

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 4
ИЮЛЬ—АВГУСТ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 г.

Выходит 6 раз в год



ФГБОУ ВО «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДочный УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ»

МОСКВА-2019

Известия высших учебных заведений. Геология и разведка
(Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Geologiya i Razvedka)
ISSN (print) 0016-7762

Proceedings of higher educational establishments.
Geology and Exploration
ISSN (online) 2618-8708

Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ)
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
(MGRI)

Свидетельство о регистрации СМИ:

ПИ №ФС77-59165 от 18.09.2014 г.

Председатель редакционного совета

В.А. Косьянов

Члены редакционного совета

А.И. Варламов, П.Н. Гусев, Е.А. Козловский,
Г.А. Машковцев, И.Г. Спиридонов, К.Н. Трубецкой (академик РАН)

Главный редактор

А.В. Лопатин (академик РАН)

Заместители главного редактора

В.В. Куликов, Ю.А. Попов

Члены редколлегии

М.М. Амро (Mohammed Musa Amro, Германия), О.С. Брюховецкий, М. Вердойа (Massimo Verdoya, Италия),
В.К. Гаранин, С.Д. Ганова, П.А. Игнатов, В.Ю. Керимов, Н.Б. Кузнецов, В.С. Куликов,
А.В. Малков, А.В. Маслов (чл.-корр. РАН), Ю.Б. Марин (чл.-корр. РАН), З.М. Назарова,
В.А. Петров (чл.-корр. РАН), П.Ю. Плечов (профессор РАН), А.В. Самсонов (чл.-корр. РАН),
К.Ж. Семинский, Н.В. Соловьев, С.А. Тихоцкий (чл.-корр. РАН), А.В. Толстов, В.Ю. Фридовский,
Ш. Хуанг (Shaopeng Huang, Китай, США)
Е.Н. Щурова (ответственный секретарь)

Редакция журнала

Е.Н. Щурова (заведующая редакцией), С.Г. Серов (ведущий редактор)

Сдано в набор 15.07.2019.
Бумага офсет. № 1
Уч.-изд л. 10,50.

Подписано в печать 15.08.2019.
Гарнитура Таймс
Тираж 200 экз.

Формат 60×90/8.
Усл. печ. л. 10,50.
Отпечатано в типографии
ООО «Принт», Ижевск

Адрес редакции: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, МГРИ. Тел.: 8(495)433-61-66.
E-mail: journal-geology@mgri.ru, shchurovaen@mgri.ru. Internet: <http://geology.mgri-rggru.ru/>

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА
2019, № 4

СОДЕРЖАНИЕ

Геология

Молошников С.В., Линкевич В.В. К изменчивости ботриолепидид (Placodermi, Antiarchi): необычный экземпляр *Livnolepis Heckeri* (Lukševičs) из фауны Тверской области . . . 5

Минералогия, петрография, литология

Гореликова Н.В., Таскаев В.И., Рассулов В.А. Структурно-химическая неоднородность колломорфного касситерита и минералы In, Pb, As в оловянных рудах месторождения Верхнее (Приморье, Россия) . . . 11

Петроченков Д.А., Петров А.В. Минеральный состав и геммологические характеристики ювелирных аммонитов из карьера ОАО «Михайловцемент» Рязанской области . . . 18

Кузнецов В.Г., Журавлева Л.М. Цикличность палеозойского рифообразования разных порядков . . . 26

Полезные ископаемые, методика их поисков и разведки

Болонин А.В., Игнатов П.А., Петров А.В. Формирование кратера и эрозионный срез кимберлитовой трубки Архангельская (Россия) . . . 37

Антипова О.А., Постникова О.В., Якушев В.С., Милосердова Л.В. Литофациальные модели продуктивных от-

ложений мошакской свиты юго-запада Сибирской платформы . . . 44

Техника геолого-разведочных работ

Иванов А.Г., Иванов Д.А., Арсентьев Ю.А., Назаров А.П., Калинин В.Н. Особенности применения полимерных обсадных труб при сооружении технологических скважин подземного выщелачивания урана . . . 50

Гидрогеология и инженерная геология

Бураков М.М. Фильтрация подземных вод к выработкам большого диаметра . . . 58

Ярг Л.А., Фоменко И.К., Житинская О.М. Пути оптимизации углов заложения откосов карьера с учётом анизотропии прочностных свойств и трещиноватости скального массива (на примере Стойленского железорудного месторождения КМА) . . . 67

Геофизические методы поисков и разведки

Антонов Ю.В., Пономаренко И.А. Сейсмогравитационные пульсации на континентах земного шара . . . 78

PROCEEDINGS OF HIGHER EDUCATIONAL ESTABLISHMENTS
GEOLOGY AND EXPLORATION
2019, N 4

CONTENTS

Geology	
Moloshnikov S.V., Linkevich V.V. Some notes on a variability of Bothriolepidids (Placodermi, Antiarchi): unusual specimen of <i>Livnolepis Heckeri</i> (Lukševičs) from the famennian of Tver region, European Russia	5
Mineralogy, petrography, lithology	
Gorelikova N.V., Taskaev V.I., Rassulov V.A. Structural and chemical heterogeneity of colloform cassiterite and In, Pb, As minerals at the tin ores for the Verkhnee deposit (Primorye, Russia)	11
Petrochenkov D.A., Petrov A.V. Mineral composition and structural features of jewelry ammonites from the mine of OJSC «Mikhailovcement», Ryazan region	18
Kuznetsov V.G., Zhuravleva L.M. Different order cyclicity of the Paleozoic reef formation	26
Useful minerals, methods of their prospecting and exploration	
Bolonin A.V., Ignatov P.A., Petrov A.V. Crater formation and erosional truncation of Arkhangelskaya kimberlite pipe (Russia)	37
Antipova O.A., Postnikova O.V., Yakushev V.S., Miloserdova L.V. Lithofacial models of productive deposits of the Moshakov formation within the southwestern part of the Siberian platform	44
Geological exploration technique	
Ivanov A.G., Ivanov D.A., Arsent'ev Yu.A., Nazarov A.P., Kalinichev V.N. Features of the application of a polymer casing in the construction of production wells in underground leaching of uranium	50
Hydrogeology and engineering geology	
Burakov M.M. Filtration of the underground water to the workings of a large diameter	58
Yarg L.A., Fomenko I.K., Zhitinskaya O.M. The angles optimization algorithm of slopes laying on iron ore open cast mine considering anisotropy of strength properties and fracture density of the solid rock (on the example of Stoylensky iron ore open cast mine at Kursk Magnetic Anomaly)	67
Geophysical methods of prospecting and exploration	
Antonov Yu.V., Ponomarenko I.A. Seismogravitational pulsations on the continents of the Earth	78

The Journal «Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration» («Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Geologiya i Razvedka») has been published since 1958

ISSN (print) 0016-7762
ISSN (online) 2618-8708

Editor-in-Chief

Lopatin Alexey Vladimirovich, Academician of the Russian Academy of Science (RAS), Doctor of Biological Sciences, Director of the Borissiak Paleontological Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Deputy Editors-in-Chief

Kulikov Vladimir Vladislavovich, Doctor of Technical Sciences, Vice-Rector for Academic Affairs, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)

Popov Yuriy Anatol'evich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Skolkovo Institute of Science and Technology
Chairman of Advisory board

Kosyanov Vadim Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)

Founder and publisher: Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)

Official web-site: <http://mgri.ru/>

Actual address: 23, Miklukho-Maklaya's st., Moscow 117997, Russia, MGRI

Phone: 8 (495) 433-61-66

Journal web-site: <https://geology.mgri-rggru.ru>

e-mail: journal-geology@mgri.ru,
shchurovaen@mgri.ru

ГЕОЛОГИЯ
GEOLOGY

УДК 567:551.734.5

К ИЗМЕНЧИВОСТИ БОТРИОЛЕПИДИД (PLACODERMI, ANTIARCHI):
НЕОБЫЧНЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР LIVNOLEPIS HECKERI (LUKŠEVIČS)
ИЗ ФАМЕНА ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ*

С.В. МОЛОШНИКОВ¹, В.В. ЛИНКЕВИЧ²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (Музей земледования)
д. 1, Ленинские горы, г. Москва 119991, Россия
e-mail: molsergey@rambler.ru

²Андреапольский районный краеведческий музей имени Э.Э. Шимкевича
д. 9, Кленовая ул., г. Андреаполь 172800, Россия
e-mail: linkevichvalerij@rambler.ru

Описан фрагмент черепной крыши панцирной рыбы *Livnolepis heckeri* (Lukševičs) из отложений билловской свиты (фамен, верхний девон) у д. Билово Тверской области. Необычным как для этого вида, так и для других представителей семейства Bothriolepididae является характер прохождения борозд сейсмочувствительной системы по его наружной поверхности. В норме у ботриолепидид косая головная (центральная) ямочная линия переходит с затылочной на боковые кости. На обнаруженной задней части черепной крыши левая ветвь косой головной линии переходит с затылочной на краевую затылочную и только затем на боковую кость. Правая ветвь, доходя до заднебокового края затылочной, проходит вдоль шва между затылочной и краевой затылочной и переходит на боковую кость. На затылочной кости билловского экземпляра ветви косой ямочной линии расположены субпараллельно её заднему краю. Ранее у некоторых ботриолепидид (*Bothriolepis cellulosa* (Pander), *B. paradoxa* (Agassiz) и другие) ямочные линии с субпараллельным и параллельным расположением к заднему краю затылочных костей, проходящие спереди от надвисочных (надзатылочных) линий, определялись как средние, а не косые головные линии. Краевые затылочные кости с развитыми на них косыми ямочными линиями не были известны. Необычный характер прохождения сейсмочувствительных линий относится к индивидуальной изменчивости *L. heckeri*. Кратко рассматриваются виды изменчивости экзоскелета ботриолепидид и обсуждается развитие ямочных линий на черепной крыше ботриолепидид и астеролепидид.

Ключевые слова: палеонтология позвоночных; панцирные рыбы; антиархи; экзоскелет; сейсмочувствительная система; изменчивость; фамен; верхний девон; Тверская область; европейская часть России.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-4-5-10

SOME NOTES ON A VARIABILITY OF BOTHRIOLEPIDIDS (PLACODERMI,
ANTIARCHI): UNUSUAL SPECIMEN OF LIVNOLEPIS HECKERI (LUKŠEVIČS)
FROM THE FAMENNIAN OF TVER REGION, EUROPEAN RUSSIA

S.V. MOLOSHNIKOV¹, V.V. LINKEVICH²

¹Lomonosov Moscow State University, The Museum of Natural History
GSP-1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russian Federation
e-mail: molsergey@rambler.ru

²Andreapolsky natural history regional museum named after E.E. Shimkevich
9, Klenovaya street, Andreapol 172800, Russian Federation
e-mail: linkevichvalerij@rambler.ru

The fragment of the skull cap of placoderm *Livnolepis heckeri* (Lukševičs) from the Bilovo Formation (Famennian, Upper Devonian) near the Bilovo Village of Tver Region has been described. The character of the passage of sensory grooves on its external surface is unusual as for this species as for all other bothriolepidids. The oblique cephalic

pit-line (or central sensory) groove normally passes from the nuchal on the lateral bones. The left branch of the oblique cephalic pit-line groove on the studied specimen runs from the nuchal onto the paranuchal and only then on the lateral. The right branch of this pit-line groove reaches the posterolateral margin of the nuchal, passes along the suture between the nuchal and paranuchal and then transfers into the lateral bone. The branches of the oblique cephalic pit-line groove are subparallel to the posterior margin of the nuchal bone in the Bilovo specimen. The pit-line grooves, which run parallel and subparallel to the posterior margin of the nuchal and anteriorly to the supratemporal (supraoccipital) cross-commissural pit-lines, were earlier determined in some bothriolepidids (*Bothriolepis cellulosa* (Pander), *B. paradoxa* (Agassiz) and others) as the middle grooves but not the oblique cephalic. The paranuchals with the oblique cephalic pit-line grooves were earlier unknown. The unusual character of the passage of the sensory lines is referred to the individual variability in the exoskeleton of *L. heckeri*. Types of the bothriolepidid exoskeletal variability have been briefly considered. The passage of the pit-line grooves on the external surface of the bothriolepidid and asterolepidid skull roofs has been discussed.

Keywords: vertebrate palaeontology; placoderms; antiarchs; exoskeleton; sensory system; variability; Famennian; Upper Devonian; Tver Region; European Russia.

Ботриолепидиды (Bothriolepididae) — географически широко распространенное в девонское время и таксономически разнообразное семейство настоящих антиарх (Euantiarchi). Эта группа панцирных рыб относится к числу руководящих ископаемых для верхнедевонских континентальных и прибрежно-морских отложений. В наружном костном панцире (экзоскелете) многих представителей ботриолепидид часто наблюдается существенная изменчивость его элементов. Например, у *Livnolepis zadonica* (Н.Оbrucheva), известного по многочисленным экземплярам из задонских отложений Центрального девонского поля [14, 15], выделяются два типа изменчивости экзоскелета: возрастная (онтогенетическая) и индивидуальная. С возрастом у *L. zadonica* могут меняться форма и пропорции костей, скульптура на них, а также исчезают борозды сейсмочувствительной системы с наружной поверхности панциря. Индивидуальная изменчивость в экзоскелете *L. zadonica* заключается в изменении формы костей, характере их налегания друг на друга, разном угле их сводчатости и типе прохождения сейсмочувствительных борозд. Подобные и другие виды изменчивости экзоскелета известны у многих ботриолепидид. Среди них возрастные изменения формы и пропорций костей у *Bothriolepis canadensis* (Whiteaves) [17, 18], появление дополнительных костей в черепной крыше и туловищном панцире некоторых экземпляров последнего [11, 17], а также у *B. hayi* Miles [13], развитие дополнительных задних косых туловищных ямочных линий и изменение характера налегания туловищных костей друг на друга у *B. gigantea* Traquair [13], индивидуальное изменение типа прохождения сейсмочувствительных борозд у *B. cellulosa* (Pander) [17], *B. ciecere* Lyarskaja [2], *Grossilepis tuberculata* (Gross) [17] и другие.

Целью данной работы является описание изменчивости в прохождении борозд сейсмочувствительной системы у *Livnolepis heckeri* (Lukševičs). Этот вид был первоначально выделен только по трём экземплярам в составе рода *Bothriolepis* Eichwald [12]. В настоящее время из типового местонахождения собран богатый материал, позволивший уточнить систематическое положение этого вида и

рассмотреть особенности его морфологического строения [4—6].

Материал и обсуждение

В мае 2019 г. во время полевых работ один из авторов (В.В. Линкевич) в отложениях биловской свиты (средний фамен) на левом берегу р. Малый Тудёр у д. Билово (Торопецкий р-н, Тверская обл.) обнаружил необычный фрагмент черепной крыши *L. heckeri*. Остатки этого вида часто встречаются как в известковых, так и глинистых отложениях биловской свиты, относимой к лебедянскому горизонту [7]. *L. heckeri* обладал сводчатой черепной крышей и сравнительно высоким туловищным панцирем с развитым срединным спинным гребнем [4—6, 12]. Найденный фрагмент представлен задней частью черепной крыши особи среднего возраста и образован затылочной (nuchale), заднеpineальной (postpineale), краевыми затылочными (paranuchalia) и небольшими фрагментами боковых (lateralia) костей в сочленении (рис. 1). Как и у большинства ботриолепидид на его наружной поверхности хорошо развиты борозды сейсмочувствительной системы: верхняя инфраорбитальная борозда (ifc 1), косая головная или центральная (ifc.b) и средняя ямочные линии (mpg). Однако необычным является характер прохождения косой головной линии. В норме у *L. heckeri*, как и у других представителей семейства Bothriolepididae, эта борозда переходит с nuchale на lateralialia и обычно заканчивается в районе орбито-носовой вырезки (orb). Косая ямочная линия при этом пересекает переднебоковые края затылочной и заднемедиальные края боковых костей. На обнаруженном фрагменте черепной крыши левая ветвь косой борозды переходит с затылочной на краевую затылочную и только затем на боковую кость (рис. 1, в). При этом она пересекает заднебоковой край nuchale и заднебоковой край левой lateralialia. Правая ветвь косой головной линии, доходя до заднебокового края nuchale, проходит вдоль шва между этой костью и paranuchale и затем — на lateralialia (рис. 1, г). Таким образом, ветви косой линии на описываемом биловском экземпляре расположены несколько

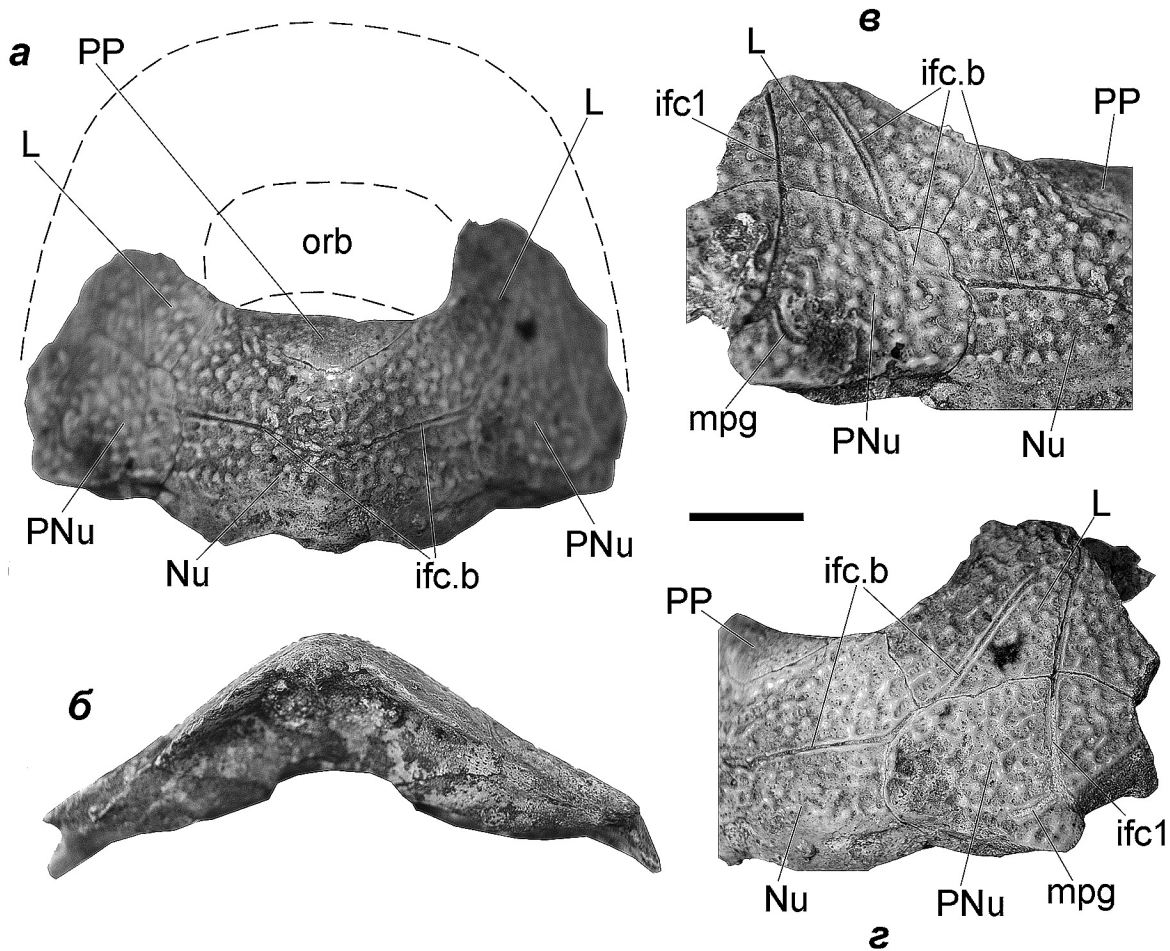


Рис. 1. Неполная черепная крыша особи среднего возраста *Livnolepis heckeri* (Lukševičs), экз. КМА/4934-1; биловская свита, фамен, верхний девон; д. Билово, Тверская область: а — сверху, б — сзади, в — левая и г — правая стороны, показывающие необычный характер прохождения косой головной ямочной линии; ifc1 — верхняя подглазничная (инфраорбитальная) борозда; ifc.b — косая головная ямочная линия; L — боковая кость; mpg — средняя ямочная линия; Nu — затылочная; orb — орбито-носовая вырезка; PNu — краевая затылочная; PP — заднепинеальная кость, масштабная линейка — 1 см

асимметрично. В пределах затылочной кости косая головная ямочная линия направлена не как обычно у ботриолепидид косо вперед, а почти параллельно её заднему краю (рис. 2, а).

