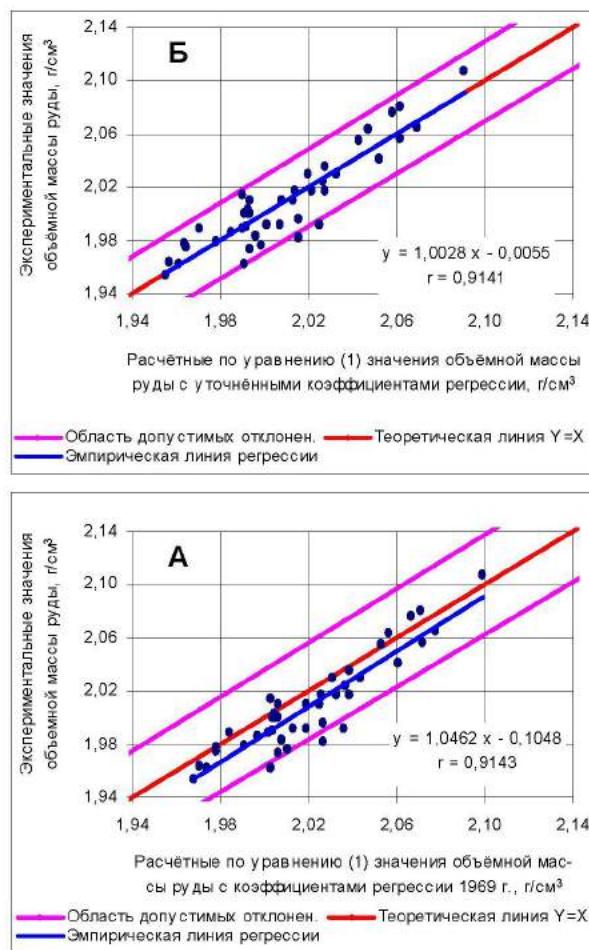


Рис. 6. Графики зависимости экспериментальных и расчётных по уравнению (1) значений объёмной массы сильвинитов Талицкого участка: А – с учётом коэффициентов регрессии 1969 г., Б – с учётом откорректированных коэффициентов регрессии

При этом среднеквадратические отклонения откорректированных расчётов величин от лабораторных определений объёмной массы уменьшились по отношению

к данным 1969 г.: абсолютное – с 0.018 до 0.014 г/см³, относительное – с 0.90 до 0.70 %.

Анализ рис. 2 и рис. 6, Б свидетельствует о том, что результаты расчётов объёмной массы сильвинитов по методике 2006 г., учитывающей изменение содержаний пяти компонентов и откорректированной с помощью уравнения (9) (рис. 2), вполне сопоставимы с определениями объёмной массы по более простой зависимости (1) как функции от содержаний только главного компонента KCl (рис. 6, Б).

Однако для Талицкого участка более предпочтительным является либо метод множественной регрессии (рис. 4), либо откорректированная нами по уравнению (9) методика 2006 г. (рис. 2), так как основные пласти АБ, КрII и КрIII^{a-b} на этом участке характеризуются отчётливой тенденцией уменьшения содержаний KCl в краевой юго-восточной части залежи при существенном увеличении содержаний Н.O. и NaCl. Кроме того, при подсчёте эксплуатационных запасов всегда учитывается разубоживание полезного ископаемого, которое при разработке Талицкого участка будет происходить за счёт прирезки «коржей» в кровле пластов АБ и КрII, а также примешивания каменной соли в подошве этих пластов из-за локальных расхождений (в связи с мелкой складчатостью) траектории движения добывочных комбайнов и гипсометрии пластов. Поэтому при определении объёмной массы сильвинитов Талицкого участка содержание вредных компонентов Н.O., NaCl и CaSO₄ должно обязательно учитываться. При этом будет обеспечено также единство методики расчётного определения объёмной массы для руд сильвинитового и карналлитового составов.

Библиографический список

- Гуськов О.И., Кушнарёв П.Н., Таранов С.М. Математические методы в геологии: учеб. пособие для вузов. М.: Недра, 1991. 205 с.
- Дэвис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии: пер. с англ. в 2 кн. / пер. В.А. Голубевой / под ред. Д.А. Родионова.

- М.: Недра, 1990. Кн. 1. 319 с.; кн. 2. 427 с.
3. Каждан А.Б., Гуськов О.И. Математические методы в геологии: учебник для вузов. М.: Недра, 1990. 251 с.
 4. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Соли. Утверждены распоряжением Министерства природных ресурсов Российской Федерации № 37-р от 05.06.2007 г. М.: МПР РФ, 2007. 47 с.
 5. Методы анализа рассолов и солей // Тр. ВНИИГ. Вып. XLVII, изд. 3-е, исправл. под ред. Ю.В. Морачевского и Е.М. Петровой. М.; Л.: Химия, 1965. 404 с.
 6. Мягков В.Ф. Геохимический метод парагенетического анализа руд. М.: Недра, 1984. 126 с.
 7. Мягков В.Ф., Быбочкин А.М., Бугаев И.И., Панов Ю.К., Баранников А.Г., Дубейковский С.Г., Козырин А.К., Петруха Л.М. Рудничная геология: учеб. пособие для вузов. М.: Недра, 1986. 199 с.
 8. Поротов Г.С. Математические методы моделирования в геологии: учебник / Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). СПб., 2006. 223 с.
 9. Marriot F.H.C. The interpretation of multiple observations. Academic Press, Inc., Ltd. London, 1974. P. 117.
 10. Morrison D.F. Multivariate statistical methods, 2-nd ed. McGraw-Hill, Inc. New York, 1976. P. 415.
 11. Morrison D.F. Applied statistical methods. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New York, 1983, p. 562.

Two Methods of Calculation of Bulk Weight of Silvinitore Using its Chemical Content: Talitskiy Field, Verkhnekamskoye Deposit

V.I. Nabiullin

JSC «Kamskiy Research Institute of Complex Study of Deep and Superdeep Bo-reholes» (JSC «KamNIKIGS»), 15 Krasnoflotskaya Str., Perm 614016, Russia.
E-mail: kamniikigs@inbox.ru

Two methods of calculation of bulk weight of sylvinitore using information about their chemical composition are discussed in this article. The first method is based on recalculation of the chemical to the mineral content of sylvinitore and uses the formula of bulk weight calculation that incorporates theoretical density of the ore minerals. Disadvantages of this method are: 1) complexity of calculations of bulk weight, 2) significant excess of calculated values over those obtained by laboratory tests and following need of multiplication on reducing constant coefficient K , 3) coefficient K does not correct completely a systematic difference in experimental and calculated data. The second method, proposed by author, is based on use of multiple regression. The method allows working out a formula of bulk weight computation directly from chemical composition data without recalculations of chemical into mineral content. It is especially important that method does not require the correction between experimental and calculation data.

Keywords: *bulk weight, sylvinitore, chemical composition, experimental and calculated data, multiple regression.*

References

1. Guskov O.I., Kushnaryov P.N., Taranov S.M. 1991. Matematicheskie metody v geologii [Mathematical methods in geology]. Sbornik zadach. Uchebnoe posobie dlya vuzov Moskva, Nedra, p. 205. (in Russian)
2. Davies J.S. 1990. Statistics and Data Analysis in Geology. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, p. 656.
3. Kazhdan A.B., Guskov O.I. 1990. Matematicheskie metody v geologii [Mathematical methods in geology]. Uchebnik dlya vuzov Moskva, Nedra, p. 251. (in Russian)

4. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassificatsii zapasov i prognoznykh resursov tsvyordykh poleznykh iskopaemykh. Soli* [Methodical recommendations on application of Classification of reserves and potential mineral resources. Salts]. 2006. No. 37-р. Moskva, Ministerstvo Prirodnykh Resursov RF, p. 47. (in Russian)
5. *Metody analiza rassolov i solej.* [Methods of the analysis of brines and salts]. Vsesoyuznyy Nauchno-Issledovatel'skiy Institut Galurgii (VNIIG). XLVII (3), Eds. Yu.V. Morachevskiy, E.M. Petrova. Moskva-Leningrad, Khimiya, 1965, p. 404. (in Russian)
6. *Myagkov V.F.* 1984. Geokhimicheskii metod parageneticheskogo analiza rud [Geochemical method of the paragenetic analysis of ores]. Moskva, Nedra, p. 126. (in Russian)
7. *Myagkov V.F., Bybochkin A.M., Bugaev I.I.* Panov Yu.K., Barannikov A.G., Dubeykovsky S.G., Kosyrin A.K., Petrukha L.M. 1986. Rudnichnaya geologiya [Ore geology]. Uchebnoe posobie dlya vuzov, Moskva, Nedra, p. 199. (in Russian)
8. *Porotov G.S.* 2006. Matematicheskie metody modelirovaniya v geologii [Mathematical methods of modeling in geology]. Sankt-Peterburg, St. Peterburg gos. gor. Inst., p. 223. (in Russian)
9. *Marriot F.H.C.* 1974. The interpretation of multiple observations. Academic Press, Inc., London, p. 117.
10. *Morrison D.F.* 1976. Multivariate statistical methods, McGraw-Hill, Inc. New York, p. 415.
11. *Morrison D.F.* 1983. Applied statistical methods. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. New York, p. 562.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553. 98. (470. 53)

Геотермические условия газонефтеводоносных комплексов Пермско-Башкирского свода в пределах Пермского края

И.Н. Шестов, И.М. Тюрина, А.Р. Риянова

Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: hydrogeo@psu.ru

(Статья поступила в редакцию 30 марта 2015 г.)

Интерес к геотермическим исследованиям обусловлен общепризнанным значением температуры недр как важнейшего фактора нефтегазообразования, миграции и преобразований подземных флюидов, как одного из важных показателей распределения естественных и искусственных тепловых свойств пород по площади и с глубиной. На территории Пермского края в пределах Пермско-Башкирского свода геотермические исследования осадочного разреза проведены на 251 площади. Рассмотрены особенности изменения геотермических условий с глубиной и по площади. Проведен сравнительный анализ геотермических показателей исследованных площадей: температуры, геотермического градиента, геотермической ступени. По геотермическим показателям выявлены перспективные площади на нефть и газ.

Ключевые слова: *температура, газонефтеводоносные комплексы, геотермический градиент, геотермическая ступень.*

DOI: 10.17072/psu.geol.27.75

Основы геотермии

Геотермия рассматривает закономерности изменения температуры в земной коре и факторы, влияющие на это изменение. Геотермические исследования используются при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых, а также для решения задач геокриологии, гидрогеологии, инженерной геологии, строительства горных предприятий.

В большинстве разделов геологических наук обычно не используются геотемпературные данные. Например, при характеристике осадочных горных пород считается достаточным указать, что они

не подвергались нагреванию до степени перекристаллизации, присущей метаморфическим породам. В гидрогеологии, как правило, определяется проницаемость пород с учетом температуры в отдельных точках пласта и не отражается роль вязкости воды, которая быстро уменьшается с повышением температуры. В противоположность этому геологи-нефтяники изучают проницаемость пород только с учетом их текстуры и, кроме того, вязкости флюидов в идеальных условиях[3].

История геотермических исследований связана с развитием гидрогеологии, геофизики, поисков, разведки и эксплуатации месторождений полезных ископаемых, с

использованием тепла Земли. Геотермические съёмки на суше проводят с конца XIX – начала XX вв., на дне океанов – с серединой XX в. Развитие геотермии в России связано с именами Н. И. Дьяконо娃, И. Д. Дергунова, А. Н. Тихонова, Е. А. Любимовой, Ф. А. Макаренко и др.; за рубежом – Э. Булларда (Великобритания), Ф. Берча (США), Ж. Гогеля (Франция), С. Уэда (Япония) и др. [6, 10].

Распределение теплового поля в верхней части земной коры неравномерно. Это обусловлено рядом причин: литологическим составом пород, тектоникой, характером движения подземных вод, степенью концентрации радиоактивных элементов. Существенную роль играют и локальные источники тепла, связанные с теми или иными физическими, физико-химическими или термодинамическими процессами. Тепловое поле Земли также находится под воздействием Солнца и космоса. Это воздействие выражается в непосредственном влиянии температурных волн на земную поверхность.