Похожее расположение косой головной линии, напоминающее прохождение правой ветви на рассматриваемом экземпляре из Билово, отмечалось на черепной крыше молодой особи *B. cellulosa* [17, text-fig. 219 A] и некоторых затылочных костях *G. tuberculata* [17, text-fig. 267 K, L]. На них правая и левая ветви косой линии проходят к боковым углам puchale и затем переходят на lateralia, но при этом они направлены косо вперед и на paranuchalia не заходят. Также расположена и левая ветвь косой головной линии у *Bothriolepis askini* Young [19, text-fig. 7, B]. Однако ямочные линии с параллельным и субпараллельным расположением к заднему краю затылочных костей, направленные к заднебоковым краям последних и проходящие спереди от надвисочных (надзатылочных) линий, у ботриолепидид обычно определялись как средние

линии (mpg). Они известны, например, у *G. tuberculata*, *B. cellulosa* и *B. paradoxa* (Agassiz) (рис. 2, б–д). Именно в таком направлении ветви средней ямочной линии проходят у астеролепидид (рис. 2, е–з), в крыше черепа большинства представителей которых косые головные ямочные линии не развиты [1, 3, 8–10]. Ветви средней линии у астеролепидид, проходя параллельно (субпараллельно) заднему краю затылочных костей, переходят на краевые затылочные и соединяются на этих костях с верхней инфраорбитальной бороздой. На обнаруженном фрагменте черепной крыши *L. heckeri* одновременно присутствуют косая и средняя ямочные линии. Косая головная линия выражена только одна. У некоторых ботриолепидид может присутствовать две косых линии: передняя (ifc.b1) и задняя [17]. Расположенные субпараллельно заднему краю ветви косой линии на puchale биловского экземпляра не соединяются со средней ямочной линией на paranuchale. Ветви средней линии очень короткие и развиты только в заднебоковых

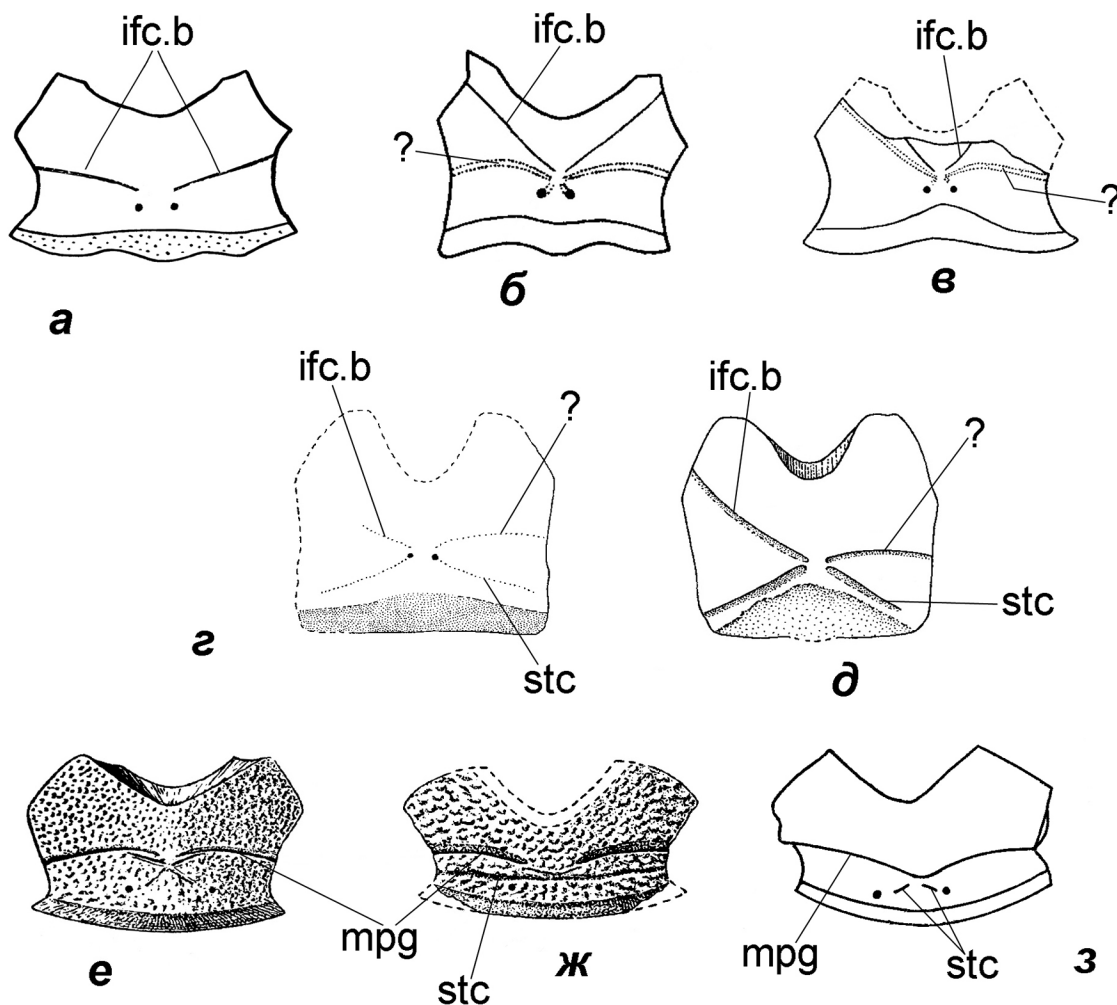


Рис. 2. Затылочные кости ботриолепид и астеролепид с развитыми на них ямочными линиями, проходящими параллельно и субпараллельно заднему краю костей: *a* – *Livnolepis heckeri* (Lukševičs), экз. № KMA/4934-1; *б* – *Grossilepis tuberculata* (Gross), по [17]; *в* – *Bothriolepis cellulosa* (Pander); *г*, *д* – *B. paradoxa* (Agassiz), по [13]; *е*, *ж* – *Asterolepis säve-söderberghi* Stensiö, по [17]; *з* – *A. essica* Lyarskaja, по [3]; ifc.b – косая головная ямочная линия; ifc.bl – передняя косая головная ямочная линия; mpg – средняя ямочная линия; stc – надвисочная (надзатылочная) ямочная линия; ? – линии, определенные у ботриолепид как средние ямочные, но возможно, являющиеся косыми головными с индивидуальным отклонением в расположении; показано вне масштаба

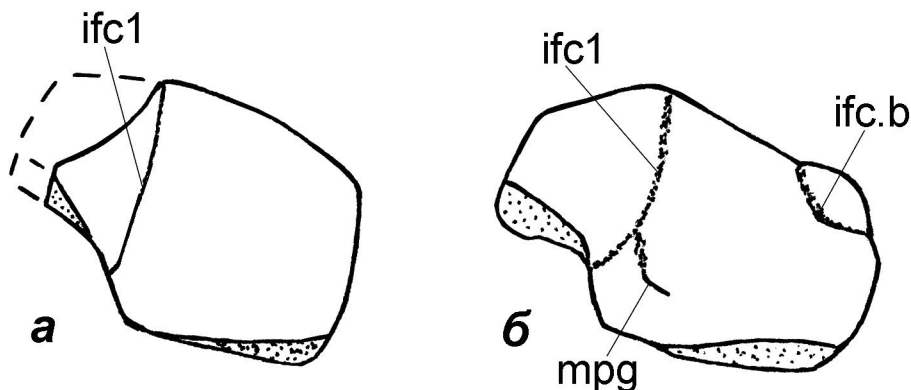


Рис. 3. Левые краевые затылочные кости *Livnolepis heckeri* (Lukševičs) особей среднего возраста, наружная сторона: *a* – с нормальным для ботриолепид прохождением сеймо-сенсорных борозд: косая головная ямочная линия не развита, экз. № KMA/4934-2; *б* – с индивидуальным отклонением в расположении борозд – в медиальном отделе кости развита косая головная ямочная линия, экз. № KMA/4934-1; ifc1 – верхняя подглазничная (инфраорбитальная) борозда; ifc.b – косая головная ямочная линия; mpg – средняя ямочная линия; масштабная линейка – 1 см

частях краевых затылочных костей (рис. 1, *в*, *г*: *mpg*). На других экземплярах краевых затылочных костей *L. heckeri* ветви средней ямочной линии не наблюдаются (рис. 3, *а*). Всё это позволяет предположить, что ямочные линии с параллельным и субпараллельным расположением заднему краю отдельных затылочных костей, проходящие спереди от надвисочных и определенные ранее как средние, у других ботриолепидид (рис. 2, *б–д*), могут являться на самом деле косыми головными линиями с индивидуальным отклонением в их прохождении.

Описанный экземпляр крыши черепа *L. heckeri* (экз. № КМА/4934-1) и левое *paranuchale*, изображенное в настоящей работе (экз. № КМА/4934-2), хранятся в Андреапольском районном краеведческом музее имени Э.Э. Шимкевича, г. Андреаполь Тверской области.

Заключение

Несмотря на частые описания изменчивости в развитии сейсмоденситивных борозд на наружной поверхности экзоскелета ботриолепидид, досто-

верное присутствие косой головной ямочной линии на наружной поверхности *paranuchale* ранее не отмечалось. Изученный необычный характер прохождения борозд сейсмоденситивной системы относится к индивидуальной изменчивости *L. heckeri*, так как из билковского местонахождения известны черепные кости этого вида с нормальным для ботриолепидид прохождением борозд (рис. 3) [4–6]. Описанный и изображенный материал из билковского местонахождения дополняет известные данные о *L. heckeri*, а также о возможных вариантах изменчивости элементов экзоскелета представителей семейства Bothriolepididae.

Степень развития и характер прохождения сейсмоденситивных борозд в головном панцире рассматриваются при построении системы надродовых таксонов и филогенеза антиарх [16]. Возможность индивидуальных отклонений в прохождении борозд этой системы органов чувств должны учитываться при выборе критериев систематики и реконструкции филогенеза панцирных рыб, особенно для таксонов, известных по единичным и фрагментарным экземплярам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каратайте-Талимаа В.Н. Род *Asterolepis* из девонских отложений Русской платформы // Вопросы геологии Литвы. Вильнюс: Ин-т геол. геогр., 1963. С. 65–224.
2. Лукшевич Э.В. Ботриолепиды кетлерской свиты верхнего девона Латвии (*Pisces*, *Placodermi*) // Природа и музей. Сер. палеонтол. 1991. Вып. 3. С. 38–50.
3. Лярская Л.А. Панцирные рыбы девона Прибалтики: *Asterolepidae*. Рига: Зинатне, 1981. 152 с.
4. Молошников С.В., Линкевич В.В. Новые данные по позднедевонской ихтиофауне Тверской области (Билово, р. Малый Тудер) // Интегративная палеонтология: перспективы развития для геологических целей. Материалы 63 сессии Палеонтологического общества при РАН (3–7 апреля 2017 г., Санкт-Петербург). СПб., 2017. С. 196–198.
5. Молошников С.В., Линкевич В.В. Систематическое положение фаменских антиарх (*Vertebrata*, *Placodermi*) Тверской области // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2017. № 2. С. 8–14.
6. Молошников С.В., Линкевич В.В. Морфология и систематическое положение некоторых фаменских ботриолепидид (*Placodermi*, *Antiarchi*) Тверской области // Морфологическая эволюция и стратиграфические проблемы. Материалы 65 сессии Палеонтологического общества при РАН (1–5 апреля 2019 г., Санкт-Петербург). СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2019. С. 249–251.
7. Решение межведомственного регионального стратиграфического совещания по среднему и верхнему палеозою Русской платформы, с региональными стратиграфическими схемами. Л., 1988. Девонская система. Л., 1990. 58 с.
8. Denison R. *Placodermi* // Handbook of Palaeoichthyology. Stuttgart, New York: Gustav Fischer Verlag, 1978. 128 p.
9. Gross W. *Asterolepis ornata* Eichw. und das Antiarchi-Problem // Palaeontogr. 1931. Bd. 75. S. 1–62.
10. Gross W. Die Fische des Baltischen Devons // Palaeontogr. A. 1933. Bd. 79. S. 1–97.
11. Gross W. Über Knochen-Mißbildungen bei *Asterolepiden* // Paläontol. Z. 1942. Bd. 23. № 1/2. S. 206–218.
12. Lukševičs E. Bothriolepid antiarchs (*Vertebrata*, *Placodermi*) from the Devonian of the north-western part of the East European platform // Geodiversitas. 2001. V. 23. № 4. P. 489–609.
13. Miles R.S. The Old Red Sandstone Antiarchs of Scotland: family Bothriolepididae // Palaeontogr. Soc. Monogr. 1968. № 130. P. 1–130.
14. Moloshnikov S. Crested antiarch *Bothriolepis zadonica* H.D. Obrucheva from the Lower Famennian of Central European Russia // Acta Palaeontol. Pol. 2004. V. 49. № 1. 135–146.
15. Moloshnikov S.V. Devonian antiarchs (*Pisces*, *Antiarchi*) from Central and Southern European Russia // Paleontol. J. 2008. V. 42. № 7. P. 691–773. DOI: 10.1134/S0031030108070010.
16. Pan Zh., Zhu M., Zhu Y., Jia L. A new antiarch placoderm from the Emsian (Early Devonian) of Wuding, Yunnan, China // Alcheringa: An Austral. J. Palaeontol. 2017. V. 42. № 1. P. 10–21. DOI: 10.1080/03115518.2017.1338357.
17. Stensiö E. On the Placodermi of the Upper Devonian of East Greenland II. Antiarchi: subfamily Bothriolepinae // Palaeozoöl. Groenl. 1948. Bd. 2. P. 1–622.
18. Werdelin L., Long J. Allometry in the placoderm *Bothriolepis canadensis* and its significance to antiarch evolution // Lethaia. 1986. V. 19. № 2. P. 161–169.
19. Young G.C. Antiarchs (*Placoderm fishes*) from the Devonian Aztec Siltstone, Southern Victoria Land, Antarctica // Palaeontogr. Abt. A. 1988. Bd. 202. P. 1–125.

REFERENCES

1. Karatayute-Talimaa V.N. Rod *Asterolepis* iz devonskih otlozhenii Russkoi platformi [The genus *Asterolepis* from the Devonian of Russian Platform]. *Voprosi geologii Litvi* [The Geology of Lithuania]. Vilnius, Institute Geol. and Geogr. Publ., 1963, pp. 65–224. (In Russian).
2. Lukševich E.V. Botriolepidi ketlerskoi sviti verkhnego devona Latvii (*Pisces*, *Placodermi*) [The bothriolepidids of the Upper

- Devonian Ketleri Formation of Latvia (Pisces, Placodermi)]. *Priroda i Muzei. Seriya paleontologicheskaya* [Nature and Museum. Palaeontological Series], 1991, no. 3, pp. 38–50. (In Russian).
3. Lyarskaya L.A. *Pantsirnie ribi Pribaltiki: Asterolepididae* [Placoderms of the Baltic Stages: Asterolepididae]. Riga, Zinatne Publ., 1981, 152 p. (In Russian).
4. Moloshnikov S.V., Linkevich V.V. Novie dannie po pozdnedevonskoi ikhtiofaune Tverskoi oblasti (Bilovo, r. Malii Tuder) [New data on the Late Devonian ichthyofauna of Tver Region (Bilovo, Malii Tuder River)]. *Integrativnaya paleontologiya: perspektivi razvitiya dlya geologicheskikh tselei. Materiali 63 sessii Paleontologicheskogo obshchestva pri RAN (3–7 aprelya 2017 g., Sankt-Peterburg)* [Integrative palaeontology: perspective of a development for geology. Proc. of the 63 Session of the Palaeontological Society at Russian Academy of Sciences (April 3–7, 2017, St.-Petersburg)]. St.-Petersburg, 2017, pp. 196–198. (In Russian).
5. Moloshnikov S.V., Linkevich V.V. Sistematicheskoe polozhenie famenskikh antiarch (Vertebrata, Placodermi) [Systematic position of antiarchs (Vertebrata, Placodermi) from the Famennian of Tver Region, Russia]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2017, no. 2, pp. 8–14. (In Russian).
6. Moloshnikov S.V., Linkevich V.V. Morfologiya i sistematicheskoe polozhenie nekotorykh famenskikh bothriolepidid (Placodermi, Antiarchi) Tverskoi oblasti [Morphology and systematic position of some bothriolepids (Placodermi, Antiarchi) from the Famennian of Tver Region]. *Morfologicheskaya evolyutsiya i stratigraficheskie problemi. Materiali 65 sessii Paleontologicheskogo obshchestva pri RAN (1–5 aprelya 2019 g., Sankt-Peterburg)* [Morphological evolution and stratigraphical problems. Proc. of the 65 Session of the Palaeontological Society at Russian Academy of Sciences (April 1–5, 2019, St.-Petersburg)]. St.-Petersburg, Kartfabrika VSEGEI, 2019, pp. 249–251. (In Russian).
7. *Reshenie mezhdomstvennogo regionalnogo stratigraficheskogo sovetshaniya po srednemu i verkhnemu paleozoyu Russkoi platformy, s regionalnimi stratigraficheskimi skhemami. Leningrad, 1988, devonskaya sistema* [The decision of the Interdepartmental Regional Stratigraphical Meeting on the Middle and Upper Paleozoic of Russian Platform, with the regional stratigraphical schemes, Leningrad, 1988, Devonian System]. Leningrad, 1990, 58 p. (In Russian).
8. Denison R. *Placodermi. Handbook of Palaeoichthyology*. Stuttgart, New York, Gustav Fischer Verlag, 1978, 128 p.
9. Gross W. *Asterolepis ornata* Eichw. und das Antiarchi-Problem. *Palaeontogr.*, 1931, Bd. 75, Ss. 1–62.
10. Gross W. Die Fische des Baltischen Devons. *Palaeontogr. A.*, 1933, Bd. 79, Ss. 1–97.
11. Gross W. Über Knochen-Mißbildungen bei Asterolepiden. *Palaeontol. Z.*, 1942, Bd. 23, no. 1/2, pp. 206–218.
12. Lukševičs E. Bothriolepid antiarchs (Vertebrata, Placodermi) from the Devonian of the north-western part of the East European platform. *Geodiversitas*, 2001, vol. 23, no. 4, pp. 489–609.
13. Miles R.S. The Old Red Sandstone Antiarchs of Scotland: family Bothriolepididae. *Palaeontogr. Soc. Monogr.*, 1968, no. 130, pp. 1–130.
14. Moloshnikov S. Crested antiarch *Bothriolepis zadonica* H.D. Obrucheva from the Lower Famennian of Central European Russia. *Acta Palaeontol. Pol.*, 2004, vol. 49, no. 1, pp. 135–146.
15. Moloshnikov S.V. Devonian antiarchs (Pisces, Antiarchi) from Central and Southern European Russia. *Paleontol. J.*, 2008, vol. 42, no. 7, pp. 691–773. DOI: 10.1134/S0031030108070010.
16. Pan Zh., Zhu M., Zhu Y., Jia L. A new antiarch placoderm from the Emsian (Early Devonian) of Wuding, Yunnan, China. *Alcheringa: An Austral. J. Palaeontol.*, 2017, vol. 42, no. 1, pp. 10–21. DOI: 10.1080/03115518.2017.1338357.
17. Stensiö E. On the Placodermi of the Upper Devonian of East Greenland II. Antiarchi: subfamily Bothriolepinae. *Palaeozool. Groenl.*, 1948, Bd. 2, pp. 1–622 p.
18. Werdelin L., Long J. Allometry in the placoderm *Bothriolepis canadensis* and its significance to antiarch evolution. *Lethaia*, 1986, vol. 19, no. 2, pp. 161–169.
19. Young G.C. Antiarchs (Placoderm fishes) from the Devonian Aztec Siltstone, Southern Victoria Land, Antarctica. *Palaeontogr. Abt. A.*, 1988, Bd. 202, pp. 1–125.

МИНЕРАЛОГИЯ, ПЕТРОГРАФИЯ, ЛИТОЛОГИЯ
MINERALOGY, PETROGRAPHY, LITHOLOGY

УДК 548.549

СТРУКТУРНО-ХИМИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ КОЛЛОМОРФНОГО
КАССИТЕРИТА И МИНЕРАЛЫ In, Pb, As В ОЛОВЯННЫХ РУДАХ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЕРХНЕЕ (ПРИМОРЬЕ, РОССИЯ)*

Н.В. ГОРЕЛИКОВА¹, В.И. ТАСКАЕВ¹, В.А. РАССУЛОВ²

¹ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМАН РАН)
35, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия
e-mail: ngor@igem.ru, ttvtest@yandex.ru

²Всероссийский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского
31, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия
email: rassulov@mail.ru

Изучены колломорфные оловянные руды месторождения Верхнее в Приморском крае с помощью рентгеноспектрального микроанализа и сканирующего электронного микроскопа с энергодисперсионным анализатором LINK-ISIS, что позволило выявить первичную и вторичную зональности колломорфного касситерита и установить фазовый состав этих образований. Первичная зональность минерала возникает на ранней стадии отложения станнатов из коллоидных растворов и характеризуется чередованием гидростаннатов разного состава. Вторичная зональность является наложенной и формируется в процессе раскристаллизации станнатов. Метаколлоидные разности концентрически-зональных агрегатов образованы гидростаннатами Ca, Fe, Cu, In переменного состава, растворимыми в кислотах, в которых отмечаются примеси As, Al, Si, Cd, Co, Sb, Zn, Ag. Содержание Sn в них, по данным энергодисперсионного анализа, составляет 42—54%. ИК-спектроскопия позволила выявить в гидростаннатах гидроксильную воду в области валентных колебаний Sn-OH. В колломорфном касситерите выявлена новая фаза Pb₅As₂O₈ с различным соотношением Pb и As размером 30—50 мк.

Ключевые слова: оловянное месторождение; Кавалеровский район; колломорфный касситерит; гидростаннаты; индит; джалиндит; зональность касситерита.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-4-11-18

STRUCTURAL AND CHEMICAL HETEROGENEITY OF COLLOFORM CASSITERITE
AND In, Pb, As MINERALS AT THE TIN ORES FOR THE VERKHNEE DEPOSIT
(PRIMORYE, RUSSIA)

N.V. GORELIKOVA¹, V.I. TASKAEV¹, V.A. RASSULOV²

¹Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (IGEM RAS)
35, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia
e-mail: ngor@igem.ru, ttvtest@yandex.ru

²Federal State Budgetary Institution «All-Russian Scientific-research Institute of Mineral Resources
named after N.M.Fedorovsky» (FSBI VIMS)
31, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia
e-mail: rassulov@mail.ru

The colloform tin ores from the deposit Verkhnee at the Primorye have been studied with the aid of X-ray spectroscopic microanalysis and the scanning electron microscopy with the energy dispersive analyzer LINK-ISIS that allowed revealing the primary and the secondary zoning of a colloform cassiterite and to determine the phase composition of these formations. The primary zoning of the mineral forms at the early stage of the deposition of stannates from colloidal solutions and is characterized by the alternation of hydrostannates of various composition. The secondary zoning is superimposed zonality, and it forms at the process of the stannate crystallization. The metacolloidal varieties of concentric-zonal aggregates are produced by hydrostannates of Ca, Fe, Cu, In, of variable compositions, soluble in acids, in which the admixtures of As, Al, Si, Cd, Co, Sb, Zn, Ag are marked. Sn content according to the energy dispersive analysis is 42–54%. Infrared adsorption spectroscopy allowed finding out in hydrostannates the presence of the hydroxyl water at the area of the valence vibrations Sn-OH. In the colloform cassiterite a new phase $Pb_5As_2O_8$ with various correlation of Pb and As in size 30–50 mk has been found.

Key words: tin deposit; Kavalerovo district; colloform cassiterite; hydrostannates; indite, dzhallindite; cassiterite zoning.

Ф.В. Чухров придавал большое значение роли коллоидов в формировании руд и впервые охарактеризовал процессы, сопровождающие отложение метакolloидных минералов [6]. В оловянных месторождениях колломорфные образования сфалерита и касситерита описаны Е.А. Радкевич [5], кристаллизация которых происходила, по её мнению, из сложного геля. В оловянных месторождениях Боливии [8] значительная часть диоксида олова первоначально выделялась в виде гелей в результате разложения станнатов. Метакolloидный касситерит в риолитах впервые описан в третичных риолитах Невады [9] и в гематит-касситеритовых прожилках с почкообразными агрегатами деревянистого олова в штате Новая Мексика [10]. Колломорфные оловянные руды имеют, как правило, тонкополосчатое строение, обусловленное чередованием кристаллических разностей касситерита и метакolloидных образований, состоящих из гидростаннатов, растворимых в кислотах [2]. Гидростаннаты детально изучены в окисленных рудах зоны гипергенеза в оловянных месторождениях Киргизии и Якутии [3], которые образовались как вторичные минералы в результате замещения станнина. В окисленных рудах месторождений Мушистон, Трудовое, Кестер и Сары-Булак установлено несколько разновидностей гидростаннатов (висмирновит, натанит, мушистонит), которые утверждены как новые минералы [3].

Оловорудное месторождение Верхнее

Нами исследованы гипогенные оловянные колломорфные руды из глубоких горизонтов (XII–XV) касситерит-хлоритового месторождения Верхнее, расположенного в Кавалеровском рудном районе Приморского края. Месторождение штокверкового типа открыто в 1956 г., разрабатывалось Хрустальненским ГОК во второй половине XX в., его отработка прекращена в 1990-е гг. из-за плохой конъюнктуры на рынке оловянных концентратов.

Месторождение Верхнее — единственный объект Кавалеровского района, на котором основные рудные тела относятся к штокверковому типу. Имеющиеся в верхней части месторождения единичные жилы, за исключением рудного тела зоны

Главной, промышленной ценности не имеют. С глубиной за счёт появления новых «слепых» рудных тел роль промышленных жил несколько повышается, однако основное промышленное оруденение, благодаря которому месторождение относится к разряду сверхкрупных, связано с обширной штокверковой залежью, сменяющей жилы на глубине. Содержание в штокверке олова с глубиной уменьшается при одновременном увеличении мощности рудной залежи.

Разведанные балансовые запасы олова месторождения (категорий А+В+С₁) на 01.01.2014 г. составляли 93,7 тыс. т., при среднем содержании олова в рудах 0,30 %, предварительно оценённые (С₂) — 6,0 тыс. т. Месторождение находится в нераспределённом фонде недр.

Рудные тела, образующие штокверковые и линейные минерализованные зоны, приурочены к контакту эрдагуесской и лифудзинской свит нижнемелового-юрского возраста и залегающие в изменённых окварцованных и хлоритизированных песчаниках и алевролитах. Ранние прожилки субширотного простирания пересекаются более поздними субмеридиональными, залеченными сульфидными — пирротинном, арсенопиритом, пиритом, сфалеритом и редким галенитом. Оловянная минерализация представлена касситерит-хлорит-сульфидными рудами, сформировавшимися в три стадии — касситерит-арсенопирит-кварцевую, кварц-сульфидную и кварц-карбонатно-сульфидную. Руды характеризуются интенсивным развитием хлорита и Са-содержащих минералов (эпидота, аксинита и карбонатов) и вкрапленностью неокисленных арсенопирита и пирротина. Кварц-касситерит-карбонатные и кварц-сульфидные прожилки пересечены прожилками папиришпата. В штокверке N1 и жиле N7 в касситерит-хлоритовых рудах с арсенопиритом обнаружены участки с колломорфными оловянными рудами, состоящими из сферолитовых и фестончатых агрегатов, представляющих чередование зон скрытокристаллического и тонкокристаллического касситерита, в которых отмечается избирательная, в некоторых участках полная раскристаллизация метакolloидного вещества с образованием тонкоигольчатых кристаллов касситерита (рис. 1).

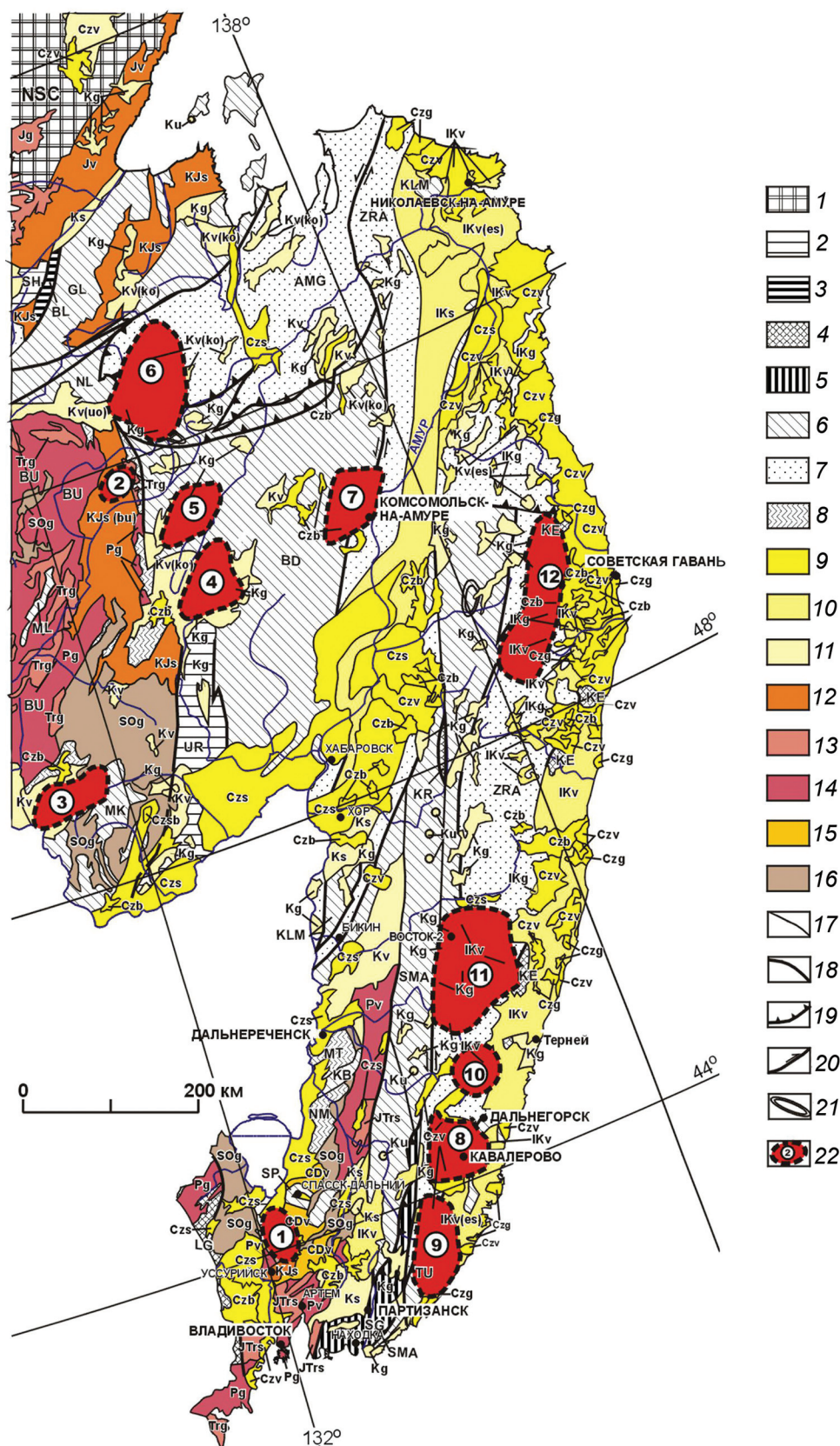


Рис. 1. Рудные районы юга Дальнего Востока (Ханчук, 2000): 1 – Северо-Азиатский кратон; 2–8 – террейны: 2 – пассивной континентальной окраины; 3 – кратона; 4 – островной дуги; 5 – активной континентальной окраины; 6 – аккреционной призмы; 7 – турбидитового бассейна; 8 – метаморфический; 9–16 – разновозрастные отложения и постаккреционные комплексы: 9 – кайнозойские; 10 – позднемеловые; 11 – ранне- и позднемеловые; 12 – позднерюрийские и раннемеловые; 13 – позднепермские и раннерюрийские; 14 – среднекарбоновые и раннетриасовые; 15 – девонские и раннекарбоновые; 16 – ордовикские и силурийские; 17–21 – геологические границы и тектонические структуры: 17 – границы; 18 – разломы; 19 – надвиги; 20 – сдвиги; 21 – комплексы метаморфических ядер; 22 – оловянные районы: 1 – Вознесенский; 2 – Ниманский; 3 – Хинган-Олонойский; 4 – Баджалский; 5 – Дуссе-Алинский; 6 – Эзоп-Ямалинский; 7 – Комсомольский; 8 – Кавалеровский; 9 – Фурмановский; 10 – Верхне-Уссурийский; 11 – Арминский; 12 – Северо-Сихотэ-Алинский

Колломорфные руды месторождения Верхнее

Изучение оловянных руд различных месторождений свидетельствует о том, что значение коллоидных растворов при рудоотложении имеет большее значение, чем ранее считалось, причём на некоторых месторождениях оловорудные тела с колломорфным касситеритом не являются низкотемпературными образованиями, что подтверждается данными термобарогеохимии (рис. 2).

Выявляется структурно-химическая неоднородность касситерита, выражающаяся в первичной зональности отложения гидростаннатов (Sn , $\text{Fe}(\text{OH})_6$) из коллоидных растворов и вторичной зональности перекристаллизации гидростаннатов в кристаллический касситерит. Установлена высокая индиенность колломорфного касситерита, обусловленная присутствием в тончайших кварцевых прожилках минералов индия — индита и замещающего его гидроксида In (джалиндита). Исследование руд с помощью сканирующей электронной микроскопии показало, что почки касситерита имеют неоднородное строение. Ядра и внешние зоны почек сложены полнокристаллическим касситеритом, причем размеры отдельных кристаллов не превышают нескольких микрон (рис. 3, 4).

Сферолиты колломорфного касситерита оконтуривают кристаллы раннего гексагонального зонального кварца, на которые нарастает темно-коричневый кристаллический касситерит основной генерации, что характеризует время выделения в промежутке между ранним гексагональным кварцем 1-й генерации и кварцем 2-й генерации, ассоциирующим с кристаллическим касситеритом. Это доказывает, что колломорфные агрегаты выделялись в раннюю стадию гидротермального процесса — до кристаллизации основной массы касситерита различного цвета и разной степени кристалличности.

В касситерит-кварцевых рудах наблюдаются сферолиты округлой и удлинённой форм с тонким чередованием зон различной окраски и разной степени кристалличности. Как правило, центральные зоны сферолитов сложены метакolloидными разностями, а внешние состоят из чередующихся кристаллических разностей тёмно-коричневого касситерита и тонких зон тонкодисперсного рыхлого вещества кремового, молочно-белого, серого и песочного цвета фарфоровидного облика. В процессе раскристаллизации метакolloидного касситерита сначала появляется агрегат тонкоигольчатых кристаллов, которые в результате собирательной перекристаллизации превращаются в радиально-лучистые агрегаты. Изучение колломорфных агрегатов касситерита с помощью рентгеноспектрального микроанализа и сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализатором LINK-ISIS позволило установить фа-

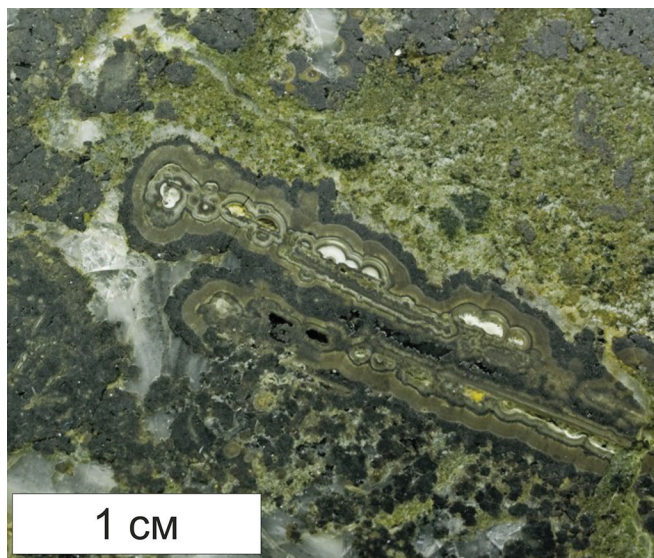


Рис. 2. Удлиненные сфероиды колломорфного касситерита, сложенные гидростаннатами и кристаллическим касситеритом, в касситерит-карбонатно-хлоритовой породе

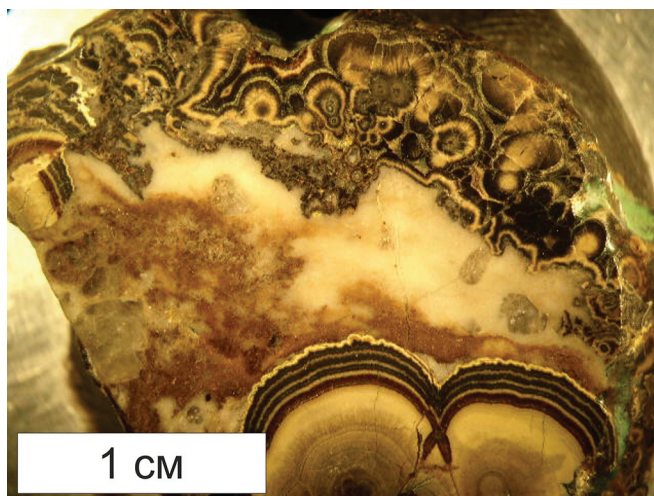


Рис. 3. Колломорфные руды оловянного месторождения Верхнее: почковидные агрегаты колломорфного (светлое) с каймами кристаллического (тёмное) касситерита

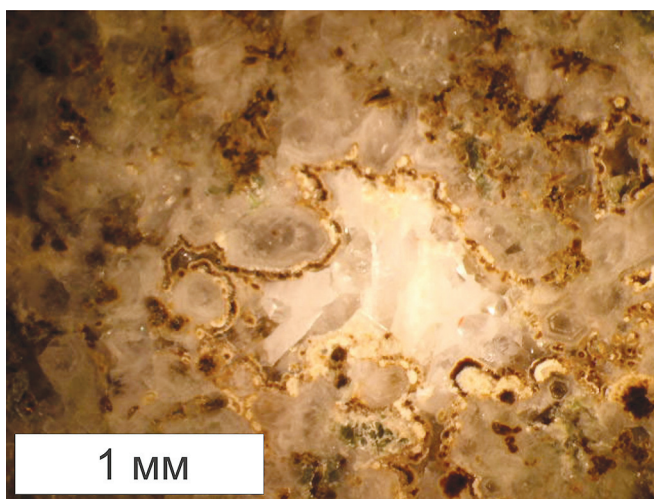


Рис. 4. Цепочки тонкокристаллического касситерита с гидростаннатами, окаймляющие кристаллы раннего гексагонального кварца (серое) в массе более позднего кварца, сингенетичного касситериту рудной стадии (светлое)

зовый состав этих образований. Метаколлоидные разности концентрически-зональных агрегатов образованы гидростаннатами Ca, Fe, Cu, In переменного состава, растворимыми в кислотах, в которых отмечаются примеси As, Al, Si, Cd, Co, Sb, Zn, Ag. Содержание Sn в них, по данным энергодисперсионного анализа, составляет 42—54%. ИК-спектроскопия позволила выявить в гидростаннатах наличие гидроксильной воды в области валентных колебаний Sn-OH. С помощью рентгеноспектрального микроанализа, в гидростаннатах обнаружены метастабильные фазы Ca-содержащих гидростаннатов, которые ранее не были известны [3]. Соотношение Ca/Sn в разных участках колломорфных агрегатов составляет 1,5:1; 1:1; 1:1,5, т. е. стехиометрия не выдерживается, что характеризует их как метастабильные образования.

В колломорфных агрегатах в ассоциации с кристаллическим касситеритом выявлены фазы размером 10—20 мкм минералов In, аналогичных по составу индиту (FeIn_2S_4) и джалиндиту $\text{In}(\text{OH})_3$ (рис. 5), описанных ранее в оловянных колломорфных рудах месторождения Джалинда [1, 2]. Минералы имеют неправильную форму выделения и часто встречаются в виде совместных агрегатов, в которых индит занимает центральную часть, а джалиндит образует неправильные каймы вокруг индита (рис. 2).

Кроме того, по данным [11], где определены условия фазовых переходов в системе $\text{In}_2\text{O}_3\text{—H}_2\text{O}$, в интервале температур ниже 435°C устойчивыми являются фазы $\text{In}(\text{OH})_3$ (до 245°C) и InOOH (до 435°C), которые выше 435°C переходят в In_2O_3 .

Фаза $\text{Pb}_5\text{As}_2\text{O}_8$

В краевых зонах колломорфного касситерита и касситерит-кварцевых прожилках на контакте с колломорфным касситеритом в режиме обратно отраженных электронов (BSE) на рентгеновском микроанализаторе JEOL8200 (Япония) выявлены мелкие фазы размером до 100 мкм, состоящие из Pb, As, Fe, O с незначительной примесью Zn, Cu, Sn. Контрастирование режима сканирования и съёмка при увеличениях до 550 позволили выявить две разновидности этих минералов, которые отличались одна от другой величиной отражающей способности (рис. 6). Фаза имеет призматический габитус и занозистый излом. Часто наблюдается в виде зёрен неправильной формы или тонкозернистых агрегатов.