Для изучения теплового поля Земли или отдельных его участков необходимо знание геотермических параметров. К этим параметрам относятся: 1) абсолютное значение температуры в фиксированной точке земной коры; 2) геотермический градиент, 3) геотермическая ступень; 4) тепловой поток; 5) теплопроводность горных пород или тепловое сопротивление[5, 7].

Температура. Это физическая величина, которая наряду с давлением и объемом является основной характеристикой термодинамического состояния газожидкостной системы, заключенной в поровом пространстве горных пород. Изучение теплового поля Земли сводится в основном к изучению пространственно-временного изменения температуры.

Геотермический градиент. Это прирост температуры в °С на единицу глубины в направлении к центру Земли. Величина геотермического градиента зависит от геологического строения конкретных регионов, теплопроводности горных по-

род и других геолого-гидрогеологических факторов [1].

На исследуемой территории геотермический градиент варьирует от 0,41 град/100 м (скв. №16 Полазненской площади; верхневизейско-башкирский карбонатный комплекс, вскрыта нефть) до 3,33 град/100 м (скв. №37 Павловской площади; верхневизейско-башкирский карбонатный комплекс, вскрыта вода). Среднее значение – 1,72 град/100 м.

Геотермическая ступень. Это расстояние в метрах, при углублении на которое температура пород закономерно повышается на 1°C.

Для более точной характеристики геотермической ступени необходимо иметь замеры температуры по всему стволу скважины. Такие данные позволяют вычислить величину геотермической ступени в различных интервалах разреза, а также определить геотермический градиент.

Среднее значение геотермической ступени на исследуемой территории составляет 61,28 м/град. Максимальное значение – 144 м/град (скв. №16 Полазненской площади; верхневизейско-башкирский карбонатный комплекс, вскрыта нефть), минимальное – 30 м/град (скв. №37 Павловской площади; верхневизейско-башкирский карбонатный комплекс, вскрыта вода).

Тепловой поток и коэффициент теплопроводности. Известно, что передача тепла происходит при наличии разности температуры в каких-либо участках. тепло передается от мест с большей температурой к местам с меньшей температурой по нормали к изотермической поверхности.

Тепловой поток, наблюдаемый у поверхности Земли, несет информацию о строении земных недр и процессах, происходящих на больших глубинах. Зная величину теплового потока, мощности чередующихся слоев и их теплопроводность, можно восстановить соответствующий ход изменения температуры с глубиной.

Таким образом, для полного представления о величине теплового поля необходимо знание всех геотермических параметров в комплексе с геофизическими, геологическими и гидродинамическими данными. Качество геотермических параметров определяется степенью точности их измерений, а степень точности зависит от методики исследований [1].

Характеристика гидрогеологических условий

Изучаемая территория относится к Восточно-Русскому бассейну пластовых вод. Подземные воды приурочены к двум гидрогеодинамическим этажам: верхнему и нижнему, границей между которыми является региональный иренский водоупор.

В зоне весьма затрудненного водообмена палеозойского разреза выделяют следующие газонефтеводоносные комплексы: верхнекаменноугольно-нижнепермский комплекс преимущественно карбонатных пород, московский карбонатно-терригенный, верхневизейско-башкирский карбонатный, нижнесредневизейский терригенный, верхнедевонско-турнейский карбонатный, средневерхнедевонский терригенный [8].

Подземные воды газонефтеводоносных комплексов платформенной части региона: рассолы Cl-Na-Ca и Cl-Na состава, минерализация до 250–300 г/дм³ [7].

Запасы нефти месторождений, которые расположены на указанном своде, сосредоточены в основном в каменноугольных отложениях: на долю этих отложений приходится около 46 % всех запасов [4].

Таблица 1. Приуроченность нефтяных месторождений Пермско-Башкирского свода к тектоническим структурам

Структура III порядка	Структура IV порядка	Месторождение нефти
Пермская вершина	Межевская валообразная зона	Архангельское, Кузнецковское, Межевское, Попланенское, Шеметинское, Южно-Межевское
	Краснокамский вал	Краснокамское, Северокамское
	Каменноложская валообразная зона	Анельское, Ярино-Каменноложское
Бабкинская седловина	Осинский вал	Беляевское, Осинское, Тулвинское
	Лобановская валообразная зона	Баклановское, Горское, Лобановское
	Батыrbайский выступ	Батыrbайское
	Сосновский выступ	Алтайское, Красносельское, Кулигинское, Сосновское, Софоницкое, Стретенское, Сыповское, Чайкинское
Башкирская вершина	Москудинский вал	Москудинское
	Куединский вал	Альняшское, Аряжское, Быркинское, Гондыревское, Красноярско-Куединское, Шагиртско-Гожанское
	Татышлинский выступ	Калмиярское, Южинское
	Дубовогорская терраса	Дубовогорское, Кряжевское, Ракинское, Степановское, Хатымское, Ямское
	Чернушинская валообразная зона	Атерское, Камышловское, Кисловское, Новосминское, Одинцовское, Павловское, Судановское, Этышское, Южно-Чернушинское, Чарское
	Капканская зона поднятий	Капканское, Самойловское
	Таныпский атолл	Аспинское, Таныпское, Тартинское
	Дороховский вал	Бурцевское, Дороховское, Каменское, Токаревское

Характеристика геотермических условий газонефтеводоносных комплексов

На территории Пермского края Пермско-Башкирский свод представлен своей северной частью, четко выделяющейся на геологической карте по отсутствию татарских отложений. Он состоит из Пермской и Башкирской вершин, разделенных Бабкинской седловиной.

Пермско-Башкирский свод относится к Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, Пермско-Башкирской нефтеносной области [9]. Свод имеет размеры 120 x 400 км. Породы фундамента не вскрыты. На востоке свод ограничивается Предуральским прогибом, а на западе отделяется от Татарского свода Бирской седловиной. Пермско-Башкирский свод является одной из основных зон нефтегазонакопления Урало-Поволжья [2].

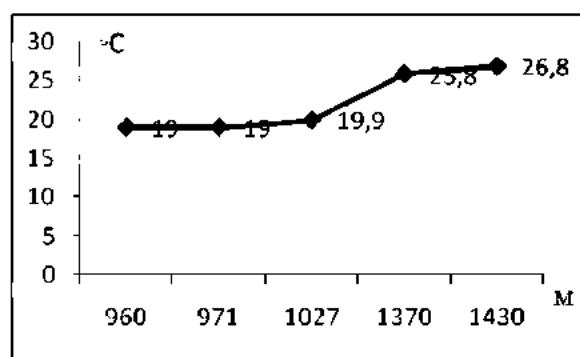


Рис. 1. График изменения температуры по мере увеличения глубины (скважина I Дубовогорской площади)

Большая часть нефтяных месторождений Пермского края расположена на Пермско-Башкирском своде, в пределах которого выделяется ряд структур второго порядка (табл. 1). Почти на всех структурах установлены залежи нефти.

К наиболее крупным месторождениям исследуемого свода относятся Красноярско-Куединское, Кулигинское, Осинское, Павловское, Северокамское месторождения.

Геотермические условия изучены по 133 скважинам с замерами глубин и геотермических показателей: температуры,

геотермического градиента и геотермической ступени.

При изучении геотермических условий газонефтеводоносных комплексов свода был использован графический метод обработки данных (рис. 1, 2).

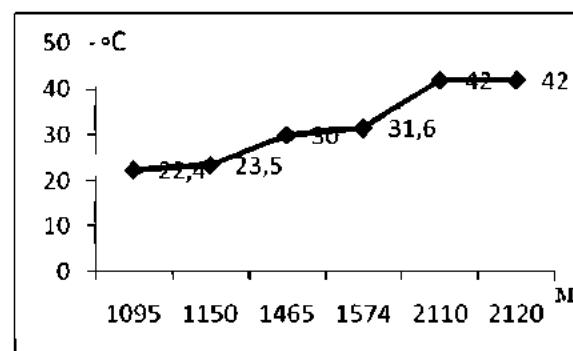


Рис. 2. График изменения температуры по мере увеличения глубины (скважина 38 Красноярской площади)

Для освещения геотермических условий территории свода были использованы результаты наиболее качественных замеров. Составленные графики изменения температуры по мере увеличения глубины представляют собой плавные кривые (рис. 1, 2). Температура увеличивается с глубиной без резких отрицательных или положительных аномалий. Это говорит о сравнительно однородном литологическом составе пород. Иногда наблюдаются резкие скачки с быстрым нарастанием температур. Такие изменения температуры характерны для районов нефтяных месторождений.

В пределах Пермско-Башкирского свода изучены геотемпературные условия московского, верхневизейско-башкирского, нижне-средневизейского, верхнедевонско-турнейского и средне-верхнедевонского ГНВК.

Московский карбонатно-терригенный ГНВК. На исследуемой территории комплекс изучен на 3 площадях (Батыrbайской, Павловской и Шагиртской). Средняя температура составляет 19,1°C. Температуры, превышающие фоновую, зафиксированы в скважинах №79 Батыrbайской площади и №110 Шагиртской площади. В

обеих скважинах обнаружена нефть. Геотермическая ступень изменяется в пределах от 47,33 м/град до 63,8 м/град. Геотермический градиент изменяется в пределах от 1,83 град/100 м до 2,2 град/100 м.

Верхневизейско-башкирский карбонатный ГНВК. На территории Пермско-Башкирского свода комплекс распространен повсеместно. Средняя температура равна 22,2°C. В большинстве скважин, в которых значения температуры превышают среднее значение, выявлена нефть. Геотермическая ступень изменяется в пределах от 30 м/град (скв. №37 Павловской площади) до 244 м/град (скв. №16 Полазненской площади). Геотермический градиент варьирует в пределах от 0,41 град/100 м (скв. №16 Полазненской площади) до 3,33 град/100м (скв.№37 Павловской площади).

Нижне-средневизейский терригенный ГНВК. Комплекс встречен на 20 площадях Пермско-Башкирского свода. Среднее значение температуры равно 20,9°C. В большинстве скважин, в которых температура превышает фоновое значение, вскрыта нефть. Максимальный геотермический градиент равен 2,11 град/100м (скв. №52 Таныпской площади), минимальный – 1,4 град/100 м (скв. №59 Кулигинской площади). Максимальная геотермическая ступень равна 71,36 м/град (скв. №59 Кулигинской площади), минимальная – 47,3 м/град (скв. №52 Таныпской площади). В обеих скважинах обнаружена нефть.

Верхнедевонско-турнейский карбонатный ГНВК. Комплекс распространен повсеместно. Среднее значение температуры равно 26,6°C. Почти во всех скважинах, где зафиксированы значения температуры, превышающие фоновое, обнаружена нефть. По сравнению с другими комплексами температура пород более высокая. Значения геотермического градиента колеблются от 0,98 град/100 м (скв. №301 Краснокамской площади) до 2,92 град/100м (скв. №101 Шагиртской площади). Значения геотермической ступени изменяются от 34,2 м/град (скв. №101 Шагиртской площади) до 102 м/град (скв. №301 Краснокамской площади). В обеих скважинах обнаружена нефть.

Средне-верхнедевонский терригенный ГНВК. Комплекс изучен на 5 площадях. Среднее значение температуры равно 35,5°C. Максимальный геотермический градиент равен 1,72 град/100 м (скв. №2 Дороховской площади), минимальный – 1 град/100 м (скв. №2 Дороховской площади). Максимальная геотермическая ступень равна 100 м/град (скв. №2 Дороховской площади), минимальная – 61,47 м/град (скв. №2 Рассветовской площади).

При изучении геотермических условий комплексов в пределах отдельных площадей проведен сравнительный анализ геотермических показателей: температуры, геотермического градиента и геотермической ступени. Установлено, в основном, повсеместное возрастание средней и максимальной температур с глубиной (табл. 2).