При диагностике минералов энергодисперсионным методом на спектрометре LINK было установлено, что обе разновидности минералов содержат свинец и мышьяк. Более светлая разновидность минерала на спектре ЭДС (фаза № 1) харак-

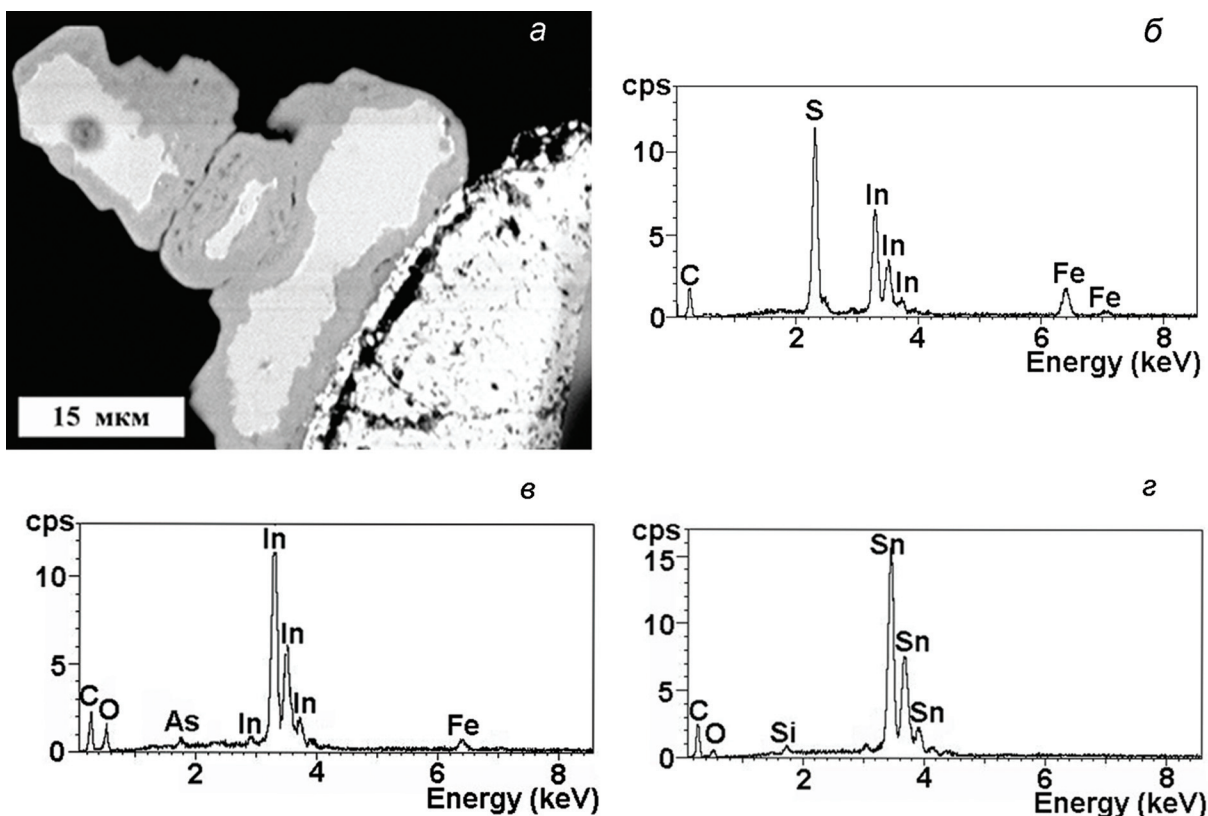


Рис. 5. Выделение индита (светло-серое) с каймой джалиндита (серое) на контакте с касситеритом (белое) (А) и соответствующие дисперсионные спектры (SEM) (Б — индит, В — джалиндит, Г — касситерит) (СЭМ)

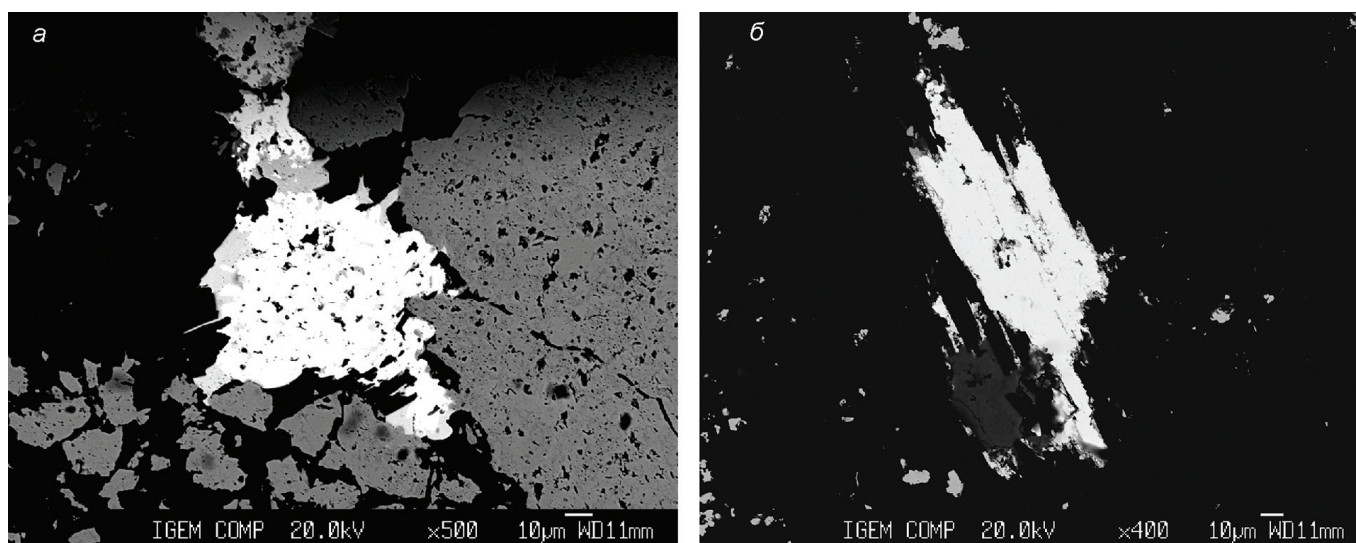


Рис. 6. Фаза $Pb_5As_2O_8$ (светлое) в касситерит-кварцевых прожилках JXA-8200 фирмы JEOL

теризуется более высоким пиком линии $PbL\alpha$ по сравнению с пиком $AsK\alpha$. Более тёмная разновидность минерала (фаза № 2) характеризуется сопоставимыми по высоте пиками линий $PbL\alpha$ и $AsK\alpha$. Кроме пиков линий Pb и As , на EDS-спектрах фиксируется линия кислорода $OK\alpha$. Для подтверждения присутствия кислорода в минерале и отнесения минералов к оксидам было проведено пошаговое сканирование участка рентгеновского спектра в области дифракции линии $OK\alpha$ на волновом спектрометре с использованием кристалл-анализатора LDE1. Во встроенном оптическом микроскопе при фиксированном увеличении 300 наблюдается высокий рельеф минерала. В каждом зерне встречаются обе фазы в виде сростков в разном количественном и объёмном соотношении. Встречены единичные зёрна, которые представлены исключительно фазой № 2. В целом в руде встречено больше зёрен, в которых преобладает фаза № 2. Последняя иногда встречается в виде включения в фазе № 1, при этом приобретает округлые очертания. Установлен единичный сросток минерала с кислородсодержащей фазой — оксидом хрома. Обнаружено единичное включение минерала (фаза № 1) микронных размеров в касситерите. Устанавливаются сростки минерала с оксидом индия — джалиндитом (кислородсодержащей фазой), тогда как сростки минерала с сульфидом индия — индитом не обнаружены.

Количественный анализ минералов (фазы № 1 и фазы № 2) проводился при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе 20 нА зонда на цилиндре Фарадея, диаметре зонда 1 мкм. Анализ выполнялся на элементы Pb , As , Fe , Zn , Cu , Si , Sn , Sb , In , S , Ca , Ag . В качестве эталонов на основные элементы использовались PbS для определения свинца, $GaAs$ для As , $InSb$ — для индия, Fe_2O_3 — для железа, ZnS — для цинка, Ol — для Si . В качестве аналитических

линий использовались: $K\alpha$ -линия (Si , Cu , Fe , S , Zn , Ca), $L\alpha$ -линия (As , Sn , In), $M\alpha$ -линия (Pb).

Установлено (среднее для 15 зёрен), что фаза № 1 содержит до 77% Pb в форме оксида свинца, и до 21% As в форме As_2O_5 . Отмечено заметное содержание Si в форме SiO_2 — до 0,46%. Содержания остальных из определяемых элементов находились ниже предела обнаружения метода. Фаза № 2 содержит до 64% Pb в форме PbO и до 29% As в форме As_2O_5 . Отмечено заметное содержание Si в форме SiO_2 — до 0,48%, железа до 4,80% при колебаниях от 3,30 до 4,80%, цинка до 0,41%, индия от 0,16 до 0,23%. Результаты определений химического состава (среднее по 14 определениям каждой фазы), мас.%, приведены в таблице.

Результаты определений химического состава новой фазы, для сравнения — химический состав паулмуреита $Pb_2As_2O_5$ Plm

Номер	SiO_2	As_2O_5	FeO	ZnO	SnO_2	PbO	CaO	CuO	In_2O_3	Сумма
1	0,46	21,11	0,0	0,0	0,0	77,25	0,0	0,0	0,0	98,82
2	0,43	28,88	4,80	0,41	0,0	63,87	0,0	0,0	0,23	98,62
Plm	0,0	30,71	0,0	0,0	0,0	69,23	0,0	0,0	0,0	99,94

В настоящее время описана единственная находка минерала, близкого по составу и набору элементов исследуемому минералу. В работе [9] описан паулмуреит — арсенид свинца с формулой $Pb_2As_2O_5$. Содержание PbO составляет 69,23%, содержание As_2O_3 — 30,71 %. Авторы отмечают, что элементы с порядковым номером выше 9 находятся в минерале ниже предела обнаружения метода. Для сравнения химический состав паулмуреита (Plm) приведен в таблице. Как следует из таблицы, химический состав паулмуреита близок к химическому составу фазы № 2. Минерал обнаружен в железосодержащих рудах в парагенезисе с кислородсодержащими фазами — гематитом, магнетитом и кальцитом. Размеры паулмуреита — до 0,5 мм. Авторам удалось провести исследование структуры минерала и установить параметры элементарной ячейки.

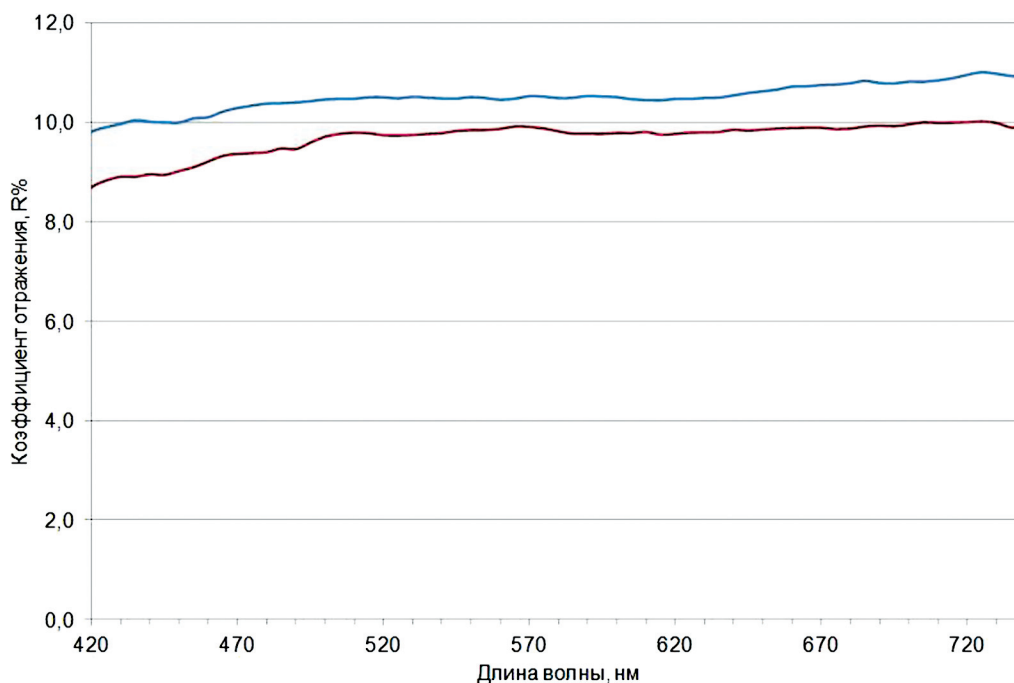


Рис. 7. Спектры отражения фазы $Pb_5As_2O_8$

Дальнейшее исследование обнаруженного редкого минерала предполагает определение структуры минерала.

Коэффициенты отражения новой фазы

Проведено измерение коэффициента отражения выявленных фаз свинца и мышьяка на модернизированном микроспектрофотометре МСФУЛ-312 (эталон кремний) в соответствии с Методическими рекомендациями № 40. По низкому — 10% коэффициенту отражения и слабому подъему в красную область спектра минерал предположительно близок к характеристикам кислородных соединений, например ульвошпинель (Fe_2TiO_4 , $R_{550} = 15\%$), кызылкумит ($V_2Ti_3O_9$, $R_{550} = 16\%$) [7] (рис. 7). Для уточнения состава и определения структуры нового минерала проводятся дополнительные исследования.

Выводы

Проведённые исследования коллоидного касситерита позволили выявить в нём структурно-химическую неоднородность, проявленную в наличии двух типов зональности. Первичная зональность возникает на ранней стадии отложения станнатов из коллоидных растворов и характеризуется чередованием гидростаннатов разного состава, в то время как вторичная является наложенной и фор-

мируется в процессе раскристаллизации ранних станнатов.

Значение коллоидов в образовании руд гидротермальных месторождений, генетически связанных с магматическими расплавами, в настоящее время признается многими исследователями. Однако большинство исследователей считают, что они играют значительную роль в образовании низкотемпературных руд. Тем не менее Ф.В. Чухров был прав в своём предположении [6], что образование коллоидных растворов может происходить уже при критической температуре. Проведённые нами исследования значительно расширяют температурные границы действия коллоидных растворов, так как коллоидный касситерит в изученных нами рудах кристаллизовался при температурах не менее $270^\circ C$. Наиболее вероятной причиной коагуляции коллоидно-растворённых веществ в процессе образования руд месторождения Верхнее, по нашему мнению, могли быть коагуляторы из вмещающих карбонатных пород, что подтверждается интенсивным развитием Са-содержащих минералов в околорудных метасоматитах и рудах месторождения.

Работа выполнена в рамках Госзадания по теме «Структурно-химические неоднородности и парагенетические ассоциации минералов как отражение процессов минералообразования» (0136-2018-0025). Микрорентгеноспектральные и микрозондовые анализы выполнены в ЦКП «ИГЕМ АНАЛИТИКА».

ЛИТЕРАТУРА

1. Генкин А.Д., Муравьева И.В. Индит и джалиндит — новые минералы индия // Записки ВМО. 1963. Ч. ХСII. В. 4. С. 445–457.
2. Комарова Г.Н., Новоросова Л.Е. О поведении олова и индия в коллоидных агрегатах касситерита на Джалиндинском месторождении на Малом Хингане // Геохимия. 1959. № 8. С. 716–720.
3. Маршукова Н.К., Павловский А.Б., Сидоренко Г.А. Новые минеральные формы оловянных руд // Минералогия рудных месторождений. М.: Наука, 1983. С. 34–37.
4. Методические рекомендации № 40. Применение комплекса МСФУЛ-312-эвм для диагностики минералов. М.: ВИМС, 1993. 53 с.
5. Радкевич Е.А. Метаморфизм руд Синанчи // Изв. АН СССР. Серия геолог. 1948. № 3. С. 131–140.
6. Чухров Ф.В. Коллоиды в земной коре. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 671 с.
7. Шумская Н.Н. Определитель рудных минералов по спектральным кривым отражения. Л.: Недра. 1985. 231 с.
8. Ahlfeld F. and Reyes J.M. Mineralogie von Bolivien. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 1938. 90 p.
9. Dunn P.J., Peacor D.R., and Sturman D. Paulmooreite, a new lead arsenite mineral from Langban, Sweeden // American Mineral., 1979, vol. 64, pp. 352–454.
10. Knopf A. Tungsten deposits of northwestern Inyo county, California: U. S. Geol. Survey Bull. 1916, 640. Pp. 229–249.
11. Fries C. Tin Deposits of the Black Range, Catron and Sierra Counties, New Mexico. US Geol. Surv. Bull., 1940. No 922-M. pp. 355–370.
12. Roy R., Shafer M.W. Phases present and phase equilibrium in the system $\text{In}_2\text{O}_3\text{--H}_2\text{O}$ // J. Phys. Chem., 1954. V. 58. P. 372.

REFERENCES

1. Genkin A.D., Murav'eva I.V. Indite and djalindite are new minerals of In. *Zapiski RMO* [Proceedings of the Russian Mineralogical Society], 1963, Part ХСII, vol. 4, pp. 445–457. (In Russian)
2. Komarova G.N., Novorossova L.E. About the behavior of Sn and In in the colloform cassiterite aggregates at the Dzalinda deposit at the Little Khingnan Mountains. *Geochemistry*, 1959, no 8, pp. 716–720 (In Russian).
3. Marshukova N.K., Pavlovsky A.B., Sidorenko G.A. New mineral forms of tin ores, *Mineralogy of ore deposits*. Moscow, Nauka Publ., 1983, pp. 34–37 (In Russian)
4. *Methodological recommendations N 40. Practice complex MSFUL-312 for the diagnostics of minerals*. Moscow, VIMS Publ., 1993, 53 p. (In Russian).
5. Radkevich E.A. The metamorphism of Sinancha ores. *Izvestia AN SSSR, Series geolog.*, 1948, pp. 131–140.
6. Chukhrov F.V. *Colloides at the Earth's crust*. M., AN SSSR Publ., 1955, 671 p. (In Russian).
7. Shumskaya N.N. *The identification of ore minerals on spectral reflection curves*. L., Nedra Publ., 1985, 231 p. (In Russian).
8. Ahlfeld, F. and Reyes, J.M. *Mineralogie von Bolivien*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 1938, 90 p.
9. Dunn P.J., Peacor D.R., and Sturman D. Paulmooreite, a new lead arsenite mineral from Langban, Sweeden. *American Mineral.*, 1979, vol. 64, pp. 352–454.
10. Knopf, A.. Tungsten deposits of northwestern Inyo county, California, U.S. *Geol. Survey Bull.*, 1916, 640, pp. 229–249.
11. Fries C. Tin Deposits of the Black Range, Catron and Sierra Counties, New Mexico. *US Geol. Surv. Bull.*, 1940. no. 922-M. Pp. 355–370.
12. Roy R., Shafer M.W. Phases present and phase equilibrium in the system $\text{In}_2\text{O}_3\text{--H}_2\text{O}$. *J. Phys. Chem.*, 1954, v. 58, p. 372.

УДК 549: 553.5 (470.313)

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И ГЕММОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЮВЕЛИРНЫХ АММОНИТОВ ИЗ КАРЬЕРА ОАО «МИХАЙЛОВЦЕМЕНТ» РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ*

Д.А. ПЕТРОЧЕНКОВ, А.В. ПЕТРОВ

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: p-d-a@mail.ru

Впервые детально изучены минеральный состав и геммологические характеристики ювелирных аммонитов из карьера ОАО «Михайловцемент» Рязанской области. Аммониты связаны с отложениями келловее и оксфорда. Аммониты имеют сложное зональное строение и преимущественно (до 96 мас. %) пиритовый состав. Установлены арагонит, бассанит, ссомольнокит, ярозит, кальцит, кварц, апатит, органическое вещество, графит, гипс, ильменит, микроклин, слюда. Стенки и перегородки раковин сохраняют первоначальный арагонитовый состав с пластинчатыми и призматическими слоями. Из элементов-примесей повышенные содержания фиксируются (мас. %): As до 0,023 и Ni до 0,048, Co, Zn, Mo, Sr, Ba и Pb в интервале 0,001–0,01 мас. %. Содержание радиоактивных веществ U, Th находятся на уровне фоновых, при повышенных количествах канцерогенных — As и Pb. Окисление пирита и образование ряда микровключений, возможно происходило предположительно с участием бактерий. Основная часть раковин образована плотно сросшимися кристаллами пирита размером 0,2–0,5 мм удлиненной формы. Присутствуют тонкокристаллический и глобулярный пирит, расположенный в узкой пористой переходной зоне на контакте с арагонитовыми слоями стенок и перегородок раковин. В этой зоне расположено и большинство минеральных микровключений. По своим декоративным и технологическим характеристикам аммониты являются высококачественным ювелирным материалом биоминеральной группы. Сбор раковин аммонитов может осуществляться попутно с разработкой карьера по добыче цемента без значительных материальных затрат.

Ключевые слова: аммонит; арагонит; пирит; Рязанская область; юрские отложения; ювелирные материалы.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-4-18-25

MINERAL COMPOSITION AND STRUCTURAL FEATURES OF JEWELRY AMMONITES FROM MINE OJSC «MIKHAILOVCEMENT», RYAZAN REGION

D.A. PETROCHENKOV, A.V. PETROV

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)
23, Miklukho-Maklaya's street, Moscow 117997, Russia
e-mail: p-d-a@mail.ru

For the first time, the mineral composition and structural features of jewelry ammonite from mine OJSC «Mikhailovcement» in Ryazan Region are studied in detail. Ammonites are associated with sediments of Callovian and Oxfordian stages. Ammonites have a complex zonal structure and mainly up to 96 wt. % pyrite composition. Aragonite, sulphates of calcium and iron, calcite, quartz, apatite, organic matter, graphite, ilmenite, feldspar, mica are established. The walls and partitions of the shells retain the original aragonite composition with lamellar and prismatic layers. Of the impurity elements, heightened contents are fixed (wt.%): As — up to 0,023 and Ni — up to 0,048, and in the range of 0,001—0,01 wt. %: Co, Zn, Mo, Sr, Ba and Pb. The content of radioactive elements U, Th are at the level of background with elevated levels of carcinogenic — As and Pb. The oxidation of pyrite and the formation of a number of micro-inclusions occurred presumably with the participation of bacteria. The main part of the shell is formed by densely fused pyrite crystals of 0,2—0,5 mm in size. There are fine-crystalline and globular pyrite, located on contact with aragonite layers of the walls and partitions of shells. In this zone, most mineral micro inclusions are located. According to their decorative and technological characteristics, ammonites are high-quality jewelry material of the biomineral group. The collection of ammonite shells can be carried out along the way with the development of a mine for the extraction of cement.

Key words: ammonite; aragonite; pyrite; Ryazan region; Jurassic deposits; jewelry materials.