Таблица 2. Сравнительная геотермическая характеристика газонефтоводоносных комплексов Пермско-Башкирского свода

Газонефтоводоносный комплекс	Средняя температура, °C	Максимальная температура, °C
Московский карбонатно-терригенный	19,1	24,0
Верхневизейско-башкирский карбонатный	22,2	41,0
Нижне-средневизейский терригенный	20,9	37,0
Верхнедевонско-турнейский карбонатный	26,6	54,6
Средне-верхнедевонский терригенный	35,5	41,0

Превышение температуры над средней в некоторых скважинах зависит от раз-

личных факторов: тектонического строения, литологии, условий залегания, глуби-

бины. Во многих скважинах, где наблюдаются температурные аномалии, вскрыта нефть.

С увеличением глубины увеличивается и значение градиента. Выявлена тесная взаимосвязь геотермических показателей: максимальный градиент соответствует минимальной ступени, а минимальный

градиент – максимальной ступени. Такое соотношение характерно для текtonически-активных зон нефтегазонакопления – структур, заполненных углеводородами. Это подтверждается нижеперечисленными скважинами, в которых обнаружена нефть (табл. 3).

Таблица 3. Изменение геотермических градиентов и ступеней газонефтеводоносных комплексов в пределах Пермско-Башкирского свода

Газонефтеводоносный комплекс	Максимальный градиент, град/100 м	Минимальная ступень, м/град	Минимальный градиент, град/100 м	Максимальная ступень, м/град
Московский карбонатно-терригенный	2,2	47,33	1,83	63,8
	скв. №79 Батырбайской площади		скв. №110 Шагиртской площади	скв. №274 Павловской площади
Верхневизейско-башкирский карбонатный	3,33	30	0,41	144
	скв. №37 Павловской площади		скв. №16 Полазненской площади	
Нижне-средневизейский терригенный	2,11	47,3	1,4	71,36
	скв. №52 Таныпской площади		скв. №59 Кулигинской площади	
Верхнедевонско-турнейский карбонатный	2,92	34,2	0,98	102
	скв. №101 Шагиртской площади		скв. №301 Кулигинской площади	
Средне-верхнедевонский терригенный	1,72	61,47	1,0	100
	скв. №2 Дороховской площади	скв. №2 Рас-световской площади	скв. №2 Дороховской площади	

Собранные и обработанные материалы позволили составить схематические геотермические карты нижне-средневизейского терригенного и верхнедевонско-турнейского карбонатного комплексов. Схематические геотермические карты характеризуют геотемпературный режим на глубине 1000–1500 м. На картах обозначены геотермические градиенты и ступени изучаемых площадей, по величине температур построены геоизотермы.

Нижне-средневизейский терригенный ГНВК. Глубина замеров температуры составляет 1000 м. Температура варьирует от 16 до 22,4°C. По сравнению с Пермской

вершиной и Бабкинской седловиной на территории Башкирской вершины отмечены более высокие температуры. Максимальное значение температуры (22,4°C) зафиксировано в районе Дубовогорской площади, приуроченной к Дубовогорской террасе (рис. 3).

Верхнедевонско-турнейский карбонатный ГНВК. Глубина замеров температуры составляет 1500 м. Температура более высокая по сравнению с нижне-средневизейским терригенным ГНВК. Она изменяется от 23,3 до 30,8°C. Как и в вышеописанном комплексе, более высокие температуры отмечены на территории

Башкирской вершины. Максимальное значение ($30,8^{\circ}\text{C}$) отмечено в пределах Дубовогорской площади Дубовогорской террасы (рис. 4).

Из анализа геотермических условий газонефтеводоносных комплексов следует, что Таргинская площадь, приуроченная к Башкирской вершине, является перспективной на обнаружение нефти.

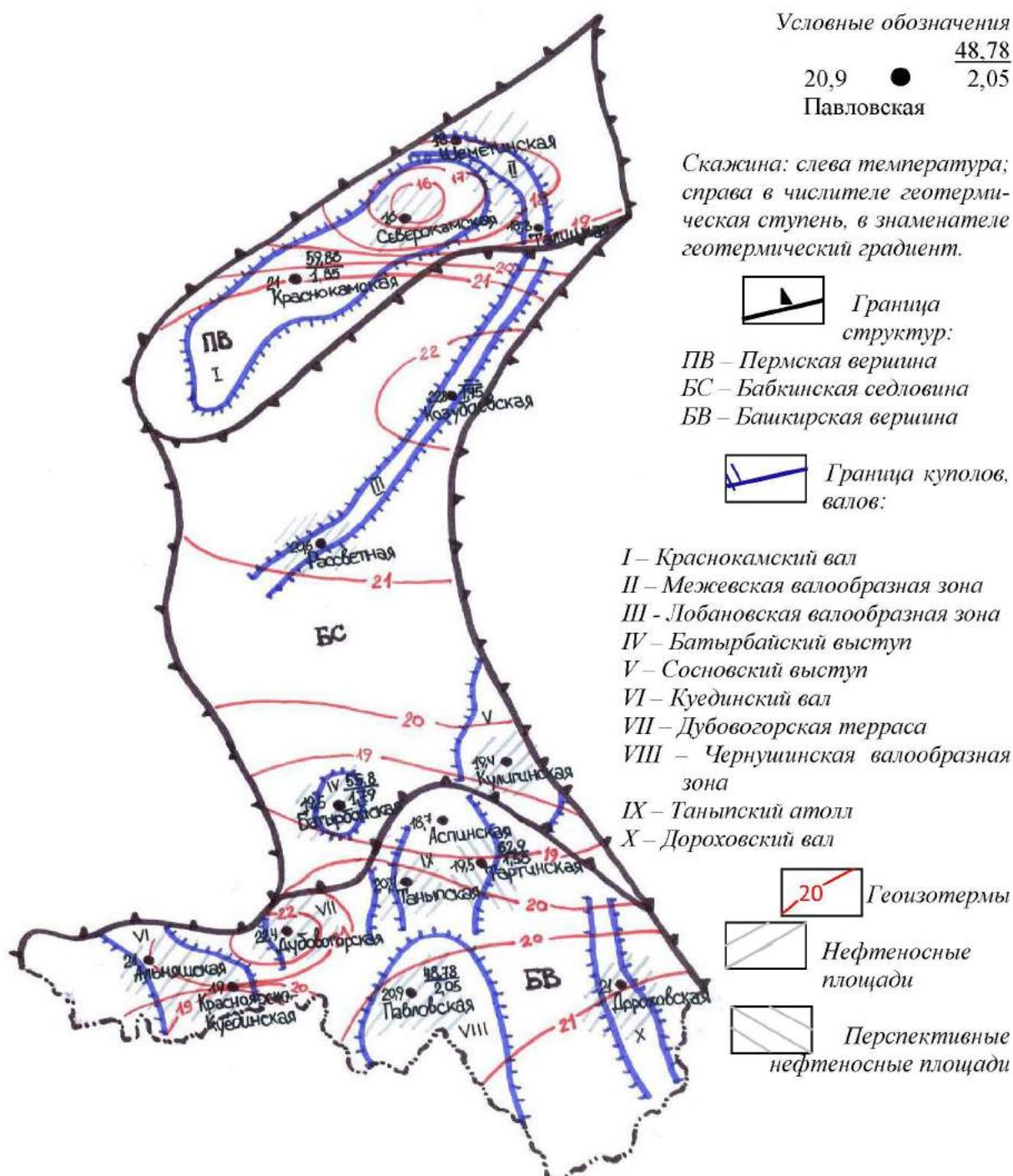


Рис. 3. Схематическая геотермическая карта низкне-средневизейского терригенного газонефтеводоносного комплекса

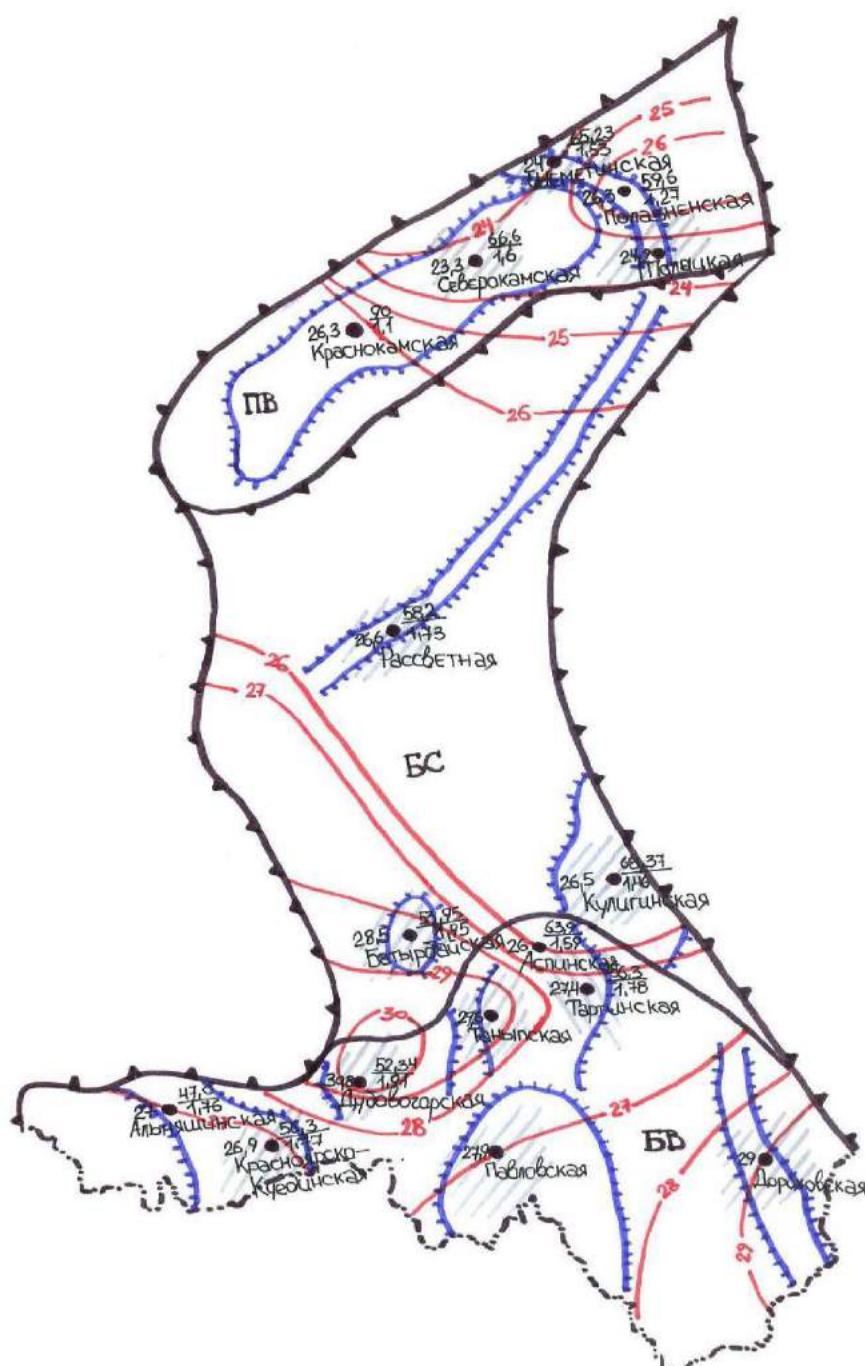


Рис. 4. Схематическая геотермическая карта верхнедевонско-турнейского карбонатного газонефтеводоносного комплекса (условные обозначения приведены на рис. 3)

Заключение

Геотермические исследования могут быть широко использованы при крупномасштабных геолого-гидрогеологических работах. На первой стадии исследований следует применять геотермические методы, которые позволяют выявить геотерм-

ические аномалии, в пределах которых в дальнейшем и должны быть проведены детальные геологические исследования.

При изучении геотермических условий газонефтеводоносных комплексов Пермско-Башкирского свода был использован графический метод обработки данных. Отобранные графики зависимости темпе-

ратуры пород от глубины их залегания представляют собой плавные кривые. Значения температур увеличиваются по мере увеличения глубины, без резких отрицательных или положительных аномалий. Иногда наблюдаются резкие скачки с быстрым нарастанием температур. Такие изменения температуры характерны для районов нефтяных месторождений.

Для изучения геотермических условий газонефтеводоносных комплексов, распространенных на исследуемой территории, были проанализированы геотермические показатели: температура, геотермический градиент и геотермическая ступень. Почти во всех скважинах с крайними геотермическими показателями максимальный градиент соответствует минимальной ступени, а минимальный градиент – максимальной ступени.

Собранные и обработанные материалы позволили составить схематические геотермические карты нижне-средневизейского терригенного и верхнедевонско-турнейского карбонатного комплексов. По сравнению с Пермской вершиной и Бабкинской седловиной на территории Башкирской вершины отмечены более высокие показатели температур. Максимальное значение температуры (в пределах обоих комплексов) зафиксировано в районе Дубовогорской нефтеносной площади, приуроченной к Дубовогорской террасе.

Таким образом, в результате изучения геотермических условий газонефтеводо-

носных комплексов Пермско-Башкирского свода выявлены закономерности изменения геотермических показателей с глубиной и по площади. Установлена приуроченность положительных температурных аномалий к участкам известных нефтегазоносных структур.

Анализ геотермических условий позволил Таргинскую площадь, приуроченную к Башкирской вершине, отнести к перспективной на обнаружение нефти.

Библиографический список

1. Богомолов Г.В., Цыбуля Л.А., Атрощенко П.П. Геотермическая зональность территории БССР. Минск: Наука и техника, 1972. 211 с.
2. Васильев В.Г. Газовые и газоконденсатные месторождения. М.: Недра, 1975. 528 с.
3. Гогель Ж. Геотермия. М.: Мир, 1978. 171 с.
4. Дриацкая З.В. Нефти СССР: справочник. Т.1. М.: Химия, 1971. 504 с.
5. Дьяконов Д.И. Геотермия в нефтяной геологии. М.: Гостоптехиздат, 1958. 277 с.
6. Зорькина Л.М., Суббота М.И., Стадник Е.В. Нефтегазопоисковая гидрогеология. М.: Недра, 1982. 216 с.
7. Любимова Е.А. Геотермические исследования. М.: Наука, 1964. С. 71-72.
8. Минерально-сырьевые ресурсы Пермского края: энциклопедия (глав. ред. А. И. Кудряшов). Пермь, 2006. 464 с.
9. Максимов С.П. Нефтегазоносные провинции СССР. М.: Наука, 1979. 51 с.
10. Осадчий В.Г., Мурье А.И., Ерофеев В.Ф. Геотермические критерии нефтегазоносности недр. Киев: Наукова думка, 1976. 144 с.

Geothermal Conditions of the Gas- Oil- and Water-bearing Formations of Perm-Bashkirian Arch in Perm Kray

I.N. Shestov, I.M. Tyurina, A.R. Riyanova

Perm State University, 15 Bukireva Str., 614990 Perm, Russia

E-mail: hydrogeo@psu.ru

The temperature studying is very important for determination of the oil and gas genesis conditions, understanding the migration and transformation of the underground fluids, assessment of distribution of the thermal characteristics in the rock. On the territory of Perm-Bashkirian Arch in Perm kray, the geothermal observation of the sedimentary

cover were carried out on 251 sites. The depth and lateral distribution of the geothermal conditions is discussed. Based on the comparative analysis of temperature, geothermal gradient, and geothermal step at the studied sites, the areas perspective for oil and gas exploration were revealed.

Key words: *temperature; gas- oil- water bearing complexes; geothermal gradient; geothermal step.*

References

1. Bogomolov G.V., Tsybulya L.A., Atroshchenko P.P. 1972. Geotermicheskaya zonalnost terri- torii BSSR [Geothermal zoning of the BSSR territory]. Minsk, Nauka i tekhnika, p. 211. (in Russian)
2. Vasilev V.G. 1975. Gazovye i gazokondensat- nые mestorozhdeniya [Gas and gas-condensate fields]. Moskva, Nedra, p. 528. (in Russian)
3. Gogel J. 1978. Geotermiya [Geothermal Energy]. Moskva, Mir, p. 171. (in Russian)
4. Driatskiy S.V. 1971. Nefti SSSR [Oil of USSR] V. 1, Moskva, Chimiay, p. 504. (in Russian)
5. Deacons D.I. 1958. Geotermiya v neftyanoy geologii [Geothermal energy in petroleum geology]. Moskva, Gostoptekhizdat, p. 277. (in Russian)
6. Zorkina L.M., Subbotina M.I., Stadnik E.V. 1982. Neftegasopisokovaya gidrogeologiya [Oil and gas prospecting hydrogeology]. Moskva, Nedra, p. 216. (in Russian)
7. Lyubimova E.A. 1964. Geotermicheskie is- sledovaniya [Geothermal studies]. Moskva, Nauka, p. 71-72. (in Russian)
8. Mineralno-syrevye resursy Permskogo kraja. 2006. [Mineral resources of Perm Kray.] Perm, p. 464. (in Russian)
9. Maksimov S.P. 1979. Neftegazonosnye pro- vintsi SSSR [Oil and gas provinces of the USSR]. Moskva, Nauka, p. 51. (in Russian)
10. Osadchiy V.G., Lurie A.I., Erofeev, V.F. 1976. Geotermicheskie kriterii neftegazonos- nosti nedr [Geothermal criteria of petroleum resources]. Kiev, Naukova Dumka, p. 144. (in Russian)

УДК 553.981

Характеристика коллекторов фаменских отложений Соликамской впадины

А.В. Плюснин, Т.В. Карасева

Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614600, Пермь ул. Букарева 15

E-mail: geolog0112@mail.ru

(Статья поступила в редакцию 3 апреля 2015 г.)

В статье дается характеристика коллекторских свойств пород фаменской карбонатной толщи позднего девона, полученной при изучении керна скважин № 1-4 месторождения им. Сухарева. По результатам детального исследования литологических особенностей продуктивной части авторами были выделены структурные типы и приведено их описание, определены пористость и проницаемость нефтенасыщенных пластов. Изучено строение фаменской части резервуара и дана характеристика основных литотипов. Полученные закономерности распределения продуктивных пород внутри рифа позволят в дальнейшем прогнозировать развитие коллекторов как по разрезу, так и по площади на изучаемой территории.

Ключевые слова: *Соликамская впадина, фаменский ярус, риф, коллекторы, пористость, проницаемость.*

DOI: 10.17072/psu.geol.27.85

В настоящее время почти половина мировой добычи углеводородов осуществляется из карбонатных отложений, которые по прогнозам в будущем будут доминировать в освоении ресурсов. В Пермском крае в карбонатных рифогенных массивах верхнего девона открыто более 118 залежей. Промышленные скопления нефти связаны, главным образом, с зонами развития Камско-Кинельской системы прогибов. Объектом изучения в настоящей работе является залежь нефти в рифогенных отложениях фаменского яруса верхнего девона месторождения им. Сухарева [1,2].

При изучении карбонатной толщи рассматриваемой территории проблема распространения пород-коллекторов должна

решаться в совокупности с литологическими исследованиями, так как распространение, свойства и типы пород обусловлены фациальной изменчивостью отложений и вторичными процессами изменения пород [3, 4].

Месторождение им. Сухарева – это новое, крупное месторождение на севере Пермского края. Оно было выявлено сейсморазведкой в 1986 г., а в 2009 г. подготовлено к поисковому бурению с объектами в верхнем девоне, нижнем и среднем карбоне. Месторождение расположено на территории подчинения г. Березники Пермского края, в 155 км на север от краевого центра г. Перми. Ближайшими месторождениями

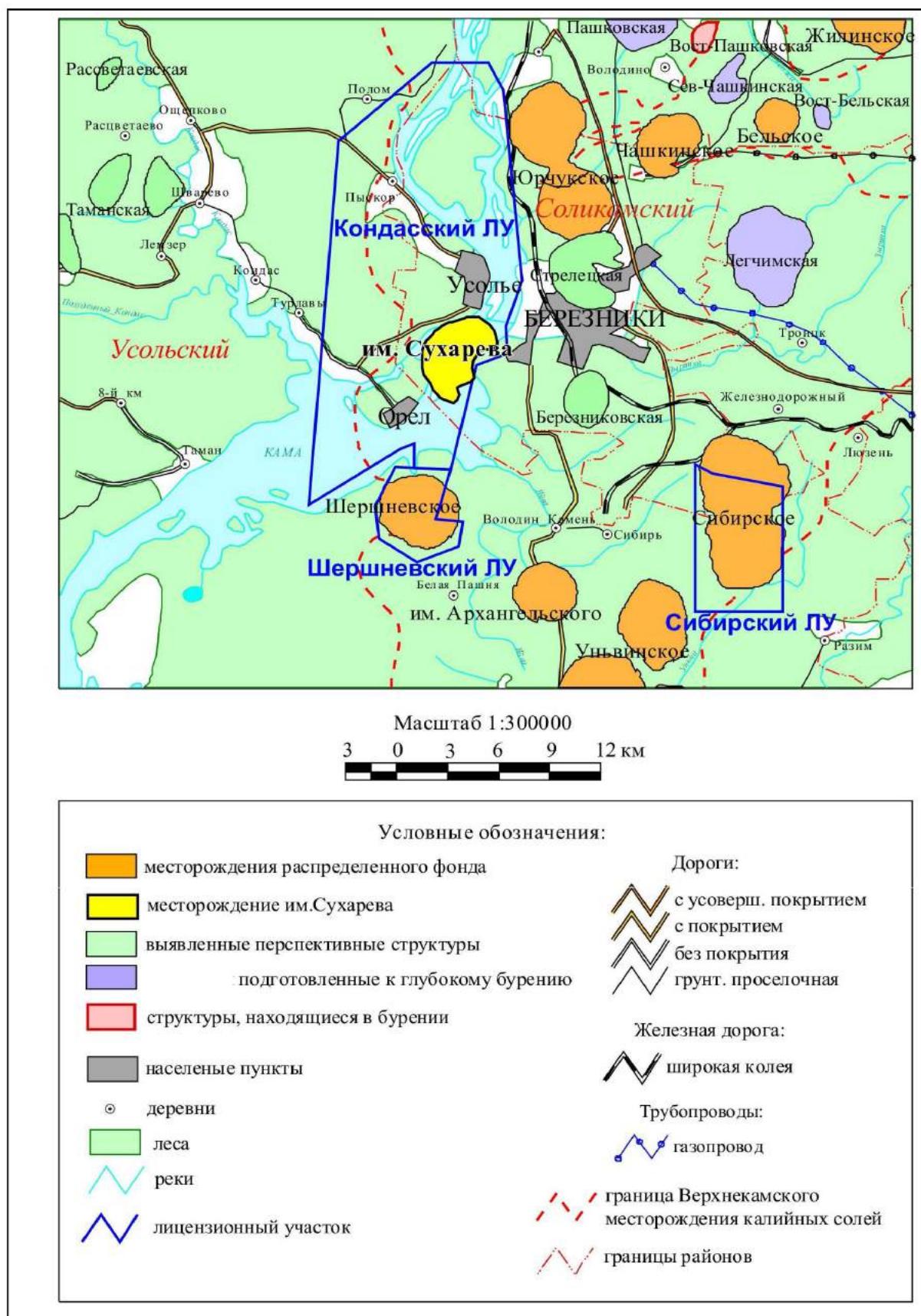


Рис. 1. Выкопировка из обзорной карты Пермского края (Колчанова, 2009)

являются Шершневское, им. Архангельского, Уньвинское, Сибирское и Юрчукское (рис.1). В тектоническом отношении месторождение приурочено к крупному куполовидному (Зырянскому) поднятию, расположенному на юго-западе Березниковского палеовыступа центральной части Соликамской впадины во внутренней бортовой зоне Камско-Кинельской системы палеопрогибов [5-7].