Аммониты, а также изделия из них пользуются в настоящее время повышенным спросом. Аммониты, как поделочный и ювелирный материал, входят в группу биоминеральных образований [1]. На мировой рынок аммониты поступают преимущественно из Мадагаскара [9], Марокко [4], Канады [8], а также РФ [5]. Аммониты интерьерного и ювелирного качества высокой декоративности собираются на карьере ОАО «Михайловцемент» Рязанской области.

При производстве цемента технологическим циклом ОАО «Михайловцемент» предусматривается использование известняков и глин. В нижней части разреза вскрывается михайловский горизонт верхневизейского подъяруса раннекаменноугольного возраста. Отложения представлены толщей известняков с тонкими прослоями глин, общей мощностью 23 м. Выше залегают глины келловейского и оксфордского ярусов юрского возраста, мощностью около 16 м. Верхняя часть разреза (от 7 до 13 м) представлена покровными суглинками четвертичного возраста. Суглинки при отработке карьера поступают в отвал.

Основным видом ювелирного сырья являются аммониты (рис. 1, а, б). Наряду с аммонитами, представляют интерес и раковины наутилусов (рис. 1, в), которые численно существенно уступают первым и внешне принципиально от них не отличаются. Аммониты и наутилусы залегают в морских глинах юрского возраста и характеризуются большим разнообразием видов [2, 3, 7].

Средний келловейский подъярус залегает трансгрессивно на подстилающих породах. Нижняя часть разреза представлена ожелезнёнными песча-

ми, песчаниками и оолитовым мергелем. В верхней части разреза присутствуют песчанистые, часто известковистые глины. Мощность отложений 3—4 м. В отложениях встречаются аммониты родов: *Kosmoceras*, *Binatisphinctes*, *Erymnoceras*, *Funiferites*, *Brightia*.

Верхний келловейский подъярус представлен серыми глинами с конкрециями серого или желтовато-серого оолитового мергеля с редкими мелкими фосфоритами глинистого типа. Мощность отложений 11—12 м. Отложения фаунистически хорошо охарактеризованы аммонитами родов: *Quenstedticeras*, *Kosmoceras*, *Peltoceras*, *Binatisphinctes*, *Funiferites*, *Brightia* и наутилусами рода *Paracenoceras*.

В оксфордском ярусе в рассматриваемом разрезе выделяется нижний подъярус, залегающий на подстилающих породах с размывом.

Нижний подъярус оксфордского яруса представлен серыми, реже чёрными глинами, нередко мергелистыми, с редкими конкрециями фосфоритов глинистого типа. Мощность отложений 1—3 м. Иногда в глинах встречаются довольно большие конкреции оолитового мергеля. В верхней части разреза распространены плотные, легко расслаивающиеся на тонкие пластины, битуминозные глины. В отложениях встречаются аммониты рода: *Peltoceras*, *Cardioceras* и *Euaspidoceras*.

Аммониты расположены непосредственно в глинах юрских отложений и распределены неравномерно. Раковины пиритизированы, сохраняют исходную форму и перламутровый слой. Размер аммонитов преимущественно от 2 до 5 см в диаметре — наиболее востребованный для ювелирных изделий. Встречаются и более крупные, хорошо

сохранившиеся аммониты до 20 см, имеющие высокую стоимость в качестве интерьерных и коллекционных образцов. Размер наutilusов не превышает 10 см в диаметре. Из обломков крупных аммонитов изготавливают поперечные распилы для ювелирных изделий (рис. 2, б, в). Систематический сбор аммонитов в процессе отработки карьера не производится, в результате основное их количество, включая уникальные по качеству и редкие виды, утрачивается.

Методы исследований

Комплекс исследований аммонитов ювелирно-поделочного качества проведен на кафедре минералогии и геммологии МГРИ, в лабораториях ФГБУ «ВИМС», ФГБУН «ИГЕМ РАН». Он включал определение микротвердости, плотности, люминесценции, определение химического состава, электронно-зондовые и электронно-микроскопические исследования.

Количественное определение химического состава аммонитов выполнено методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (РФА) на вакуумном спектрометре последовательного действия Axios MAX Advanced. Микротвердость определялась на микротвердомере «ПМТ-3» с нагрузкой массой 100 г и экспозицией 10 с для пирита и массой 50 г и экспозицией 10 с для арагонита и каль-

цита. Плотность образцов определялась гидростатическим методом на электронных весах «Sartorius Gem G150D». Люминесценция изучалась под ультрафиолетовой лампой «Multispec Sistem Erikhorst» с λ 254 и 365 нм. Минеральный состав определялся рентгенографическим количественным фазовым анализом (РКФА) на приборе «X'Pert Pro MPD». Электронно-зондовые исследования выполнены на микроанализаторе «Jeol JXA-800», позволяющим получить химический состав по данным рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), провести анализ образцов в обратно-рассеянных электронах (ОРЭ). Содержание кислорода рассчитывалось по стехиометрии. Электронно-микроскопическое изучение образцов проведено на растровом электронном микроскопе (РЭМ) «Tesla-BS-301», оснащённом рентгеновским спектрометром с дисперсией по энергии, позволяющим определять элементный состав от Mg до U.

Минеральный состав и геммологические характеристики аммонитов

По данным РКФА аммониты и наutilusы состоят преимущественно из пирита — от 88 до 96 мас. %. Из других минералов присутствуют в небольших количествах арагонит, кальцит, бассанит, ссомольнокит, апатит, кварц, рентгеноаморфная фаза (РАФ) и дисперсный графит.

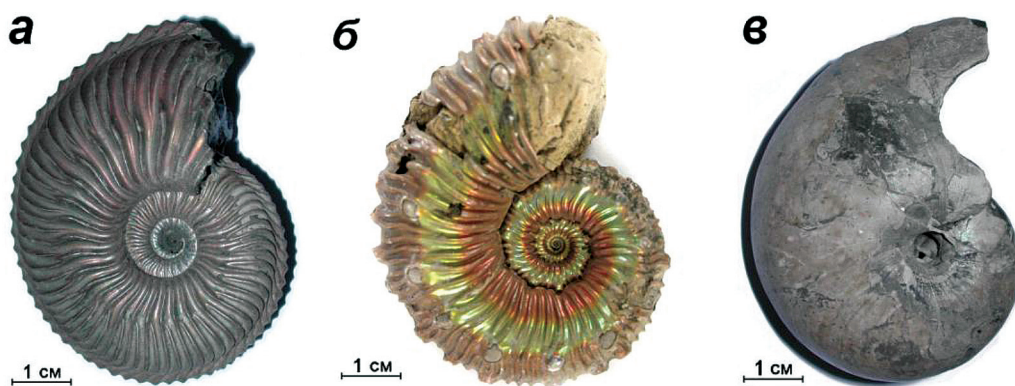


Рис. 1. Аммониты (а, б) и наutilus (в) с сохранившимся слоем перламутра

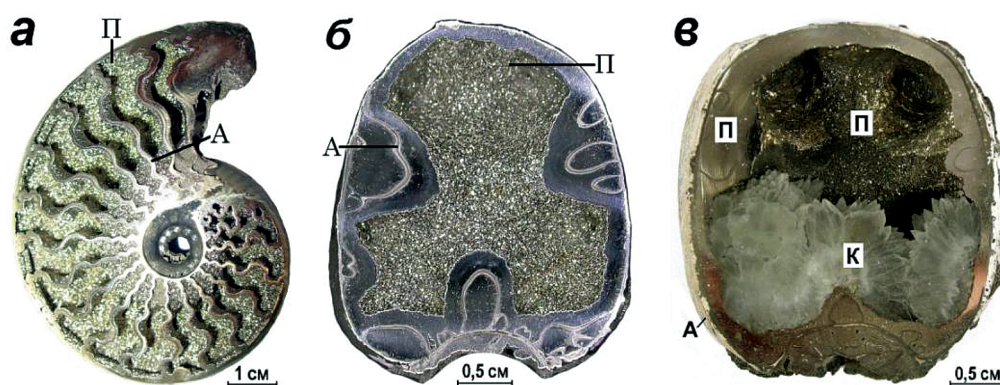


Рис. 2. Продольная (а) и поперечные (б, в) поверхности пиритизированных аммонитов: А — арагонит, П — пирит, К — кальцит

Данные РФА подтверждают минеральный состав аммонитов, а низкие содержания большинства оксидов указывают на отсутствие в заметных количествах, не установленных РКФА минералов (табл. 1). Из элементов-примесей с содержаниями более 0,01 мас. % фиксируются: As — до 0,023 и Ni — до 0,048, а в интервале 0,001—0,01 мас. %: Co, Zn, Mo, Sr, Ba и Pb. Отметим фоновые значения радиоактивных элементов U, Th и повышенные канцерогенных — As и Pb (табл. 2).

Арагонит образует стенки и перегородки раковин аммонитов и наutilusов. Арагонит внешних стенок раковин (перламутровый слой), в зависимости от степени сохранности, белого, желтовато-белого и серого цветов с матовым или перламутровым блеском (рис. 1). На хорошо сохранившемся перламутровом слое наблюдается иризация в красных, оранжевых, жёлтых и зелёных тонах. Толщина перламутрового слоя даже на крупных раковинах не превышает 1 мм. Арагонит, образующий внутренние стенки и перегородки камер раковины, бесцветный или светло-серого цвета с перламутровым или стеклянным блеском (рис. 2).

Плотность арагонита 2,75—2,8 г/см³, что несколько ниже, чем для кристаллов. Микротвёрдость внешней стенки раковины в среднем 115 кг/мм² и существенно зависит от сохранности слоя. Микротвёрдость перегородок камер выше — в среднем 180 кг/мм². Люминесценция при λ 254 нм зелёного цвета наблюдается в центральных частях перламутрового слоя, при λ 365 нм люминесценция усиливается. Внешняя и внутренняя поверхности перламутрового слоя не люминесцируют.

Кальцит присутствует в виде микровключений и его содержание не превышает 1 мас. %. В редких случаях он выполняет отдельные камеры раковин или встречается в виде скопления мелких игольчатых кристалликов на пирите (рис. 2, в). Кальцит, выполняющий камеры, бесцветный или серого цвета, полупрозрачный, образует плотные агрегаты. Блеск кальцита стеклянный, излом раковистый. По результатам РКФА для кальцита характерно

высокое содержание магния в структурной решётке ($\text{Mg}_{0,03}\text{Ca}_{0,97}\text{CO}_3$) по которому он отнесён к магнезиальной разновидности. Плотность бесцветного полупрозрачного кальцита, выполняющего камеры раковин, в среднем 2,7 г/см³. Микротвёрдость кальцита 240—290 кг/мм². Кальцит люминесцирует при λ 254 нм зелёным или белёсым цветом, при λ 365 нм свечение усиливается.

Бассанит ($\text{CaSO}_4 \times 0,5\text{H}_2\text{O}$) и ссомольнокит ($\text{FeSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$) связаны с окислением и гидратацией пирита под воздействием поверхностных вод и содержатся в отдельных образцах до 3 мас. %. Апатит встречается в нескольких образцах, где его содержание 0,5 мас. %. Раковины с апатитом характерны для горизонтов с фосфатизацией отложений, картируемых на Михайловском месторождении. Кварц выявлен также в двух образцах, где его содержание не превышает 0,5 мас. %. Он, по-видимому, связан как с морскими отложениями, так и образовался в процессе минерализации раковин. Фиксируются следы дисперсного графита и органического вещества.

Пирит является основным минералом, выполняющим внутреннее пространство раковин, часто покрывает в той или иной степени их внешние стенки. Если камеры заполнены пиритом не полностью, образуются различной формы жеоды (рис. 2). Неминерализованная часть камер аммонитов ювелирного качества составляет от 10 до 80%. Иногда жеоды могут иметь гладкую, одноцветную поверхность. Обычно жеоды выполнены агрегатами мелких (0,1—1 мм) кристаллов пирита. Наиболее часто встречается пирит кубического габитуса, реже октаэдрического. Наблюдаются и сложные почковидные образования, сочетающие кубический и октаэдрический габитусы кристаллов.

Цвет кристаллов пирита жёлтый, светло-жёлтый, с металлическим блеском (рис. 2, а, б). Агрегаты кристаллов пирита плотные, разламываются с большим трудом, излом неровный, раковистый. Иногда пирит, выполняющий стенки камер, красного, коричневого, оранжевого, жёлтого, зелёного, голубого и фиолетового цветов, связанных с ин-

Таблица 1

Химический состав аммонита по данным рентгеноспектрального флуоресцентного анализа

Номер образца	Содержание компонента, мас. %											
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S _{общ}	Σ
М-10	0,03	0,02	0,16	0,76	0,05	1,93	0,01	<0,01	45,62	0,05	51,37	99,98
Р-5	0,08	0,04	0,24	2,98	0,05	1,15	0,01	<0,01	45,51	0,02	49,18	99,27

Таблица 2

Содержание элементов-примесей в аммоните по данным рентгеноспектрального флуоресцентного анализа

Номер образца	Содержание элемента, мг/кг ($n \times 10^{-4}$ мас. %)															
	Cr	V	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Sr	Zr	Ba	U	Th	Y	Nb	Pb	As
М-10	<5	7	52	160	4	65	42	50	4	11	<5	<5	<5	<5	10	230
Р-5	<10	<10	44	484	37	15	23	24	<10	30	<10	<10	<10	<10	54	206

терференционной окраской минеральных плёнок на поверхности кристаллов [6]. Распределение окрасок зонально-пятнистое, как правило, в одной камере наблюдается сочетание 2—3 цветов, но может наблюдаться и весь цветовой спектр.

Плотность агрегатов пирита 4,6—4,8 г/см³, что несколько ниже, чем у кристаллов. Микротвёрдость пирита от 970 до 1386 кг/мм², что указывает на неоднородность кристаллов. Люминесценция пиритовых агрегатов не наблюдается.

Электронно-зондовые и электронно-микроскопические исследования

Поперечный разрез камеры аммонита характеризуется симметричным положением минеральных образований относительно внутренней стенки и перегородки раковины. Ширина перегородок около 270 мкм, внутренних стенок увеличивается до 350 мкм. По обе стороны от них наблюдаются переходные зоны шириной от 40 до 60 мкм, выполненные тонкокристаллическим пиритом и кальцитом. Далее следует широкая зона однородного крупнокристаллического пирита (рис. 3, а), кристаллы которого выходят своими окончаниями в неминерализованные камеры.

Перегородка аммонита сложена только пластинчатым арагонитовым слоем. Внутренняя и внешняя стенки раковины аммонита состоят из двух араго-

нитовых слоёв: внешнего пластинчатого и внутреннего призматического, ширина которых около 26 мкм. Контакт слоёв достаточно чёткий (рис. 3, б, в). Пластинчатый арагонитовый слой состоит из характерных тонких (0,5 мкм), параллельно ориентированных пластин, образующих жгутовидные образования (рис. 3, в). Внешний участок слоя в значительной степени разрушен, в нём наблюдаются поры. Призматический слой образован ориентированными перпендикулярно стенке раковины аммонита сильноудлинёнными призматическими плотно сросшимися кристаллами. Размер кристаллов 10—15 мкм в длину и 1—1,5 мкм в ширину. Контакт с переходным слоем чёткий. Вдоль него просматриваются цепочки пор (рис. 3, б).

По данным РСМА арагонитовые слои из элементов-примесей содержат (мас. %): Na до 0,35 и Sr до 0,17, которые фиксируются в отдельных спектрах. В стенках раковин присутствуют включения органического вещества, имеющие сложный контур и размер до 250 мкм (рис. 4, а).

Переходный слой имеет ширину от 30 до 200 мкм и сложен тонкокристаллическим пиритом (2—5 мкм), кальцитом и глобулярным пиритом (рис. 4, б, в, 5, а, б). Тонкокристаллический пирит расположен преимущественно на контакте с крупнопризматическим. Контакт переходного слоя с крупнопризматическим пиритом неровный, но достаточно чёткий (рис. 5, б). В этой зоне выделяются шаро-

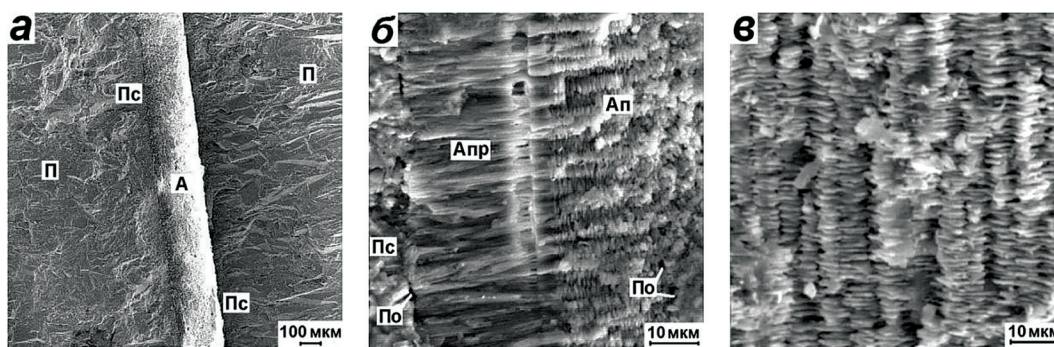


Рис. 3. Общий вид поперечного разреза перегородки раковины аммонита с прилегающими минерализованными зонами (а); структура стенки аммонита (б); фрагмент детализации арагонитового пластинчатого слоя (в). РЭМ: А — арагонитовая перегородка, Ап — пластинчатый и Апр — призматический арагонитовые слои, Пс — переходный тонкокристаллический пиритовый слой, П — пирит крупнокристаллический, По — поры

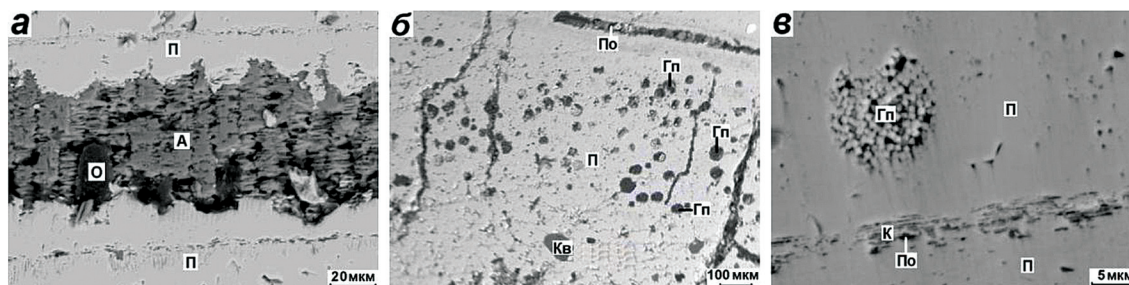


Рис. 4. Арагонитовая стенка раковины (А) с включениями органического вещества (О) и прилегающими слоями пирита (П) (а); тонкокристаллическая пиритовая зона (П) с глобулярным пиритом (Гп) и включениями кварца (Кв) (б); фрагмент детализации выделений глобулярного пирита (Гп) и включениями кальцита (К) (в). Микрозонд, ОРЭ, По — поры

видные образования диаметром 10—40 мкм, выполненные мельчайшими (до 1 мкм) кристалликами глобулярного пирита (рис. 4, б, в; 5, а, б). Глобулярный пирит представляет собой начало морфологической индивидуализации кристаллизующего вещества. Шаровидные образования глобулярного пирита связаны, по-видимому, с деятельностью микроорганизмов. По контактам перегородки раковины и параллельно ей проходят узкие (3—4 мкм) пористые зоны пирита, в которых фиксируются мельчайшие кристаллики кальцита (рис. 4, в; 5, б). Кристаллы кальцита изометричной формы, размером преимущественно 2—6 мкм, отдельные — достигают 15 мкм. Они достаточно равномерно распределены в пределах слоя и не имеют выраженной ориентировки.

В переходной зоне установлены включения кварца округлой формы размером 70 мкм (рис. 4, б). На другом участке фиксируются многочисленные

кристаллики кварца угловатой формы размером от 40 до 80 мкм (рис. 6, а), возможно связанные с донными осадками. На этом же участке (рис. 6, а) фиксируются мелкие (10—15 мкм) кристаллики, предположительно ильменита, с повышенными содержаниями V, S и Mn, которые также характерны для морских отложений.