В кровле рифа выделяются три гребня, разделенные неглубокими проливами и осложненные семью вершинами различной морфологии. Наиболее морфометрически выраженным является самый западный гребень. В его пределах отмечается максимальная амплитуда, которая по кровле турнейско-фаменских карбонатов составляет 122 м (рис.2) [2].

Тип залежи – пластовая массивная, её размеры $3,8 \times 4,4$ км, высота 52,5 м. Нефтенасыщенная толщина пласта изменяется от 8,3 до 17,3 м.

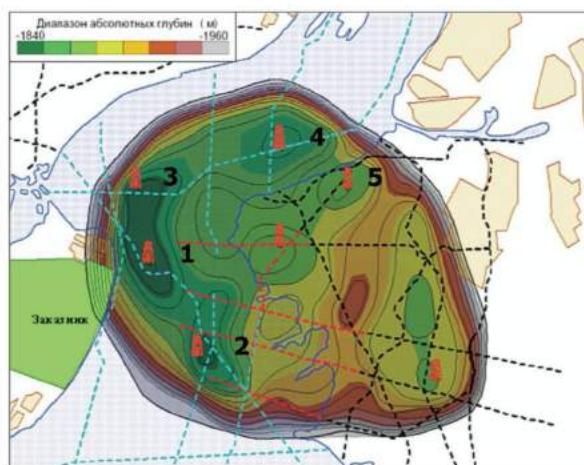


Рис. 2. Структурная карта по кровле турнейско-фаменских отложений мр. им. Сухарева (Неганов, 2013)

В процессе исследования был изучен керн скважин и просмотрены шлифы, что позволило выделить следующие литотипы нефтенасыщенных пластов [8, 9].

1. Известняки органогенно-детритовые, образованы сгустками, кальцитовыми сферами и комочками водорослевого происхождения, с остатками водорослей, криноидей и раковинным детритом (рис.

3). Текстура пятнистая с тонкими стилолитовыми швами, промазанными темно-серым органическим веществом, с кавернами выщелачивания, инкрустированными разнокристаллическим кальцитом. Поры межформенные, внутриформенные и межзерновые. Размер пор от 0,02 мм до 0,57 мм, отмечаются изолированные и сообщающиеся поры с редкими кавернами (2–5 мм).

Пористость коллекторов изменяется от 7,2 до 15,5 %, проницаемость, в основном, в пределах $(0,625 - 73,6) \cdot 10^{-3}$ мкм². На гистограмме распределения коэффициентов пористости и проницаемости видно (рис. 4), что наибольшую частоту встречаются в случае данного типа имеют классы пород-коллекторов с Кп - 14%, 10 % и 7,13,15 % (встречаемость 31, 19 и 13%, соответственно). Преобладающая проницаемость - $0,17-10$ и $30-40 \cdot 10^{-3}$ мкм² (встречаемость 32 и 25%, соответственно). Средние значения коллекторских свойств равны 12,5 % и $24,72 \cdot 10^{-3}$ мкм² по 16 определениям.

Нефтенасыщенные толщины изменяются от 0,5 до 3,8 м, в среднем – 1,7 м. Общая нефтенасыщенная толщина пласта в скв. № 1 – 0,3 м, скв. № 2 – 0,5 м, скв. № 4 – 3,8 м.

2. Известняки водорослевые состоят из сфер, трубочек, сгустков, комочков, сфер микрозернистого кальцита водорослевого происхождения, а также протяжённых вертикально ориентированных водорослевых построек, окруженных сферами, сегментными трубочками и сгустками (рис 3). Текстура узорчатая и пятнистая, обусловлена присутствием водорослевых построек неправильной формы, сложенных колониями сине-зелёных водорослей со сгустковой микроструктурой. Размер пор 0,01 – 0,8 – 1,0 мм, каверны до 4,0 – 11,0 мм (макро- до 20,0 – 40,0 мм). Породы неравномерно трещиноватые, трещины по наслоению и разноориентированные, прослоями многочисленные, пересекающиеся.

Пористость коллекторов изменяется от 3,1 до 16,7 %, проницаемость в основном в пределах $0,12 - 76,2 \text{ } 10^{-3} \text{ мкм}^2$. На гистограмме распределения коэффициентов пористости и проницаемости видно (рис.4), что наибольшую частоту встречаются в данном типе имеют классы пород-коллекторов с Кп 5, 6, 4 и 3% (встречаемость 26, 17, 16 и 14%, соответственно). Преобладающая проницаемость $0,12-1$ и $1-2 \text{ } 10^{-3} \text{ мкм}^2$ (встречаемость 48 и 11 %, соответственно). Средние значения коллекторских свойств равны 6,5 % по 115 определениям и $10 \text{ } 10^{-3} \text{ мкм}^2$ по 109 определениям.

Нефтенасыщенные толщины изменяются от 0,2 до 4,5 м, в среднем составляют 0,9 м. Общая нефтенасыщенная толщина пласта в скв. № 1 – 16,1 м, скв. № 3 – 7,1 м, в скв. № 4 – 6,4 м.

3. Известняки комковатые. Основными форменными компонентами (на 50-60 %) являются остатки водорослевого происхождения (сферы, сгустки, комочки, трубочки, водоросли), редкие прослои оноклитов (рис 3). Прослойками фрагменты водорослевых построек занимают до 40-50% породы и имеют удлиненную форму. В меньшей степени встречается скудный раковинный детрит и сферы (до 10-20%). В породе рассеяны остатки зелёных водорослей и редкий раковинный детрит. Текстура пород неоднородная: пятнистая, тонкослоистая и узорчатая, со строматолитоподобной формой построек. Каверны – от редких до многочисленных, размером от 2-5 мм до 25-40 мм. Трещины разноориентированные: сомкнутые (сетка трещин), открытые – нефтяные, многочисленные субвертикальные трещины длинные шириной до 3 мм выполнены кальцитом.

Пористость коллекторов изменяется от 3,4 до 17,7 %, проницаемость – в основном в пределах $0,17 - 1338 \text{ } 10^{-3} \text{ мкм}^2$. На гистограмме распределения коэффициентов пористости и проницаемости видно (рис.4), что наибольшую частоту встречаются в данном типе имеют классы пород-

коллекторов с Кп – 3, 4 и 7 % (встречаемость 47, 24 и 12 %, соответственно). Преобладающая проницаемость – $0,17$ до 80 мкм^2 (встречаемость 82%, соответственно). Средние значения коллекторских свойств равны 5,6 % и $108 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$ по 17 определениям.

Нефтенасыщенные толщины изменяются от 0,5 до 1,4%, в среднем составляют 0,9 м. Общая нефтенасыщенная толщина пласта в скв. № 2 – 5,6 м.

Таким образом, наиболее распространёнными (по мощности) являются водорослевые известняки, затем – органогенно-детритовые и комковатые. По коллекторским свойствам наиболее благоприятными являются органогенно-детритовые, затем – водорослевые и комковатые известняки.

При перфорации в скв. № 1 в интервале 2179,5–2216 м (органогенно-детритовые, водорослевые известняки) получены безводная нефть с дебитом 15,4 т/сут и приток газа дебитом 1,3 тыс. м³/сут на 5-ти миллиметровом штуцере.

В скв. № 2 в результате опробования в интервале 2846–2872 м (органогенно-детритовые, комковатые известняки) получена нефть дебитом 58,2 т/сут на 6-ти миллиметровом штуцере.

В скв. № 3 при опробовании интервала 2438,5–2470 м (водорослевые известняки) получена безводная нефть дебитом 22,4 т/сут на 6-ти миллиметровом штуцере.

В скважине № 4 в интервале 2635-2661 м (органогенно-детритовые, водорослевые известняки) получена нефть дебитом 87,1 т/сут на штуцере 6 мм.

Различия в коллекторских свойствах связаны с фациальной зональностью рифов позднего девона. Если рассматривать весь разрез изучаемого рифа, то по чередованию различных типов известняков и их соотношению можно сделать вывод, что скважины вскрыли внутреннюю часть рифовой постройки, для которой характерны отложения внутреннего шлейфа, формировавшиеся в периоды снижения относительного уровня моря. Отмечается чередование плотных

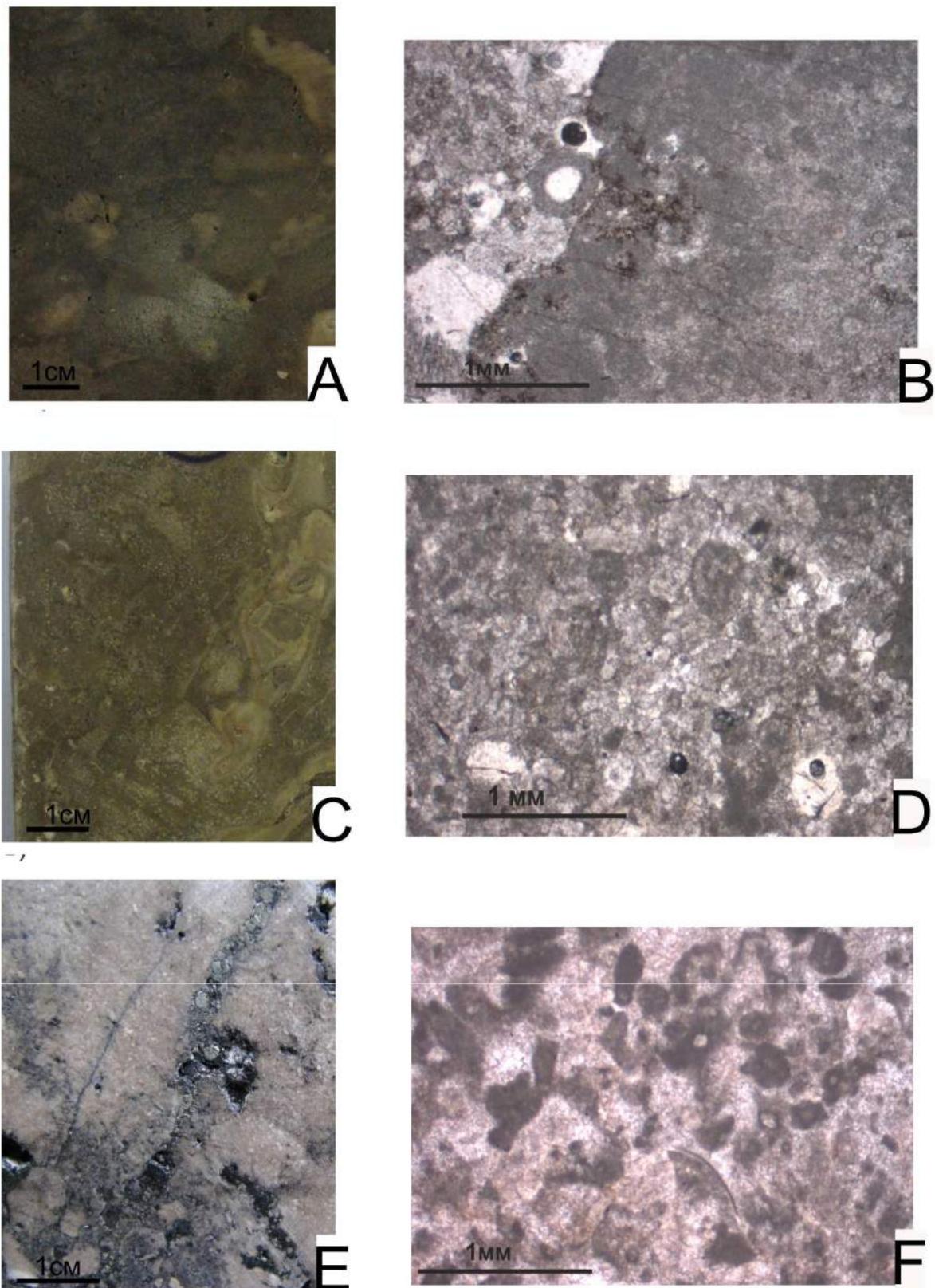


Рис. 3. Фотографии и микрофотографии иллюзов: A, B – известняк водорослевый; C, D – известняк комковатый; E, F – известняк органогенно-детритовый