Органическое вещество фиксируется в порах по содержанию углерода. Размеры выделений достигают 50 мкм (рис. 6, б). На данном участке выделены единичные кристаллики гипса удлиненной формы размером до 30 мкм по длинной оси (рис. 6, б). Микроклин размером 6×50 мкм занимает пору в пирите с мелкими (2—5 мкм) кристаллами гипса. Гипс имеет в этой зоне значительно большее распространение, чем в центральных частях камер раковины. Присутствуют единичные кристаллы слюды размером 5×100 мкм (рис. 6, в). Микровключения микроклина и слюды связаны с попаданием в

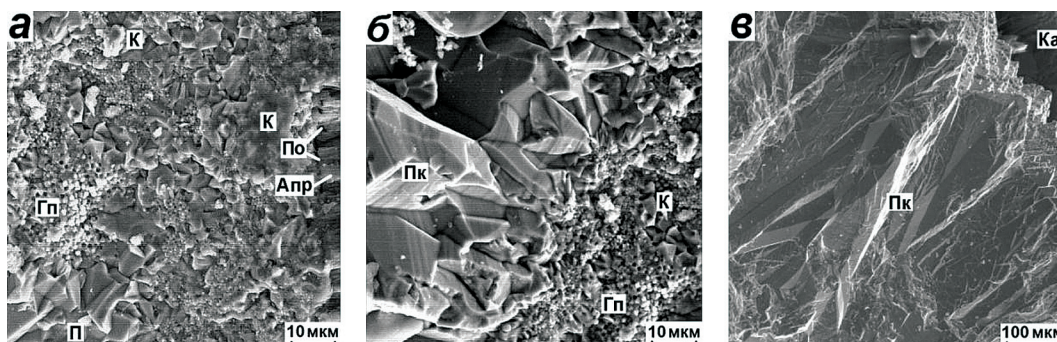


Рис. 5. Структура переходного слоя на контакте с арагонитовым призматическим слоем внешней стенки аммонита (а) и с крупнопризматическим пиритом (б); структура слоя крупнопризматического пирита с окончаниями кристаллов в неминерализованной камере раковины (в). РЭМ. Апр — призматический арагонитовый слой, К — кальцит, Пк — крупнопризматический пирит, Гп — глобулярный пирит, По — поры, Ка — неминерализованная камера

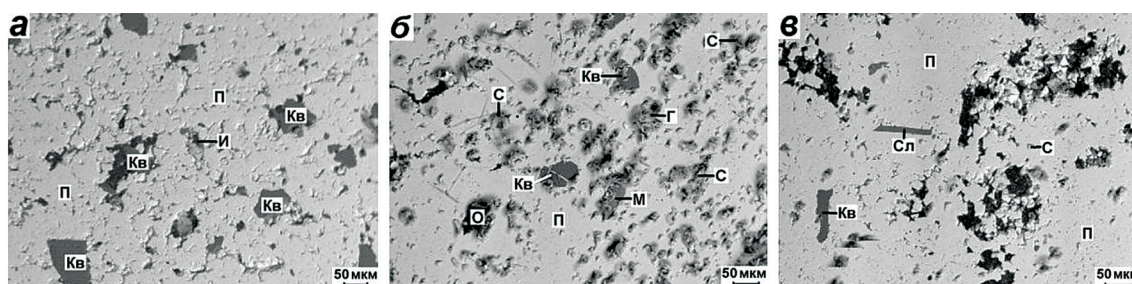


Рис. 6. Микровключения кварца (Кв), ильменита (И), органического вещества (О), сульфатов железа (С), микроклина (М), гипса (Г), и слюды (Сл) в тонкокристаллической пиритовой зоне (П); микрозонд, ОРЭ

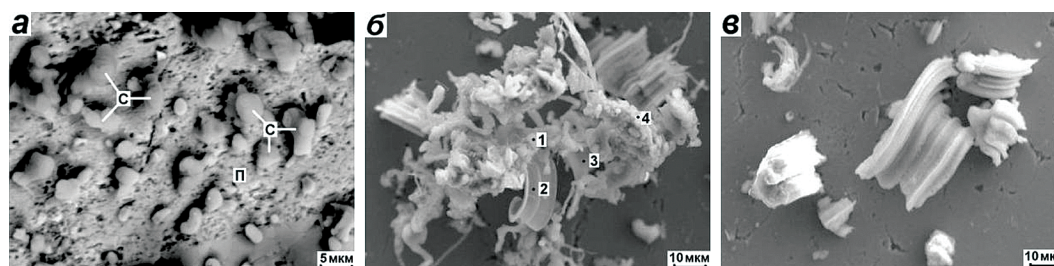


Рис. 7. Выщелоченная поверхность пирита (П) с выделениями сульфатов железа (С) различной формы: а — глобулярный; б — сростки различной формы, в — лентовидной; микрозонд, ОРЭ. 1—4 — номера спектров

Таблица 3

Химический состав сульфатов железа по данным рентгеноспектрального микроанализа

Номер спектра	Содержание элементов, мас. %							
	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	O
1	0,30	1,62	0,35	16,55	0,34	0,19	30,56	40,09
2	0,23	0,89	0,23	20,65	0,23	0,12	29,44	44,87
3	0,30	0,56	0,10	13,18	0,20	0,10	24,66	31,22
4	0,92	3,06	0,23	21,10	0,64	0,59	32,02	40,30

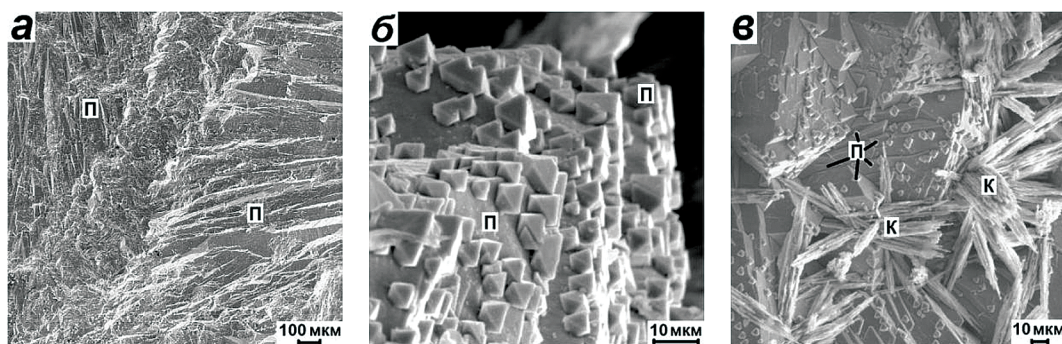


Рис. 8. Зона контакта крупнопризматического пирита с различной ориентировкой кристаллов (а); пирамидальный пирит, выполняющий поверхность неминерализованной камеры с нарастанием мелких октаэдрических кристаллов пирита (б) и игольчатых сростков кальцита (в). РЭМ: П — пирит, К — кальцит

раковины морских отложений, а гипс является новообразованным минералом.

Выделения сульфатов железа (данным РКФА ссомольнокит) достаточно многочисленны и образуются на сильно выщелоченной поверхности пирита (рис. 6, б, в). В начальной стадии роста кристаллы имеют глобулярную форму и размер 1—4 мкм (рис. 7, а). При их срастании формируются комковидные образования размером до 20 мкм, которые состоят из нитевидных, лентовидных, спиралевидных кристаллов (рис. 7, б). Нитевидные кристаллы имеют толщину 1—2 мкм и длину до 60 мкм. Ширина лентовидных кристаллов до 10 мкм, длина — до 60 мкм. При больших увеличениях хорошо видно, что лентовидные кристаллы состоят из сросшихся нитевидных. При их росте характерно скручивание в спираль (рис. 7, в). В сульфатах железа фиксируются повышенные содержания Mg, Al, Si, K и Ca (табл. 3). Часть кристаллов сульфата железа можно отнести к водной форме (табл. 3, спектр 3).

Зона крупнопризматического пирита может выклиниваться на отдельных участках. Длина кристаллов 200—500 мкм, ширина до 150 мкм. Они плотно сросшиеся, на что указывает отсутствие пор, субпараллельны и ориентированы перпендикулярно стенкам раковины. На кристаллах отчетливо видна штриховка, коррозия отсутствует (рис. 5, в). Размер кристаллов несколько возрастает к периферии зоны.

В этой зоне могут наблюдаться поперечные микротрещины, по которым происходило частичное дробление и смещение кристаллов. На контакте пиритовых зон различной ориентировки, образует-

ся полоса шириной 200—300 мкм разориентированных кристаллов (рис. 8, а). Различная ориентировка кристаллов в зонах обусловлена тем, что в одном случае они ориентированы относительно внешней стенки раковины, в другом — перегородок.

Поверхность камеры раковины выполнена пирамидальными головками пирита, являющимися окончаниями крупнопризматических кристаллов (рис. 5, в). Длина граней пирамид колеблется от 50 до 100 мкм. Поверхность неровная, ступенчатая, обусловленная ростом кристаллов. На отдельных участках на головках формируются мелкие (около 3—10 мкм) октаэдрические кристаллы пирита поздней генерации (рис. 8, б). В процессе роста они сливаются, увеличивая размер крупнопризматических кристаллов. На этих же участках формируются игольчатые сростки кальцита. Длина кристаллов достигает 60 мкм при толщине 2—3 мкм (рис. 8, в).

Химический состав пирита в различных точках раковины аммонита достаточно однороден. Из элементов-примесей фиксируются повышенные содержания Ni, достигающие 0,25 мас. %.

Описанные минеральные и структурные особенности аммонитов ювелирного качества необходимо учитывать при их обработке. Так, различная ориентировка кристаллов пирита в поперечных срезах проявляется при их полировке и в процессе окисления. Слой пирита, примыкающий к стенкам и перегородкам камер, выполнен кристаллами, ориентированными к ним перпендикулярно. Поперечный срез проходит по длинной оси кристаллов, вследствие чего полировка оказывается луч-

шего качества, а окисление происходит медленнее. Эти слои пирита обладают и более высокой микротвёрдостью. Центральные части камер выполнены разноориентированными кристаллами пирита и на поверхности срезов оказываются их косые и торцевые части, хуже принимающие полировку и менее устойчивые к окислению. Арагонитовые перегородки и стенки раковин, окаймляющие их зоны пористого тонкокристаллического и глобулярного пирита с вторичными микровключениями могут быстро разрушаться, что требует их консервации.

Выводы

Аммониты месторождения Михайловское имеют сложное зональное строение и преимущественно пиритовый состав. Стенки и перегородки раковин сохраняют первоначальные пластинчатые и призматические арагонитовые слои. Из других минералов установлены: бассанит, ссомольнокит,

ярозит, кальцит, кварц, апатит, РАФ, графит, гипс, ильменит, микроклин, слюда, выявлено органическое вещество. Образование ряда микровключений происходило, возможно, с участием бактерий.

Основная часть раковин образована плотно срощенными кристаллами пирита размером 0,2–0,5 мм удлиненной формы. Присутствует тонкокристаллический и глобулярный пирит, расположенный в узкой пористой переходной зоне на контакте с арагонитовыми слоями. В этой зоне расположено и большинство минеральных микровключений.

По своим декоративным и технологическим характеристикам аммониты являются высококачественным ювелирным материалом, а интерьерные образцы имеют высокую стоимость. Сбор раковин аммонитов может осуществляться попутно с разработкой карьера без значительных материальных затрат. Минеральный состав и структурные особенности аммонитов ювелирного качества необходимо учитывать при их обработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буканов В.В. Цветные камни и коллекционные минералы. Энциклопедия. СПб., 2014. 464 с.
2. Герасимов П.А., Митта В.В., Кочанова М.Д. и др. Ископаемые келловейского яруса Центральной России. М.: ВНИГНИ. Мос. Гор. СЮН, 1996. 127 с.
3. Гуляев Д.Б. Инфразональная аммонитовая шкала верхнего бата — нижнего келловея Центральной России // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2001. Т. 9. № 1. С. 68–96.
4. Петроченков Д.А. Особенности отработки верхнедевонских ювелирно-поделочных аммонитов Марокко // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 2. С. 34–41.
5. Петроченков Д.А., Быховский Л.З. Ювелирно-поделочные аммониты: проблемы оценки и перспективы добычи // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2018. № 4. С. 15–22.
6. Петроченков Д.А., Ружицкий В.В. Минералогические особенности ювелирного пирита из меловых отложений Ульяновской области // Разведка и охрана недр. 2018. № 4. С. 7–12.
7. Средний и верхний оксфорд Русской платформы / Под ред. М.С. Месежникова. Л.: Наука, 1989. 183 с.
8. Mychaluk K. Update on Ammolite production from Southern Alberta, Canada // Gems & Gemology. 2009. V. 45. № 3. P. 192–196.
9. Walaszczyk I., Kennedy W.J., Dembiczy K., Gale A.S., Praszlier T., Rasoamiamanana A.H., Randrianaly H. Ammonite and inoceramid biostratigraphy and biogeography of the Cenomanian through basal Middle Campanian (Upper Cretaceous) of the Morondava Basin, western Madagascar // Journal of African Earth Sciences. 2014 V. 89. P. 79–132.

REFERENCES

1. Bukanov V.V. Colored stones and collection minerals. *Encyclopedia*. Saint Petersburg, 2014, 464 p. (In Russian).
2. Gerasimov P.A., Mitta V.V., Kochanova M.D. and etc. *Fossil Callovian stage of Central Russia*. Moscow, 1996, 127 p. (In Russian).
3. Gulyaev D.B. The infrazonal ammonite scale of the upper Bahtonian — lower Callovian of Central Russia. *Stratigraphy. Geological correlation*. 2001, vol. 9, no. 1, pp. 68–96. (In Russian).
4. Petrochenkov D.A. Features of production of the upper devonian jewelry-ornamental ammonites of Morocco. *Mining informational and analytical bulletin*. Moscow, 2018, vol. 2, pp. 34–41. (In Russian).
5. Petrochenkov D.A., Bykhovsky L.Z. Jewellery/ornamental ammonites: problems of valuation and production prospects. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*, 2018, no. 4, pp. 15–22. (In Russian).
6. Petrochenkov D.A., Ruzhitsky V.V. Mineralogical peculiarities of jewelry pyrite from the Cretaceous deposits of the Ulyanovsk region. *Prospect and protection of mineral resources*, 2018, vol. 4, pp. 7–12. (In Russian).
7. *Middle and Upper Oxford of the Russian Platform*. Edited by M.S. Mezhezhnikov. Leningrad, 1989, 183 p. (In Russian).
8. Mychaluk K. Update on Ammolite production from Southern Alberta, Canada. *Gems & Gemology*. 2009, V. 45, no 3, pp. 192–196.
9. Walaszczyk I., Kennedy W.J., Dembiczy K., Gale A.S., Praszlier T., Rasoamiamanana A.H., Randrianaly H. Ammonite and inoceramid biostratigraphy and biogeography of the Cenomanian through basal Middle Campanian (Upper Cretaceous) of the Morondava Basin, western Madagascar. *Journal of African Earth Sciences*. 2014, V. 89, pp. 79–132.

УДК 551.73+551.8

ЦИКЛИЧНОСТЬ ПАЛЕОЗОЙСКОГО РИФООБРАЗОВАНИЯ РАЗНЫХ ПОРЯДКОВ*

*В.Г. КУЗНЕЦОВ, Л.М. ЖУРАВЛЕВА**РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
65, Ленинский проспект, Москва 119991, Россия
e-mail: vgkuz@yandex.ru, zhurawlewa.lilia@yandex.ru*

В палеозойском разрезе выделены пять крупных циклов рифообразования — раннекембрийский, средне—позднеордовикский, силурийско—девонский, поздневисейско—серпуховский и пермский, верхние границы которых определяются соответствующими периодами с биотическими кризисами и массовыми вымираниями на границах ранний—средний кембрий, ордовик—силур (или хирнант—рудданиан), фран—фамен, серпухов—башкир, и пермь—триас. Циклы различаются по распространенности рифов в пределах планеты, составу и групповому разнообразию рифостроящей биоты и длительности рифообразования. В наиболее длительных — силурийско—девонском и пермском циклах отчетливо наблюдаются периоды относительного снижения интенсивности рифостроения, подразделяющие первые на две части — циклы второго порядка. Их появление обусловлено глобальными палеогеографическими и палеоклиматическими причинами, а в начале девона, возможно, помимо названных причин важную роль сыграло и глобальное биотическое событие — появление наземной биоты и соответственно определенное перераспределение потока питательных компонентов — нутриентов — с водной оболочки на сушу. Во всех случаях установлены циклы третьего порядка, образование которых определяется сугубо регионально—геологическими причинами, такими как колебания уровня моря, осолонение водоёмов, что фиксируется перекрытием рифов терригенными, глинистыми или соленосными породами. Аналогично воздействие вулканизма, когда эксплозивная деятельность прекращает рост рифов.

Ключевые слова: каркасные рифы; цикличность рифообразования; биологические, глобальные и региональные геологические события.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-4-26-36

DIFFERENT ORDER CYCLICITY OF THE PALEOZOIC REEF FORMATION

*V.G. KUZNETSOV, L.M. ZHURAVLEVA**Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
building 1, 65, Leninsky prosp., Moscow 119991, Russia
e-mail: zhurawlewa.lilia@yandex.ru*

There are five great cycles of reef formation in Paleozoic — Early Cambrian, Middle—Late Ordovician, Silurian—Devonian, Late Viséan—Serpukhovian and Permian. Their upper limits are determined by the corresponding periods of biotic crises and mass extinction events which have been at the borders of the Middle—Late Cambrian, Ordovician—Silurian, Frasnian—Famenian, Serpukhovian—Baskirian, Permian—Triassic. Cycles differ in the reef prevalence within the planet, in the composition and group diversity of reef-building biota and the duration of reef formation. The longest Silurian—Devonian and Permian cycles are divided with periods of relative decrease in the intensity of reef building into two parts and these periods are clearly observed. These are second order cycles. The bases of this division are global paleogeographic and paleoclimatic causes, and at the beginning of Devon, perhaps, in addition to these reasons, an important role was played by the global biotic event — the appearance of terrestrial biota and, accordingly, a certain redistribution of the flow of nutrients from the ocean to land. In all cases, third-order cycles have been established, the formation of which is determined by purely regional-geological reasons, such as sea level fluctuations, salinity of basins, which are fixed by the overlap of reefs with terrigenous, clay or saline rocks. Similar role is played by the volcanism, as explosive activity stops the growth of reefs.

Keywords: framework reefs; cyclicity of reef formation; biological; global and regional geological events.

Постановка проблемы и объект исследования

Определённая цикличность рифообразования с выделением и характеристикой отдельных этапов достаточно давно отмечена и с той или иной деталь-

ностью описана [5, 6, 8, 17, 22]. Более подробное исследование этой проблемы позволило установить наличие циклов разных масштабов как по длительности и интенсивности развития, так и по сообществам рифостроящих и обитавших на рифах организмов.

В статье рассматриваются в основном только рифы в узком смысле, определённом, в частности, в [18, с. 114–119], как холмовидные карбонатные образования, созданные в результате жизнедеятельности каркасных организмов, которые в период своего роста возвышались над дном моря, а в ископаемом состоянии представляющие собой карбонатные массивы, мощность которых больше мощности синхронных отложений. Более мелкие постройки типа биостромов и биогермов иногда упоминаются, но в анализ не включены.

В том же значении, как и в указанном справочнике, использован термин «иловые холмы», которые в настоящем сообщении упоминаются, но детально не анализируются.

Некоторым аспектам цикличности рифообразования разного уровня на примере палеозойской эры и посвящено настоящее сообщение.

Распределение рифов палеозоя и общая характеристика крупных циклов рифообразования

В самом общем виде в палеозое выделяется ряд крупных циклов, завершение которых обусловлено биотическими кризисами и массовыми вымираниями организмов. Графическое изображение циклов представлено на рис. 1, к которому необходимо сделать несколько предварительных замечаний. Во-первых, использованы представления отечественных геологов о нижней границе фанерозоя, когда кембрийская система начинается с томмотского яруса, а не с немакит-далдынского регионаруса, поэтому она датируется 535,0, а не 542,2 [19] млн лет, как это принято в международной стратиграфической шкале. Во-вторых, пенсильванская подсистема подразделена, опять-таки по российской шкале, на средний и верхний отделы карбона. Что касается перми, то использована международная шкала с подразделением на нижний (приуральский), средний (гваделупский) и верхний (лопийский) отделы.

С учётом сделанных замечаний в палеозойском разрезе выделены пять циклов рифообразования — раннекембрийский, средне—позднеордовикский, силурийско—девонский, поздневизейско—серпуховский и пермский, верхние границы которых определяются соответствующими периодами с биотическими кризисами и массовыми вымираниями на границах ранний—средний кембрий, ордовик—силур (или хирнант—рудданиан), фран—фамен, серпухов—башкир, и, наконец, пермь—триас.

Для палеонтологической характеристики рифов отдельных циклов использованы данные, опубликованные в [4–6, 10, 12].

Нижнекембрийские рифы широко развиты на Сибирской платформе, в Алтай-Саянской области, известны в Монголии, ряде районов Канады, в

бассейне Амадеус (Австралия), на о. Сардиния, в Южной Испании и Северном Марокко [7, 22].

Следует отметить специфический характер рифостроящей биоты кембрия и её функциональную роль. Среди организмов практически отсутствуют настоящие каркасостроители, «конструкторы» рифов. Таковыми являются, по сути дела, только археоциаты, которые появились в начале кембрия в томмотском веке на Сибирской платформе, откуда расселились практически по остальным регионам мира. Максимального развития они достигли во второй половине атдабанского века — раннем ботоме. Однако эти потенциальные каркасообразователи составляют весьма незначительную часть объёма рифа и тем самым не создают общего твёрдого каркаса. К тому же сами кубки обычно находятся не в вертикальном положении роста, часто они являются твёрдым субстратом, на котором селятся кальцибионты. Среди последних некоторое каркасообразующее значение могли иметь вертикально стоящие веточки эпифитонов. Хотя последние были тонкими и хрупкими, они создавали условия фиксации карбонатного материала, генерируемого разнообразными кальцибионтами — ренальцисами, марковеллами, гирванеллами и др.

При этом, несмотря на незначительное количество, само появление вертикально растущих и ветвистых форм стало основным фактором в становлении и формировании морфологически выраженных в рельефе дна рифов [7].

После массового вымирания и исчезновения археоциат рифообразование за счёт каркасных организмов надолго прекратилось. Во временном интервале средний кембрий—средний ордовик существовали каркасные потенциально рифостроящие организмы, в том числе губки, но, как убедительно показал в обстоятельном обзоре Б. Уэбби [31], ранне—среднеордовикские постройки — это преимущественно микробиально-иловые холмы, а постройки, созданные метазойными организмами — кораллами и мшанками, в раннем ордовике крайне редки. Собственно каркасное рифообразование с мшанками, строматопороидеями, кораллами и губками, и, как всегда, водорослями, проявилось в конце среднего ордовика — с дарвиллиана, и с небольшими перерывами рифообразование продолжалось и в позднем ордовике [9, 21, 25, 31]. Рифы этого временного интервала развиты в пределах Северной и Восточной Канады, ряде областей США, регионе Балтоскандии и Британии, Северном (Ордос), Южном (платформа Янцзы) и Юго-Восточном (Сычуань) Китае, на Урале и прилегающих районах от самого севера до юга, в Казахстане, на северо-востоке Сибири — в Верхоянье, на Чукотке, Сетте-Дабане, Таймыре, в Австралии.

Каркасообразующие рифостроители этого этапа представлены строматопороидеями, табулятами, в меньшей степени — ругозами, мшанками, листи-

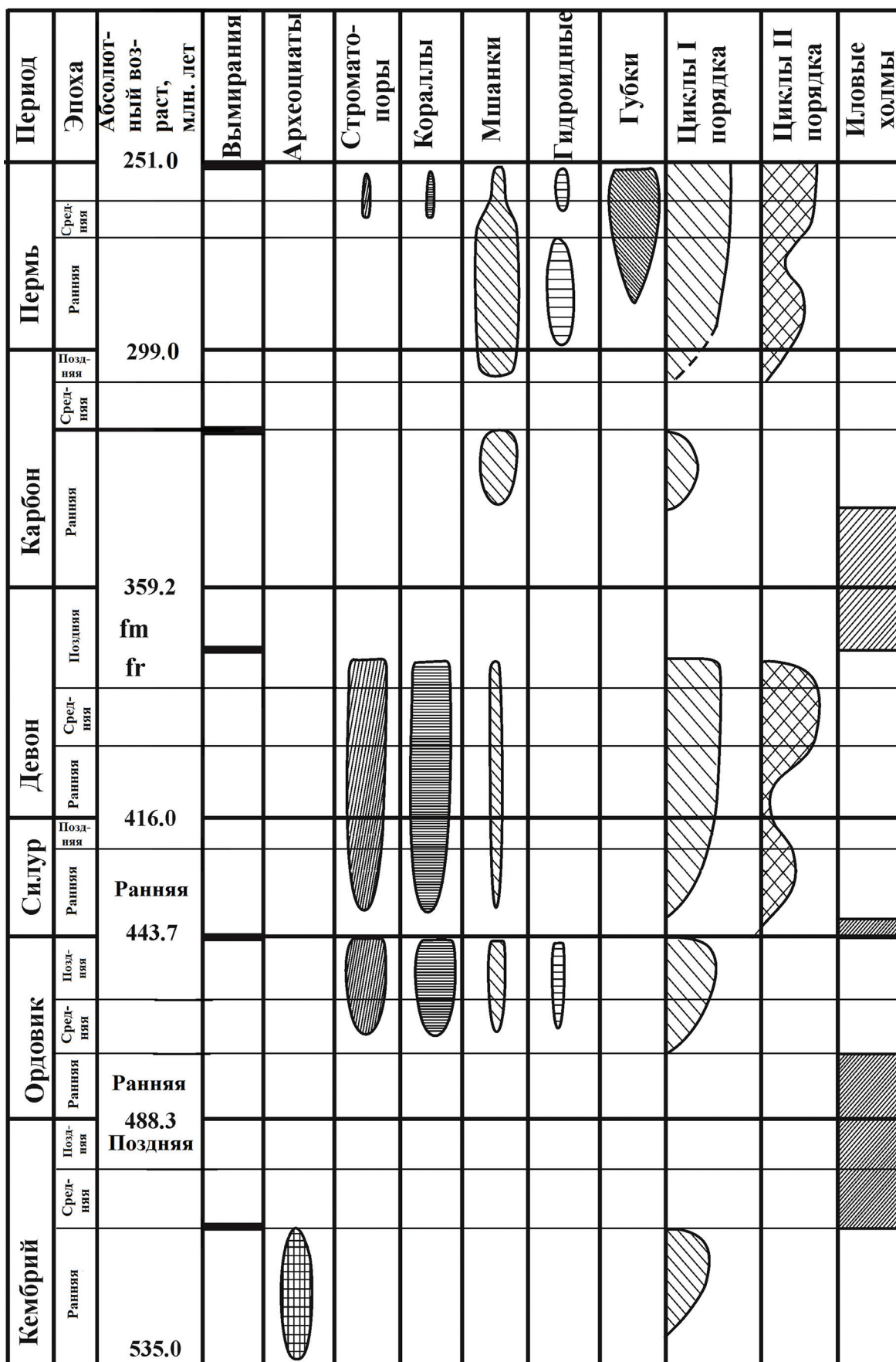


Рис. 1. Циклы рифообразования палеозоя и распределение рифостроящих организмов

ческими губками, с постоянным присутствием водорослей и микробиальных сообществ [9].

Практически сразу, точнее очень быстро, после биотического кризиса на границе ордовика—силура уже в раннем силуре рифообразование возобновилось. Последнее оказалось связано, видимо, с тем, что, несмотря на очень высокий уровень вымирания, отнесённого А.С. Алексеевым к великим массовым вымираниям [1], исчезла в основном не рифостроящая биота, а кораллы и строматопороидеи в целом не пострадали или деградировали относительно слабо. Начался самый длительный и самый интенсивный по распространённости рифов и их мощности силурийско-девонский этап рифообразования, который завершился на границе франа и фамена.

Силурийские рифы широко развиты в пределах древних платформ — Северо-Американской (Мичиганский и Иллинойский бассейны, орогенный комплекс Аппалачей), Восточно-Европейской (Волыно-Подолія), на Урале от о. Вайгач до Оренбуржья, на Южном Тяньшане, в Верхояно-Колымской складчатой зоне и других регионах.

Еще более широко развиты девонские рифы — это Северо-Американская, Восточно-Европейская и Австралийская платформы, Новая Земля и весь Урал, Казахстан, Южный Тянь-Шань, Салаир, Алтае-Саянская и Верхояно-Колымская складчатые зоны, такие рифы встречены в фундаменте Западно-Сибирской молодой платформы, в областях герцинской и альпийской складчатости Европы — Гарц, Альпы и др. [8].

Основными каркасообразователями этого этапа были ругозы, табуляты, строматопороидеи, в существенно меньшей мере — мшанки и рецептакулиты. Как везде и всегда, важную роль играли водоросли, в меньшей степени, кальцибионты. На фоне этого длительного и мощного рифообразования отмечается некоторое его снижение в конце силура—начале девона, т. е. деление его на два подэтапа. В качестве возможной причины этого относительного снижения интенсивности можно предположить крупные планетарные события этого времени. Во-первых, это относительное понижение уровня Мирового океана, увеличение площади суши. Во-вторых, некоторое похолодание, в целом эпоха была теплой. В-третьих, произошло важное биотическое событие — начало колонизации суши, появление наземной биоты и соответственно определённое перераспределение потока питательных компонентов — нутриентов — с водной оболочки на сушу, практическое прекращение в связи с этим формирования в начале девона обогащённых органическим веществом морских кремнистых образований — фтанитов [20]. Однако подобный весьма незначительный кризис не оказал существенного влияния на рифообразование, которое достигло максимума во второй половине среднего девона — франском веке.

Массовое вымирание на границе франа—фамена, известное как событие Келльвассер, положило конец широко распространённому мощному рифообразованию. Наступил длительный период формирования иловых холмов, в том числе известных как уолторские фации, который продолжался в течение фамена, турне и первой половины визе [12].

Несколько обособленный и не очень мощный цикл приходится на поздневизейско-серпуховской этап палеозойской истории [10]. Рифы этого этапа развиты в пределах Восточно-Европейской платформы, в Прикаспийской впадине и её обрамлении, Донбассе, Урале. На Северо-Американской платформе известны рифы на сводах Озарк и Цинцинати, на Австралийской — в штате Квинсленд [8]. Вне платформенных областей достаточно широко рифы этого возраста представлены в Восточном Казахстане, Сихотэ-Алине и Алазейской складчатой области, на Восточной Урале и Восточной Алтае. Рифы начала этого этапа описаны в Западной Европе — Великобритании, Испании, Франции и Бельгии [8].

Основными рифостроителями были мшанки, водоросли и микробные сообщества, хотя на рифах обитали также кораллы, криноидеи, фораминиферы, но значение последних, как строителей, было минимально, и они лишь поставляли строительный материал [8, 12].

Как отметил А.С. Алексеев [2], на рубеже серпуховского и башкирского веков, среди прочих вымерли до 80 % кораллов, поэтому они, если и встречаются, то практически утратили свое рифообразующее значение в среднем—позднем карбоне и перми. По сути дела мезозойско-кайнозойское рифообразование происходило с совершенно другими, чем палеозойские, кораллами.

Средний и в значительной степени поздний карбон — время отсутствия или незначительного рифообразования [8].

Пермские рифы известны в Южной Америке (Венесуэла), в Пермском бассейне США, в арктических районах Канады и Норвегии, на Урале и Приуралье (начиная с Полярного Урала и до самого юга) на Восточно-Европейской платформе и Прикаспийской впадине, в Приморье, на Кавказе и Памире, в Пакистане и Иране, ряде районов Китая, Таиланда и др [26].

Пермский этап рифообразования достаточно отчётливо подразделяется на два подцикла.

Рифы нижней перми (приуральский отдел) подробно изучены на востоке Восточно-Европейской платформы. Рифостроителями служили мшанки, гидроидные (палеоаплезины), водоросли и организмы неясного систематического положения — тубифиты. Прекращение рифообразования связано с регрессией, резким осолонением водоёма и перекрытием их соленосными толщами.

Рифы средней перми (гваделупский отдел) подробно изучены в пределах Пермского бассейна США [24, 28]. Они созданы багряными и зелёными водорослями, известковыми губками, мшанками, в незначительном количестве встречены кораллы. Небольшие рифы начала средней перми в пределах баренцевоморского шельфа построены мшанками и губками. Аналогичные по возрасту рифы Вятского вала Урало-Поволжья преимущественно водорослево-мшанковые с присутствием криноидей [26]. В Германии, Польше, Литве рифы конца средней перми расположены в основании цехштейна, что, видимо, соответствует верхам гваделупского отдела [26]. Они построены мшанками и цианобактериальными образованиями, описанными как *Stromaria* [30].

Более разнообразна рифостроящая биота Тетической области, в частности, рифов Дальнего Востока [26]. Основными строителями были сфинктозои и другие известковые губки, водоросли, гидроидные, кораллы, мшанки. Аналогичен набор рифостроителей Южного Китая — мшанки, кораллы и главным образом более разнообразные, чем в Приморье, губки — кальциспонгии, сфинктозои, инозои, табулозои, гидроидные, частично, строматопоры; широко представлены водоросли и разнообразные бактериальные формы [26].

Таким образом, в северном полушарии — в пределах Северной Пангеи существовало два под-

цикла рифообразования — раннепермский и среднепермский, разделённые накоплениями некарбонатных отложений, в то время как в Южной Тетической области фиксируется только один — позднепермский цикл, рифостроители которого существенно разнообразнее [26].

Подобные значительные отличия обусловлены, видимо, главным образом, геологическими, точнее глобальными палеогеографическими, причинами. Северная Пангея находилась в зоне аридного и частично семиаридного климата, в то время как Тетическая область — в зоне гумидного, что определило существенно более разнообразный набор рифостроителей. При этом даже в этой палеогеографической и палеоклиматической зоне рифостроящая и обитающая на рифах биота в Китае более разнообразная, чем в расположенных в Тетической области, но севернее, рифах Северного Кавказа [26].

Примеры цикличности более низкого порядка

В каждом цикле первого и второго порядков устанавливается цикличность более низкого уровня. Она проявляется в том, что в одном регионе имеется несколько интервалов рифостроения, разделённых нерифовыми отложениями.

В ордовикском цикле она наглядно проявлена в Казахстане (рис. 2) [4, 13—16].

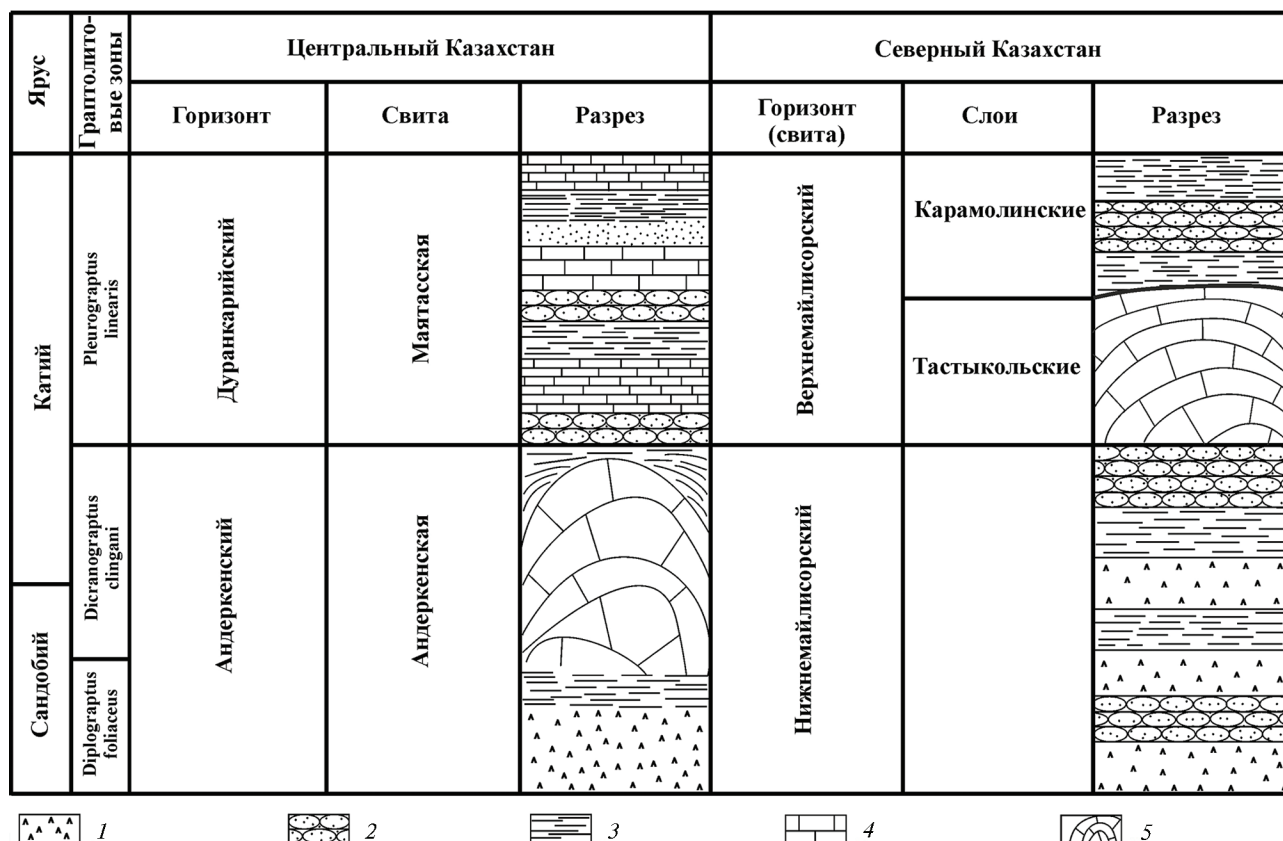


Рис. 2. Циклическое рифообразование третьего порядка ордовика Казахстана: 1 — вулканы, порфиры, туфы; 2 — пески и алевролиты; 3 — аргиллиты; 4 — известняки; 5 — рифы

Андеркентский горизонт датируется верхами сандбийского и низами катийского веков, залегает на подстилающих вулканитах и содержит в разрезах Центрального Казахстана рифовые образования, перекрытые глинистыми отложениями верхов этого горизонта. В дуранкаритское время на этой территории формировались терригенно-карбонатные отложения [15, 16].

Иная ситуация в пределах Северного Казахстана. Стратиграфический аналог андеркентского горизонта — нижнемайлисорский горизонт — представлен терригенно-карбонатными отложениями с прослоями туфов и вулканитов. Тастыкольские слои основания верхнемайлисорского горизонта включают крупный атолловидный Майлисорский риф. Само рифообразование закончилось во второй половине позднемайлисорского времени, перекрывающие рифы карамалинские слои представлены песчано-глинистыми отложениями [13].

Евразия		Северная Америка		
Серия	Ярус	Серия	Формация	
Готланд	Лохков			
	При-доль	Каюган	Кейсеран	
			Тополовей	
	Лудлов		Сэлайна	+++++
	Венлок	Ниагар	Локпорт	
			Клифтон	
	Ландовери		Клинтон	
		Мединан	Александрия	

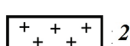


Рис. 3. Цикличность силурийского рифообразования третьего порядка Мичиганского, Иллинойского бассейнов и орогенного комплекса Аппалачей: 1 — рифы; 2 — соли

В разрезе силура в цикле второго порядка, который, как отмечено выше, начинается с основания яруса и завершается относительным сокращением в начале девона в пределах Северной Америки — Мичиганский и Иллинойский бассейны, орогенный комплекс Аппалачей — выделяются три цикла более низкого, третьего, порядка.

В основании силура местами развиты рифы формации Александрия, затем каркасное рифостроение сменяется формированием микробиально-водорослевых построек.

Второй, наиболее изученный цикл третьего порядка относится к венлоку—раннему лудлову по европейской стратиграфической шкале. Сами рифы развиты в серии Ниагара — формации Локпорт и перекрываются солями формации Сэлайна (верхи лудлова). Таким образом, рифообразование прекращается по геологическим причинам — смене карбонатной седиментации накоплением солей.

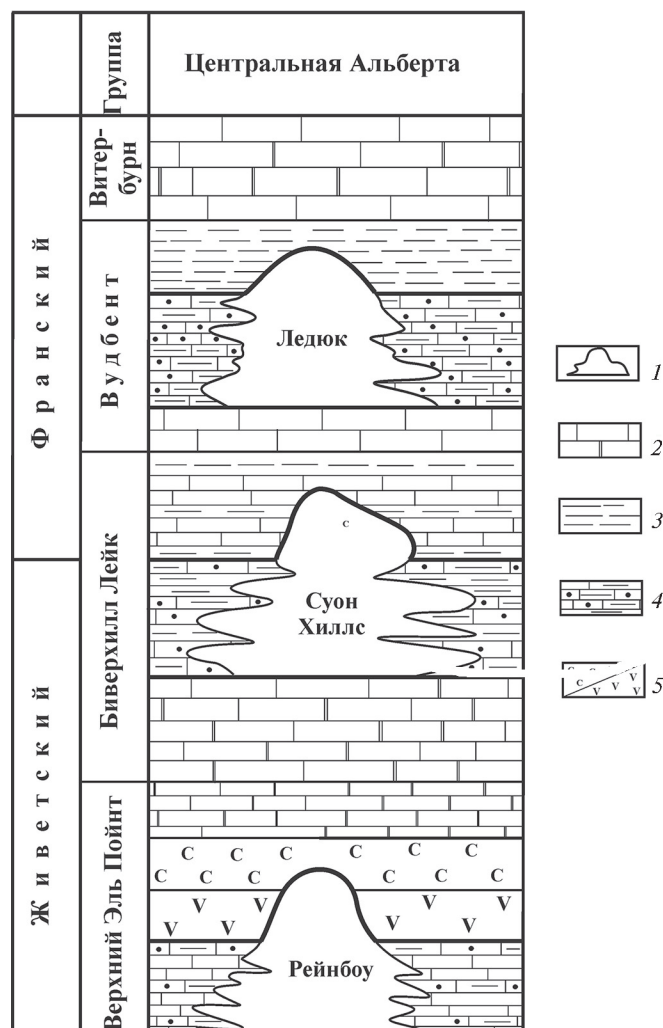
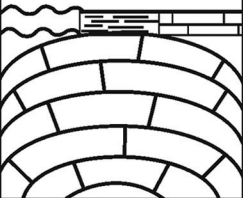
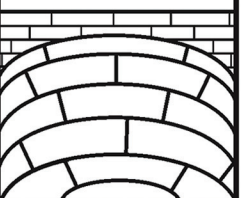
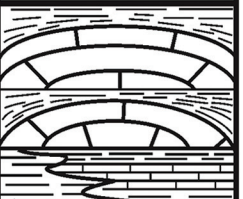
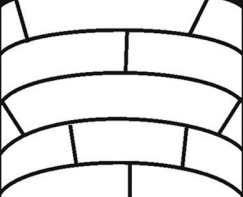
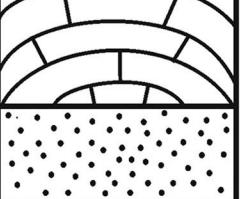
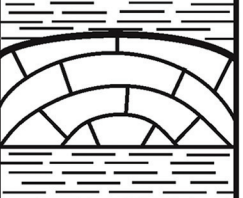
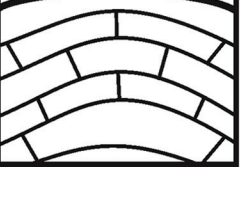
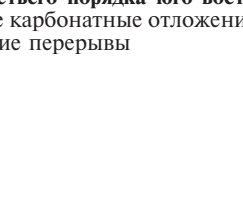


Рис. 4. Цикличность средне—позднедевонского рифообразования третьего порядка в пределах Западно-Канадского бассейна: 1 — рифы; 2 — мелководные известняки и доломиты; 3 — глины и глинистые сланцы; 4 — битуминозно-глинистые известняки; 5 — эвапориты (с — каменная соль, л — ангидрит)

Ярус	Подъярус	Печорская синеклиза		Урало-Поволжье и Прикаспийская впадина	
		горизонт/свита	риф	горизонт	риф
Фаменский					
Франский	верхний	ухтинская		ливенский	
		сирачойский		евлановский	
		ветласянский		воронежский	
		доманиковский		мендымский (петинский)	
	средний	саргаевский		верхнесе-милукский	
				нижнесе-милукский (рудкинский)	
				саргаевский	
	нижний	тиманский		кыновский (тиманский)	
		дзьерский		пашийский	
		яранский			
Живетский				муллинский	
				ардатовский	
				воробьевский	
Эйфельский				афонинский	
				бийский	

- 1  2  3  4  5 

Рис. 5. Циклическое рифообразование средне—позднедевонского рифообразования третьего порядка юго-востока Восточно-Европейской платформы и Печорской синеклизы: 1 — каркасные рифы; 2 — нерифовые карбонатные отложения; 3 — глинистые толщи; 4 — песчаные отложения; 5 — стратиграфические перерывы

Третий цикл охватывает верхи силура — практически пражидолий европейской шкалы, лишь частично, местами — самые низы девона. Другими словами, его завершение обусловлено не только, возможно, и не столько региональными причинами, а более значимыми, отмеченными выше изменениями на границе силур—девон и в начале девона (рис. 3). Иначе говоря, этот позднесилурийский цикл рифообразования третьего порядка одновременно завершает цикл второго порядка, что обусловлено отмеченными выше глобальными событиями.