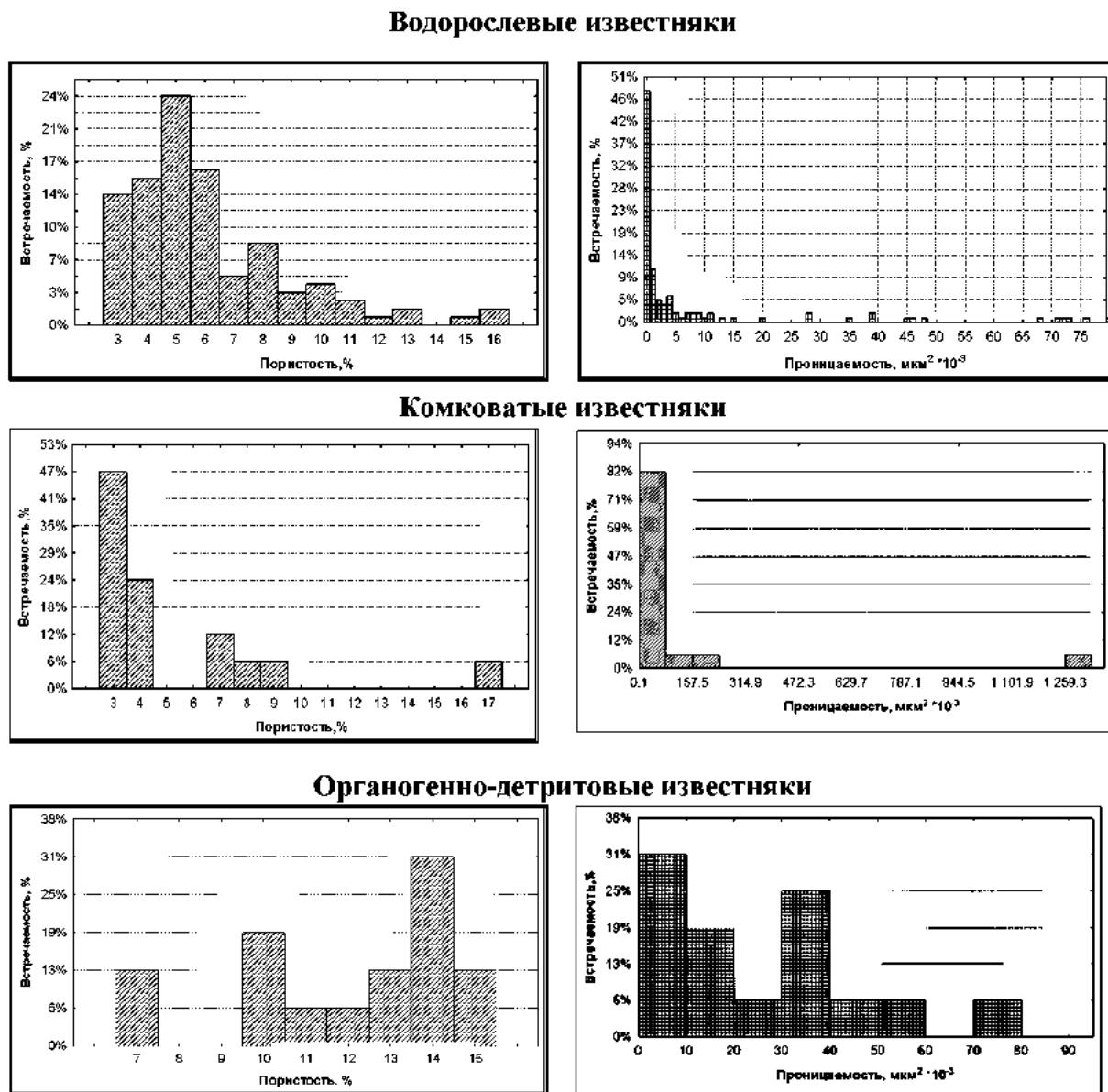


Рис.3. Гистограммы распределения коэффициентов пористости и проницаемости

трансгрессивных водорослевых пачек с проницаемыми водорослевыми известняками регressiveных шлейфовых пачек [10].

Для регressiveных известняков характерна высокая первичная межформенная пористость, которая могла быть увеличена выщелачиванием при максимальном снижении уровня моря; увеличение пустотного пространства произошло также за счет активных процессов трещинообразования. Сходная закономерность распределения коллекторских свойств по разрезу и их

литолого-фаунистическая природа характерны для соседних рифовых массивов: Шершневского, им. Архангельского, Уньвинского, Сибирского и Юрчукского.

Таким образом, получены закономерности распределения различных типов коллекторов продуктивных пород внутри рифового массива, что позволит в дальнейшем прогнозировать коллекторский потенциал как по разрезу, так и по площади в районах распространения рифов на изучаемой территории.

Библиографический список

1. Вилесов А.П., Воеводкин В.Л., Сташкова Э.К. Фациальная природа коллекторов верхнедевонских рифогенных массивов северо-восточной части Березниковского палеоплато// Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2005. №3–4. С. 81–86
2. Колчанова Р.Н., Кузнецова Н.М. Мониторинг Зырянской структуры по материалам сейсморазведки 2D с учетом данных про-буренной скважины 1-Кондасская / ОАО «ПНГ». Пермь, 2012. 11 с.
3. Лузина Д.В., Кривоцеков С.Н. Анализ фа-циальных зон и коллекторских свойств турнейско-фаменских рифогенных построек Соликамской депрессии// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2012. № 5. С. 7–15
4. Лядова Н.А., Яковлев Ю.А., Распопов А.В. Геология и разработка нефтяных месторождений Пермского края / ОАО ВНИИОЭНГ. М., 2010. 335 с.
5. Неганов В.М., Шумилов А.В., Черепанов С.С., Шумской И.Ф. Крупное открытие геофизиков и нефтяников Пермского края начала XXI века // Геофизика. 2013. №5. С. 26–31.
6. Некрасов А.С., Матвеева В.П. Пространственная корреляция фаменско-турнейских карбонатных отложений сибирского ме-сторождения и их литолого-фациальное районирование // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторож-дений. 2005. № 5–6. С. 43–48.
7. Некрасов А.С. Геолого-геофизические ис-следования карбонатных коллекторов неф-тяных месторождений / Перм. ун-т. Пермь, 2006. 422 с.
8. Плюснин А.В. Литотипы разреза Зырянско-го рифа в связи с нефтегазоносностью // Геология и полезные ископаемые Западно-го Урала / Перм. гос. нац. иссл. ун-т. Пермь, 2014. С. 74–76.
9. Плюснин А.В. Характеристика турнейско-фаменских отложений Зырянского рифа // Вестник молодых ученых Пермского госу-дарственного национального исследова-тельского университета [Электронный ре-сурс]: сб. науч. тр. / отв. редактор В.А. Бячкова; Перм. гос. нац.исслед. ун-т. Элек-трон. дан. Пермь, 2014. Вып. 4. С. 399–408
10. Сташкова Э.К., Беляева Н.В. Геологиче-ское моделирование, коллекторы и после-довательность разработки на примере од-ного из месторождений Пермского края // Геология, геофизика и разработка нефтя-ных и газовых месторождений. 2007. №7. С. 51–56.

Reservoir Characteristic of Famennian Deposits of the Solikamsk Depression

A.V. Plyusnin, T.V. Karaseva

Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614600, Russia.

E-mail: geolog0112@mail.ru

The article describes the reservoir rock properties of Famennian (Late Devonian) reef carbonate strata obtained by core study at boreholes № 1-4 of the Sukharev oil field. Based on the results of detailed study of lithological features of productive strata, au-thors defined the structural types and composed their description. The characteristics of the porosity and permeability of oil-bearing beds were shown. In a result of studies, the structure and main lithotypes of Famennian portion of reservoir were determined that allowed predicting the spatial distribution of reservoir properties within oilfield area.

Keywords: *Solikamskaya depression; Famennian reef; reservoir; porosity; permeabil-ity.*

References

1. Vilesov A.P., Voevodkin V.L., Stashkova E.K. 2005. Fatsialnaya priroda kollektorov verkhnedevonskikh rifogennykh massivov severo-vostochnoy chasti Bereznikovskogo paleoplato [Facial nature of reservoirs of the Upper Devonian reef massifs of north-east part of the Bereznikovskoe paleoplato]. Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy, 3-4: 81-86. (in Russian)
2. Kolchanova R.N., Kuznetsova N.M. 2012. Monitoring Zyryanskoy struktury po materialam seismorazvedki 2D s uchetom dannykh proburennoy skvazhiny 1-Kondasskaya [Monitoring of Zyryanskaya oilfield based on data of 2D seismics and borehole 1 Kondasskaya]. Report JSC «PermNefteGeofizika», Perm, p. 11. (in Russian)
3. Luzina D.V., Krivoshchekov S.N. 2012. Analiz fatsialnykh zon i kollektorskikh svoystv turneysko-famenskikh rifogennykh postroek Solikamskoy depressii [Analysis of facial zones and reservoir properties of the Tournaisian - Famennian reef structures of Solikamskaya depression]. Vestnik PNIPU. Geologiya, Neftegazovoe i gornoe delo. 5: 7-15. (in Russian)
4. Lyadova N.A., Yakovlev Yu.A., Raspopov A.V. 2010. Geologiya i razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy Permskogo kraja [Geology and development of oil fields of the Perm Kray]. Moskva, JSC VNIIOENG, p. 335. (in Russian)
5. Nekrasov A.S., Matveeva V.P. 2005. Prostранственная корреляция фаменско-турнейских карбонатных отложений Сибирского месторождения и их литолого-фатсимальное районирование [Spatial correlation of Famennian - Tournaisian carbonates of the Siberian deposit and their lithofacial zoning]. Geologiya, geofizika I razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy, 5-6: 43-48. (in Russian)
6. Negarov V.M., Shumilov A.V., Cherepanov S.S., Shumskiy I.F. 2013. Krupnoe otkrytie geofizikov i neftyanikov Permskogo kraja nachala XXI veka [Major discovery of geophysicists and oilmen of the Perm Kray in beginning of the XXI century]. Geofizika, 5: 26 – 31. (in Russian)
7. Nekrasov A.S. 2006. Geologo-geofizicheskie issledovaniya karbonatnykh kollektorov neftyanykh mestorozhdeniy [Geological and geochemical studies of carbonate reservoirs of oil fields]. Perm State Univ., Perm, p. 422. (in Russian)
8. Plyusnin A.V. 2014. Litotipy razreza Zyryanskogo rifa v svyazi s neftegazonosnostyu [Lithotypes of Zyryansky reef relative to the oil and gas content]. In Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala, Materialy Konf. Ed. R.G. Iblaminov, Perm. gos. national issl. Univ., Perm, pp. 74-76. (in Russian)
9. Plyusnin A.V. 2014. Kharakteristika turneysko-famenskikh otlozheniyy Zyryanskogo rifa [Characteristics of the Tournaisian - Famennian deposits of Zyryansky reef]. Vestnik molodykh uchenykh PGNIU [Elektronnyy resurs]. 4: 399-408. (in Russian)
10. Stashkova E.K., Belyaeva N.V. 2007. Geologicheskoe modelirovanie, kollektory i posledovatelnost razrabotki na primere odnogo iz mestorozhdeniy Permskogo kraja [Geological modeling , reservoirs and development order on example of an oilfield of Perm Kray]. Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy. 7: 51-56. (in Russian)

УДК 550.8.028

Обзор технологий разработки малых и средних глубоководных месторождений нефти и газа

И.В. Вельмескин^a, О.Е. Кочнева^b

^aПермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: Ivanvelmeskin@gmail.com

^bПермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 29

E-mail: olgakochneva777@yandex.ru

(Статья поступила в редакцию 30 марта 2015 г.)

На современном этапе развития глубоководной добычи нефтяные компании столкнулись с проблемой нерентабельности малых и средних месторождений. Технологии, применяемые для добычи, сбора и хранения углеводородов в глубоководье, являются крайне сложными и дорогостоящими, что не позволяет добиться даже минимальной рентабельности проектов с объемом добычи до 50 тыс. баррелей нефти. Проанализированы применяемые на сегодня технологии добычи и возможные альтернативы по снижению конечной стоимости проекта и вывода малых месторождений на минимальную рентабельность.

Ключевые слова: *плавучая система добычи, хранения и транспортировки нефтепродуктов, добывающая платформа, водоотделяющая колонна, швартовочная система.*

DOI: 10.17072/psu.geol.27.93

В связи с высокой стоимостью разработки глубоководных месторождений инвестиции нефтяных компаний направлены на разработку крупных залежей. Небольшие по запасам месторождения находятся вне зоны рентабельности, поэтому их разработка не представляет интереса [3].

Проекты разработки небольших нефтяных залежей более чувствительны к изменениям капитальных затрат, нежели к эквивалентным изменениям значений операционных. Как же можно снизить капитальные затраты и вывести разработку небольших по объему запасов глубоководных месторождений на минимально допустимый уровень рентабельности? На этот вопрос мы постараемся дать ответ.

Подводная технология добычи нефти и природного газа за 50 лет прошла ус-

пешиный путь от новшества до апробированных технико-технологических решений, которые с каждым годом все чаще применяются при разработке морских месторождений и сейчас являются практически безальтернативными при освоении глубоководных нефтегазовых месторождений [4].

На сегодняшний день для разработки глубоководных месторождений применяются несколько типов добывающих платформ: плавучая система добычи, хранения и выгрузки нефтепродуктов (FPSO – Floating Production Storage Off-loading, рис.1), платформа поплавкового типа (SPAR – Single Point Mooring And Reservoir), платформа на натяжении (TLP – Tension Leg Platform), полупогружная платформа (Semi-Submersible).



Рис 1. Плавучая система добычи, хранения и выгрузки нефтепродуктов

В условиях глубоководной добычи при значительной удалённости от континентальной инфраструктуры (до 100 км от береговой линии) необходимо учитывать мощности для хранения нефтепродуктов, поэтому не будем описывать каждый тип платформ, а сосредоточимся на одном, наиболее релевантном для нас варианте, имеющем главное преимущество по отношению к остальным, – возможность хранить углеводороды на борту (платформа типа FPSO) [2].

Первое в мире судно типа FPSO было представлено в 1977 г. в испанской части Средиземного моря на месторождении Castellon компании Шелл (глубина составляла 117 м). Последовав этому примеру, бразильский оператор Петробрас переоборудовал танкер «Presidente Prudente de Moraes» и поставил на разработку месторождения Garoupa в 1978 г. [5].

FPSO – это плавучая система добычи, хранения и выгрузки нефтепродуктов. Она является одной из ряда различных типов плавучих систем, используемых сегодня в нефтяной и газовой промышленности. Внешне она напоминает судно, но спроектирована абсолютно иначе и перевозит не только всю необходимую продукцию и технологическое оборудование, обычно относящееся к платформе нелетучих масел и газопромысловой платформе, но и резервуары для сырой нефти, добываемой из скважин на морском дне. Она надолго пришвартовывает-

ся в отведенном ей месте и соединяется со скважинами гибкой водоотделяющей колонной.

В отличие от остальных типов платформ (SPAR, TLP, Semi-Sub), платформа типа FPSO имеет трюм-секции для хранения нефтепродуктов, так как чаще всего за основу для переоборудования используются бывшие нефтетанкеры [6]. Наличие собственного трюма позволит сократить капитальные затраты на строительство плавучих резервуаров, прокладку трубопроводов и коммуникаций к ним, сэкономить на обслуживании, персонале и как следствие – снизить конечную величину капитальных и операционных затрат.

Наряду с преимуществами есть и существенные недостатки этой конструкции. К основным из них следует отнести «карабельную» основу формы, в связи с чем она не устойчива к морской качке, а следовательно, непрерывность технологического процесса зависит от климатических условий (при сильной качке возможна временная остановка), невозможность размещения фонтанных арматур скважин на поверхности платформы. «Привязывается» FPSO только к подводно-добычным комплексам (манифольдам), подводящим поток жидкости по гибким райзерам к борту платформы либо к турельной системе (рис.2). Турельная швартовочная система представляет собой сложный комплекс подшипников трения, который позволяет вращаться судну вокруг оси турели. Через неё проходит поток жидкости от скважин к системе подготовки на платформе, осуществляется подвод химических реагентов для ингибирования скважин, борьба с гидрообразованием, закачка воды для поддержания пластового давления и т.д. Турель бывает двух основных типов – внешняя (крепится к носовой части судна) и внутренняя (монтируется внутри корпуса).



Рис. 2. Турельная система сбора на FPSO



Рис 3. Строительство турели на верфи в Сингапуре

Строительство турели часто производится отдельно от платформы, так как занимает огромные мощности (рис.3), затем монтируется на месте предполагаемой дислокации FPSO (в случае с внешней турелью). Стоимость такой системы сбора может доходить до 30% от стоимости самой платформы.

Одним из ключевых факторов усложнения разработки средних и малых нефтяных месторождений в глубоководье является стоимость платформы. При добыче от 30 до 50 тысяч баррелей в сутки нецелесообразно применение дорогостоящих систем сбора турельного типа, строительство плавучих хранилищ.

Для выхода на минимальную окупаемость таких проектов нефтяным компаниям необходимо искать альтернативные

более экономичные технико-технологические решения [7].

Sevan Marine – норвежская компания, которая конструирует, владеет и управляет плавучими морскими установками. Отличительным и уникальным продуктом компании является платформа SSP (стабилизированная платформа Sevan цилиндрического типа), используемая для добычи и бурения в различных климатических условиях. Компания основана в Арендале, имеет офисы в Танангере, Тронхейме, Аскере, Рио-де-Жанейро, Аракажу и Сингапуре. Акции компании торгуются на фондовой бирже Осло.

Платформа SSP (рис.4) – это конструкция цилиндрической формы, подчиняющаяся тем же принципам устойчивости, что и классические корабли. SSP-300 относится к SSP платформам, имеющим возможность вмещать до 300 тыс. баррелей нефтепродуктов. В отличие от платформ поплавкового типа (SPAR), SSP шире по отношению к её высоте, обычно это меньше одной трети ее диаметра. При добыче 30 тыс. баррелей в сутки возможно хранение углеводородов до 10 дней, что вполне достаточно для периода отгрузки на танкер, который занимает в среднем 4-6 дней.



Рис. 4. Стабилизированная платформа Sevan (ССП300)

Кругообразная форма компенсирует любое воздействие течений, поскольку, в зависимости от их направления морская

водная поверхность испытывает те же гидравлические сопротивления, что и корабли. Следовательно, платформа SSP достаточно устойчива, не нуждается в турельных системах сбора и как следствие – отсутствие риска остановки технологического процесса в результате сильного шторма [8]. Для управления входящим потоком нефти есть возможность приема райзеров через центральный мунпул (сквозное отверстие в центральной части платформы, рис.5), при сохранении многощечной системы швартовки, отдельно развернутой вокруг платформы, а не от турели.

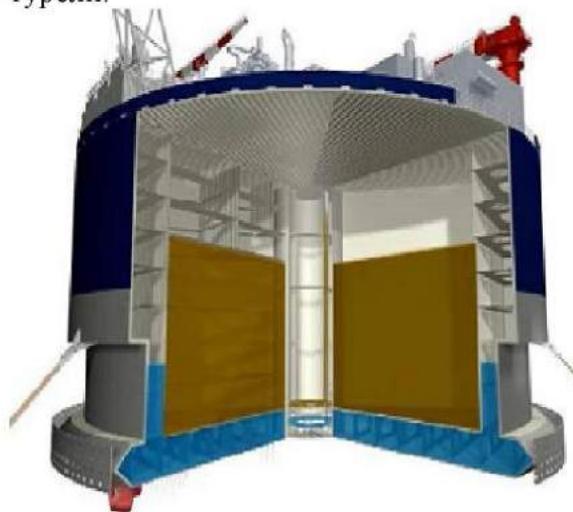


Рис. 5. Емкости для хранения УВ и центральный тоннель

SSP-300 не только «предлагает» все плюсы обычных судов, такие как большая емкость хранения, загрузка палубы и ее просторность, но и имеет динамику движения, схожую или даже лучшую, чем у полупогруженых платформ (Semi-Submersible). Строительство облегчается внутренней симметрией, которая так же дает доступ ко всем резервуарам, таким образом, уменьшая число труб, кабелей и внутренних коммуникаций.

Подсчитано, что на платформе SSP требуется только 30% от общей длины труб и кабелей, необходимых для эквивалентного FPSO. Это, в свою очередь, серьезное уменьшение сложности инженерного проекта и увеличение долговеч-

ности и надежности конструкции. Кроме того, в сравнении с FPSO SSP-300 не нуждается в паре турель-шарнирного оборудования, которое не только дорогое, но и требует высокого уровня обслуживания, а также используется без захода на капитальный ремонт в док верфи до 15-20 лет. SSP-300 принимает большое число райзеров через ее балластные танки, направляя их от палубы до входных манифольдов. Это расположение сделано не только с целью улучшить безопасность и облегчить операции, но и защитить райзеры и шланго-кабели от столкновения судов. SSP-300 имеет диаметр 63 м и высоту 30 м и максимальную осадку 20 м. Она существенно отличается от платформы поплавкового типа (SPAR), с которой ее часто сравнивают: нет дорогостоящей транспортировки и установки в связи с большой осадкой, в отличие от SPAR SSP шире ее вертикальной высоты. Возможная нагрузка на палубе SSP-300 свыше 9000 т, что более чем достаточно для размещения всего технологического оборудования [10].

Двухслойный корпус ССП играет важную конструктивную роль – обеспечивает горизонтальную жесткость за счет модулей в сочетании с центральным силовым стержнем, с которым они соединены вертикальными балками и горизонтальными жесткими поперечинами (рис.6).

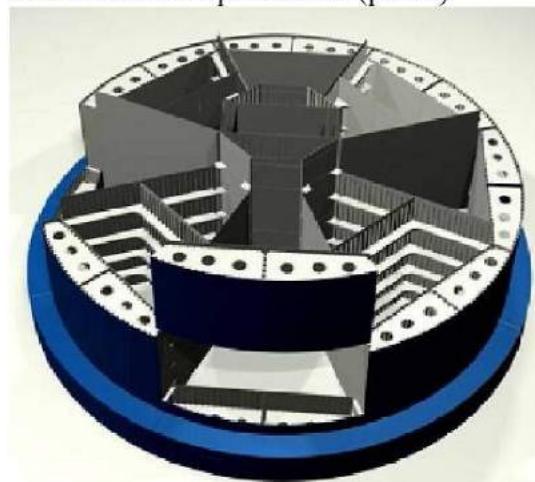


Рис. 6. Внутреннее строение платформы ССП

Переборки резервуаров необходимы только для армирования каждого танка, когда каждые два резервуара делятся одной общей перегородкой. Это также является преимуществом симметрии конструкции, которая снижает вес стали, но при этом добавляется устойчивость.

Двойное дно и верхняя палуба работают как радиальные перекладины, придающие корпусу увеличенные вертикальную и горизонтальную жесткость. В конечном результате – вновь уменьшение массы необходимой стали и строительных затрат. Круглая форма так же предусматривает гораздо меньшие изгибающие моменты, воспринимаемые структурой, которая уменьшает провисание и коробление металла.

Одна из сильных особенностей SSP концепции в том, что высокая степень симметрии способствует блочной модульности. Что как видно на рис. 6, весь корпус сделан всего из 8 разных типов строительных модулей. При такой конструкции строительство будет выигрывать за счет «кривой обучения» (*learning curve*), где эффективность в строительстве блоков возрастает в процессе работы.

Отметим еще одно преимущество симметрии: трафаретный дизайн включает всего 3 различных размера стальных листов и 3 различных толщины стали, добавляя новый уровень модульности и простоты в конечный детальный инженерный дизайн.

Для сравнения, для строительства эквивалентного корпуса судна необходимо обычно около 400 различных размеров стальных пластин различной толщины, включая процесс оптимизации распределения веса стали, что занимает значительно больше времени и труда. Такой высокий уровень модульности указывает на применение систем автоматизации во время производства блоков. Если правильно использовать эти методы, то автоматизация приведет к новому уровню контроля за качеством и эффективностью, о которых сегодня можно только догадываться. Постройку SSP-300 можно осуще-

ствовать практически в любой верфи. Корпус может быть возведен в сухом доке или на земле и затем спущен на воду [11].

Гидродинамическое поведение SSP было протестирано на океанической базе Маринтек в Тронхейме, Норвегия, где была заверена отличная динамика SSP для угловых и вертикальных движений. Тест симулировал морские условия в Северном море и акватории Бразилии, соответствующие экстремальным погодным условиям и многонаправленности течений. Оба сценария исследовались на условия шторма. Воздействия килевой качки и вращений поперек корпуса SSP-300 были очень малы, в действительности, этот показатель лучше, чем у большинства полупогружных платформ. Относительно воздействия горизонтальных смещений SSP-300 превышает показатели по устойчивости полупогружных платформ в широких спектрах волнения моря. Этот показатель очень значителен для усталостных нагрузок стальных гофрированных райзеров, которые крайне чувствительны к высокочастотным колебаниям. Тестируемая модель продемонстрировала, что с подходящим дизайном трюмного короба подвижность SSP-300 оптимальна, чтобы не допустить возникновения усталостных напряжений на райзерах.

На сегодняшний день на воду спущено три платформы типа SSP.

1. *Piraneta Spirit* в акватории Бразилии, где глубина воды достигает 1100 м. Владелец платформы нефтяная компания Петробрас, месторождение *Piraneta* с уровнем добычи – 30 тыс. бар/сут. было запущено в 2007 г., план разработки рассчитан на 11 лет с возможной пролонгацией на 5 лет.

2. *Hummingbird Spirit* в Северном море, глубина 120 м. Месторождение *Chestnut* в акватории Великобритании вышло на плановую добычу 30 тыс. бар/сут в 2009 г. Компания Центрика Энерджи Апстрим рассчитывала вести добычу всего 2,5 г., однако в 2013 г. контракт был продлен до 2016 г.

3. Voyageur Spirit - месторождение Huntington field в Северном море, акватории Великобритании, глубина воды в этой зоне – 120 м. Уровень добычи 30 тыс. бар/сут был достигнут в 2009 г. Компания E.ON Ruhrgas UK E&P планирует вести добычу 5 лет с возможной пролонгацией.

Безаварийный опыт эксплуатации платформы SSP доказал на практике применимость данной технологии в широком спектре климатических условий и операций. Относительно низкая стоимость и простота конструкции позволили нефтяным компаниям вести добычу в ранее признанных нерентабельными месторождениях [12].

Добывающая отрасль сталкивается с постоянно растущими расходами на глубоководную разработку. Месторождения с небольшими запасами остаются малорентабельными, но в настоящее время, когда не осталось «легкой» нефти, добывающие компании приступили к их разработке, о чем нельзя было даже догадываться десять лет назад. На сегодняшний день есть альтернативные технологии классическим, апробированным десятилетиями технологиям, способные вывести месторождения с добычей до 50 тыс. баррелей в сутки в ряд рентабельных и тем самым открыть новые возможности для инвестиций.

Благодаря относительно простой конструкции ССП-300 компании Sevan Marine может быть построена практически на любой верфи, так как не выходит за рамки ограничений по габаритам. Для строительства платформ типа FPSO, TLP и SPAR доступно ограниченное число верфей из-за размеров и сложности их конструкции. SSP-300 основана на проверенных принципах проектирования и состоит из обычных стальных конструкций [13]. Простота и высокая модульность сокращает время на проектирование и строительство. Отсутствие необходимости в дорогостоящих турельных системах швартования снижает риск негативного воздействия на гибкие трубы.

Компания Sevan Marine спроектировала дизайн-проект добывающих платформ будущего, способных дать толчок развитию новым проектам разработки малых глубоководных месторождений по всему миру. Безусловно, геологические риски очень велики, однако уже сейчас небольшие нефтедобывающие компании выходят на этот рынок и ведут успешную добычу углеводородов в самых сложных климатических условиях.

Библиографический список

1. Адамянц П.П., Гусейнов Ч.С., Иванец В.К. Проектирование обустройства морских нефтегазовых месторождений. М.: ООО «ЦентрЛитНефтеГаз», 2005. 345 с.
2. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения: учебник для вузов. Ч. 1. Конструирование. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. 237 с.
3. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения: учебник для вузов. Ч. 2. Технология строительства. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. 278 с.
4. Грудницкий Г.В., Грудницкий С.В., Егоров С.И., Мамутов Р. Морские нефтегазовые точечные причалы. М., 2011. 368 с.
5. Гусейнов Ч.С. Освоение углеводородных ресурсов Северного Ледовитого океана - ближайшая и неотложная перспектива // Бурение и нефть. 2012. №1. С.45-50.
6. Гусейнов Ч.С., Мусабиров А.А. Ледостойкая самоподъёмная платформа для замерзающего мелководья и способ последовательного монтажа сменных палуб // Бурение и нефть. 2012. №10. М.: ООО «Медиа Гранд». С. 18-20.
7. Егоров С. И. Актуальные проблемы проектирования морских нефтегазовых точечных причалов // Нефть, газ и бизнес. 2012. № 7. С. 3-5.
8. Катюха П.Б. Тенденции и перспективы эволюции нефтетрейдинга в России // Нефть, газ и бизнес. 2012. № 7. С. 6-11.
9. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок (ПБУ) и морских стационарных платформ (МСП). СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012.
10. Шибакин С.И., Шибакин Р.С., Булавин В.Д. Функциональные мобильные уста-

- новки для условий мелководного шельфа замерзающих морей // Состояние и перспективы освоения морских нефтегазовых месторождений: сб. науч. тр. М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2003. С. 231-238.
11. Parker G. The FPSO Design and Construction Guidance Manual. Хьюстон, США. Reserve Technology Institute, 1999. 121 р.
12. Parshall J. Evolving Subsea Technology
- Tackles Huge New Risks of Today's Projects // Journal of Petroleum Technology. 2008. May P. 40-47.
13. Permanent versus disconnectable FPSOs, LUO Yong and WANG Hong-wei, Deep-water Engineering Research Center, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. P. 6.

Overview of Technologies for Development of Small and Medium-sized Deep-water Oil and Gas Fields

I.V. Velmeskin^a, O.E.Kochneva^b

^aPerm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia.

E-mail: Ivanvelmeskin@gmail.com

^bPerm State Polytechnic University, 29 Komsomolskiy Ave.. Perm 614990, Russia. E-mail: Olgakochneva777@yandex.ru

At present, the oil companies, engaged in the deep water oil production, encountered the problem of unprofitability of development of small and medium-size fields. Technology, which is applied for the extraction, collection and storage of hydrocarbons in deep-water conditions, is very complicated and expensive. It is noted that projects with annual production of up to 50 thousand barrels are not able to provide even a minimal profitability. In this article, we analyzed up-to-date oil production technologies and tried to identify possible alternatives for reducing the final cost of the project, and providing minimum profitability of small deposits.

Keywords: *floating production systems; storage and transportation of petroleum products; production platform; riser column; tie-down system.*

References

1. Adamyants P.P., Guseinov C.S., Iwaniec V.K. 2005. Proektirovaniye obustroystva morskikh neftegazovykh mestorozhdeniy [Design of construction of the offshore oil and gas deposits]. Moskva, JSC "TsentrlitNefteGaz", p. 345. (in Russian)
2. Borodavkin P.P. 2006. Morskie nefetgazovye sooruzheniya; uchebnik dlya vuzov. Chast 1. Konstruirovaniye [Offshore oil and gas structures: a textbook for high schools. Part 1. Construction]. Moskva, Nedra-Biznessentr, p. 237. (in Russian)
3. Borodavkin P.P. 2007. Morskie nefetgazovye sooruzheniya; uchebnik dlya vuzov. Chast 2. Tekhnologiya stroitelstva [Offshore oil and gas structures: a textbook for high schools. Part 2. Construction Technology]. Moskva, Nedra-Biznessentr, p. 278. (in Russian)
4. Grudnitskii G.V., Grudnitskii S.V., Egorov S.I., Mamut R. 2011. Morskie nefetgazovye tochechnye prichaly [Offshore Oil and Gas single-point moorings]. Moscow, p. 368. (in Russian)
5. Guseinov C.S. 2012. Osvoenie uglevodorodnykh resursov Severnogo Ledovitogo okeana – blizhayshaya i neotlozhnaya perspektiva [Development of hydrocarbon resources in the Arctic Ocean: the nearest and high priority perspective]. Burenie i neft. 1:45-50. (in Russian)
6. Guseinov C.S., Musabirov A.A. 2012. Ledostoykaya samopodyomnaya platforma dlya zamerzayushchego melkovodya i sposob posledovatel'nogo montazha smennykh palub [Ice-resistant self-elevating platform for

- freezing shallow water and technique of successive mounting of removable decks]. *Burenie i neft.* 10: S. 18-20. (in Russian)
7. *Egorov S.I.* 2012. Aktualnye problemy proektirovaniya morskikh neftegazovykh tochechnykh prichalov [Actual problems of designing of offshore single-point moorings]. In *Neft, gaz i biznes.* 7: 3-5. (in Russian)
 8. *Katynkha P.B.* 2012. Tendentsii i perspektivy evolutsii neftetreydinga v Rossii [Trends and prospects of evolution of oil trading in Russia]. *Neft, gaz i biznes.* 7: 6-11. (in Russian)
 9. *Pravila klassifikatsii, postroyki i oborudovaniya plavuchikh burovых ustanovok i morskikh statsionarnykh platform* [Code of classification, construction and arrangement of the Mobile Offshore Drilling Units (MODU) and fixed offshore platforms (SMEs)]. St. Pb., Russian Maritime Register of Shipping, 2012.
 10. *Shibakin S.I., Shibakin P.C., Bulavin V.D.* 2003. Funktsionalnye mobilnye ustanovki dlya usloviy melkovodnogo shelfa zamerdzayushchikh morey [Functional mobile units for conditions of shallow shelf of the freezing seas]. In *Sostoyanie i perspektivy osvoeniya morskikh neftegazovykh mestorozhdeniy. Sbornik nauchnykh trudov,* LLC VNIIGAZ, pp. 231-238. (in Russian)
 11. *Parker G.* 1999. The FPSO Design and Construction Guidance Manual. Houston, USA Reserve Technology Institute, p. 121.
 12. *Parshall J.* 2008. Evolving Subsea Technology Tackles Huge New Risks of Today's Projects. *Journal of Petroleum Technology.* 60 (5): 40-47. doi: 10.2118/0508-0040-JPT
 13. *Luo Yong, Wang Hong-Wei.* Permanent versus disconnectable FPSOs, Deepwater Engineering Research Center, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China, p. 6.

ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ГЕОЛОГИЯ. 2015. ВЫПУСК 2 (27)

Редактор Н.И. Стрекаловская, корректор А.В. Цветкова

Подписано в печать 22.06.2015. Формат 60 x 84/8.

Усл. печ. л. 11,62. Тираж 500 экз. Заказ



Издательский центр Пермского государственного

национального исследовательского университета.

614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Подписной индекс журнала «Вестник Пермского университета. Геология» в Объединенном каталоге «Пресса России» – 41002

ISSN 1994-3601



9 771994 360593 >

Issue 2 (27) 2015

Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya

Выпуск 2 (27) 2015