Во всех циклах набор рифостроителей типичен для цикла второго порядка — разнообразные кораллы, строматопоры, частично губки, при постоянном присутствии водорослей.

Еще более чётко цикличность третьего порядка проявляется в пределах девонского подцикла второго порядка.

Так, в Западно-Канадском бассейне раннеживетское рифообразование времени Рейнбоу сменяется накоплением соленосных отложений Маскет и Салфер Пойнт, а затем раннефранское и среднефранское (Суон Хиллс и Ледюк) — накоплением

глинистых пачек соответственно формаций Уоттервейс и Айртон [11] (рис. 4).

В эйфельско-живетско-франском интервале разреза юго-востока Восточно-Европейской платформы (рис. 5) рифы формировались в течение бийско-афонинского, ардамовского, кыновского, ранне-семилюкского (рудкинского), позднесемилюкского, ранне- и поздневоронежского и, наконец, евлановско-ливенского возраста; эти рифы разделены песчано-глинистыми, глинистыми и реже нерифовыми карбонатными отложениями [12].

В Печорской синеклизе (рис. 5) рифы доманикового возраста перекрываются ветласянской глинистой пачкой, сирачойские рифы — соответственно нижеухтинской. При этом более молодые, новообразованные после каждой регрессии рифы часто формировались на склонах предшествующих рифов, образуя проградационные смещения [3].

Аналогично смещение рифов формации Кэпитен относительно рифов Гот Сип гваделупского отдела Пермского бассейна США [24, 28]. В течение ранне—среднегваделупского времени на бровке шельфа формировался риф Гот Сип, а в депрессии —

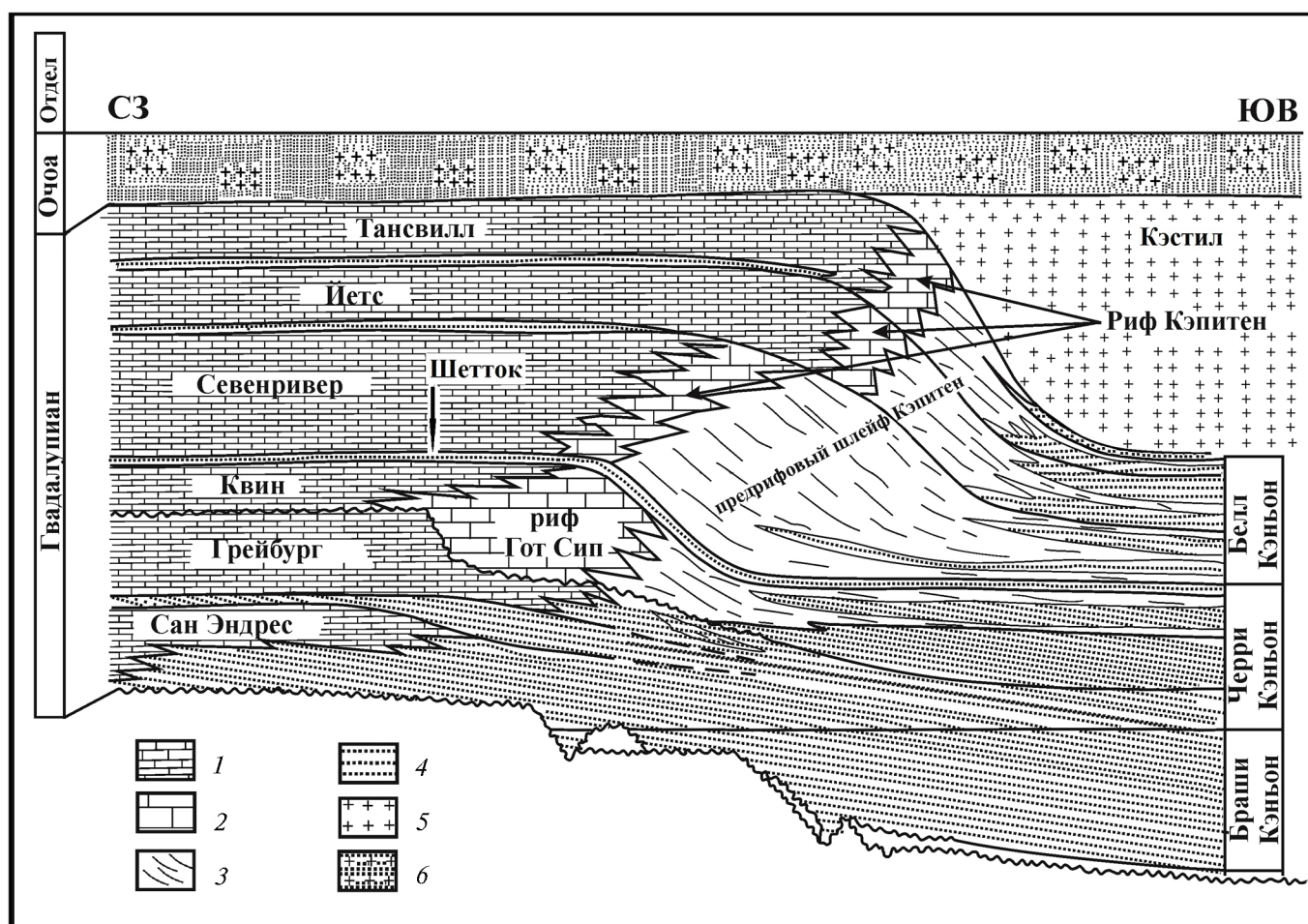


Рис. 6. Смещение рифов формации Кэпитен относительно рифов Гот Сип: цикличность третьего порядка, зафиксированная отложением песчаников [24, 28]: 1 — нерифовые известняки; 2 — рифы; 3 — аллохтонные карбонатные отложения; 4 — песчаники; 5 — ангидрит—галит; 6 — соленосные и терригенные отложения

серия синхронных ему глубоководных формаций. На границе средне- и позднегваделупского времен произошла регрессия, зафиксированная песчаниками Шетток, которые распространены в зарифовой области, над рифом, и протягиваются в депрессию, во время накопления которых рифообразование прекратилось [26, 28]. После очередной трансгрессии в позднегваделупское время на склоне депрессии образовался риф Кэпитен. Окончание рифообразования связано с накоплением эвапоритов Кэстил (рис. 6).

Цикличность третьего порядка чётко фиксируется в цехштейне Германии, возраст которого, по крайней мере нижней его части, датируется кемптенским веком МСШ [23, 26, 29]. Наиболее активное рифообразование отмечено в нижнем цикле Верра, где рифы, обрамляющие глубоководный бассейн и развитые в его пределах, залегают на карбонатных породах основания этого цикла и перекрываются гипсоносно-соленосными отложениями верхней его части. Второй, менее развитый цикл рифообразования связан со следующим циклом Штассфурт [26, 28], где рифы также перекрываются отложениями солей (рис. 7).

Таким образом, прекращение рифообразования связано со сменой карбонатной седиментации эвапоритовой.

Причины прекращения рифообразования, следовательно, подобной цикличности третьего порядка, сугубо регионально-геологические — колебания уровня моря и климат, когда при регрессии рифы перекрываются глинистыми породами или, в соответствующем климате, отложениями солей. Аналогично воздействие вулканизма, когда эксплозивная деятельность прекращает рост рифов, как это имеет место, например, в ордовике Казахстана [15].

Если принять весь палеозой за надпорядковый цикл, то намечается определённая последовательность по интенсивности рифостроения и развитию основных рифостроителей, учитывая очень крупные таксоны последних.

Первыми каркасными организмами-рифостроителями были археоциаты — своеобразная группа биологического типа губок. Затем они сменились ассоциацией строматопороидей и кораллов — табулят и ругоз ордовика—силура и девона, в свою очередь, в карбоне—ранней перми вытесненных мшанками, и наконец, в конце суперцикла — в средней—поздней перми, вновь губками, которые неизмеримо по сравнению с кембрием расширились в своем таксономическом разнообразии.

При этом постоянно на всех этапах важным компонентом рифового биоценоза были водоросли и микробиальные сообщества (кальцимикробы), которые играли роль генераторов карбонатного материала, улавливателей и цементаторов.

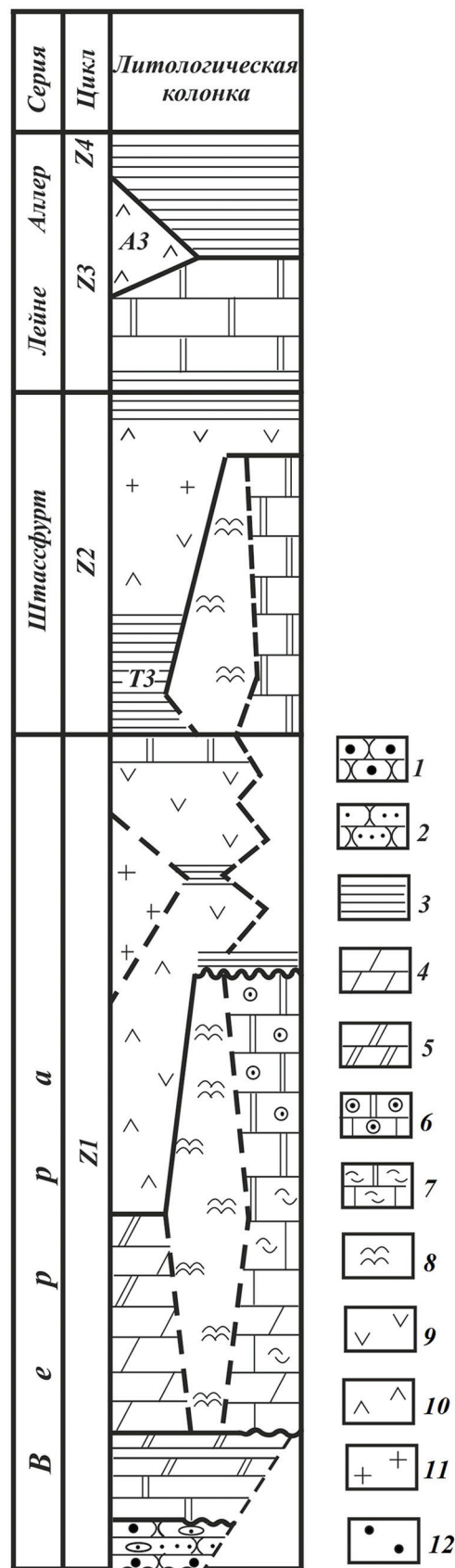


Рис. 7. Стратиграфическая колонка цехштейна Германии и положение в ней рифов [23]: 1 — конгломераты, гравелиты, 2 — песчаники, 3 — глины, 4 — мергели известковые, 5 — мергели доломитовые, 6 — известняки и доломиты пизолитовые, 7 — известняки и доломиты органогенные, 8 — рифовые образования, 9 — гипсы, 10 — ангидриты, 11 — каменная соль, 12 — битуминозность

Заключение

Завершая краткое рассмотрение цикличности рифообразования палеозоя, следует повторить, что она имеет по крайней мере три порядка. Наиболее крупные циклы, точнее их границы, определяются уровнями массовых вымираний, т. е. глобальными биологическими циклами. Обсуждение причин подобных событий — вымираний — выходит за рамки настоящего сообщения.

При этом, как отмечено в [27], собственно рифообразование прекращается до момента вымирания.

Циклы второго порядка, когда происходит относительное ослабление формирования рифов — конец силура—начало девона, граница средней и поздней перми, обусловлены крупными, по сути дела, глобальными событиями — палеогеографическими и палеоклиматическими перестройками. Наконец, цикличность третьего уровня определяется сугубо геологическими причинами регионального масштаба.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.С. Глобальные биогенные кризисы и массовые вымирания в фанерозойской истории Земли // Биотические события на основных рубежах фанерозоя. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 22–47.
2. Алексеев А.С. Типизация фанерозойских событий массового вымирания организмов // Вестник МГУ. Серия 4. Геология, 2000. № 4. С. 6–14.
3. Журавлева Л.М. Влияние биотического кризиса на границе франа—фамена на рифообразование в пределах Печорской синеклизы // Известия вузов. Геология и разведка. 2017. № 1. С. 30–37.
4. Королева М.Н. Ордовикские отложения Пристепняково-Сталинского района Северного Казахстана // Советская геология. 1959. № 9. С. 136–141.
5. Корольюк И.К., Михайлова М.В. Этапность процессов рифообразования и ритмичность осадконакопления рифовых фаций // Фанерозойские рифы и кораллы СССР. М.: Наука, 1986. С. 134–142.
6. Кузнецов В.Г. Некоторые черты эволюции рифообразования в истории Земли // Эволюция осадочного процесса в океанах и на континентах. М.: Наука, 1983. С. 162–173.
7. Кузнецов В.Г. Кембрийское рифообразование в пределах России // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1998. № 6. С. 82–91.
8. Кузнецов В.Г. Эволюция карбонатонакопления в истории Земли. М.: ГЕОС, 2003. 262 с.
9. Кузнецов В.Г. Рифы позднего ордовика и биологический кризис на границе ордовик—силур // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2018. Т. 26. № 3. С. 24–30. DOI: 10.1134/S0869593818030085.
10. Кузнецов В.Г., Антошкина А.И. Поздневизейско-серпуховской этап палеозойского рифообразования // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2005. Т. 13. № 4. С. 61–77.
11. Кузнецов В.Г., Журавлева Л.М. Рифовые образования Западно-Канадского бассейна и их нефтегазоносность // Литология и полезные ископаемые. 2018а. № 3. С. 257–273. DOI:10.7868/S0024497X18030047.
12. Кузнецов В.Г., Журавлева Л.М. Девонское рифообразование в обрамлении Прикаспийской впадины // Литология и полезные ископаемые. 2018б. № 5. С. 432–443. DOI: 10.1134/S0024497X18050063.
13. Левина С.Д., Львова Т.Н. О происхождении карбонатных пород в карадоговских отложениях Тастыколь-Коксорского района Северного Казахстана // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1959. № 5. С. 81–93.
14. Львова Т.Н., Деметьев П.К., Иванов Д.Н., Кисляков Я.М. Строение рифогенных отложений в нижнем палеозое Северного Казахстана // Материалы по региональной тектонике СССР. М.: Недра, 1964. С. 44–54.
15. Никитин И.Ф. Ордовик Казахстана. Ч. II. Палеогеография и палеотектоника. Алма-Ата: Наука, 1973. 99 с.
16. Никитин И.Ф., Гниловская М.Б., Журавлева И.Т., Лучинина В.А., Мякова Е.И. Андеркентская биогермная гряда и история ее образования // Среда и жизнь в геологическом прошлом. Палеоэкологические проблемы. Новосибирск: Наука, 1974. С. 122–159.
17. Равикович А.И., Журавлева И.Т. Эволюция органо-генных построек в истории Земли // Древние Cnidaria. Труды ИГиГ СО АН СССР. Вып. 202. Новосибирск: Наука, 1975. Т. 2. С. 11–19.
18. Современные и ископаемые рифы. Термины и определения. Справочник. М.: Недра, 1990. 184 с.
19. Стратиграфический кодекс России. Изд-е третье. СПб.: ВСЕГЕИ, 2006. 96 с.
20. Хворова И.В. Основные черты эволюции кремненакопления в фанерозое // Эволюция осадочного процесса в океанах и на континентах. М.: Наука, 1983. С. 11–120.
21. Cooper P. Evolution, Radiation, and Extinctions in Proterozoic to Mid-Paleozoic Reefs // The History and Sedimentology of Ancient Reef Systems Ed. G.D. Stanley Kluwer Academic, New York, 2001. P. 89–119.
22. Flügel E., Kissling W. Patterns of Phanerozoic Reef Crisis // Phanerozoic Reef Patterns. SEPM. Sp. Publ. N 72, 2002. P. 691–733.
23. Kerkmann K. Riffe und Algenbaenke im Zechstein von Thueringen // Freiburger Forschungshefte. 1969. N 252. 85 p.
24. Kerans Ch., Zahm Ch., Garcia-Freska B., Harris P.M. Guadalupe Mountains, West Texas and New Mexico: Key excursions // AAPG Bulletin, 2017. V. 101. N 4. P. 465–474.
25. Krueger B., Hints L., Lehnert O. Ordovician reef and mound evolution: the Baltoscandian picture // Geol. Mag., 2016. DOI: 10.1017/S0016756816000303.
26. Kuznetsov V.G. Reef Construction in the Second Half of the Permian and Biotic Crisis at the Permian—Triassic Boundary // Stratigraphy and the Geological Correlation. 2018. V. 26. N 7. P. 743–758. DOI: 10.1134/S086959381807002X.
27. Kuznetsov V.G., Zhuravleva L.M. Geological and Biological Reasons for the Cessation of Reef Formation: Evidence from the Paleozoic // Lithology and Mineral Resources. 2019. Vol. 54, No. 2, P. 93–102. DOI: 10.1134/S0024490219020056.
28. Mazzullo S.J. Permian Stratigraphy and Facies, Permian Basin (Texas—New Mexico) and Adjoining Areas in the Midcontinent United States / The Permian of Northern Pangea / Ed. P.A. Scholle < Peryt T.M., Ulmer-Scholle D.S. Springer, 1995. V.2. P. 41–60.
29. Stemmerik L. Permian history of the Norwegian—Greenland sea area / The Permian of Northern Pangea / Scholle P.A., Peryt T.M., Ulmer-Scholle D.S. Editors. Springer, 1995. V.2. P. 98–118.
30. Walter I. Geologisches Heimatskunde von Thueringen. 3. Aufl., Jena, 1906. S. 205.
31. Webby B.D. Patterns Ordovician Reef Development // Phanerozoic Reef Patterns. SEPM. Sp. Publ. 2002. N 72. P. 129–179.

REFERENCES

1. Alekseev A.S. Global biogenic crises and mass extinctions in the Phanerozoic Earth history. *Biotic events at the main frontiers of Phanerozoic*, Moscow, Moscow State University Publ., 1989, pp. 22–47. (In Russian)
2. Alekseev A.S. Typification of Phanerozoic events of mass extinction of organisms. *Moscow University Geology Bulletin* 2000, no. 4, pp. 6–14. (In Russian)
3. Zhuravleva L.M. Influence of the Frasnian — Famennian extinction events on the reef development within the Pechora syncline. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2017, no 1, pp. 30–37. (In Russian)
4. Koroleva M.N. Ordovician sediments of Prystepnyakovo-Stalin district of Northern Kazakhstan. *Soviet Geology*, 1959, no. 9, pp. 136–141. (In Russian)

5. Korolyuk I.K., Mikhaylova M.V. The stages of the processes of reef formation and rhythm of the reef depositional facies. *Phanerozoic reefs and corals of the USSR*, M.: Nauka Publ., 1986, pp. 134–142. (In Russian)
6. Kuznetsov V.G. Some features of the evolution of reef formation in the Earth's history. *Evolution of sedimentary processes in oceans and continents*, M, Nauka Publ., 1983, pp. 162–173. (In Russian)
7. Kuznetsov V.G. Cambrian reef formation within Russia. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 1998, no 6, pp. 82–91. (In Russian)
8. Kuznetsov V.G. *Evolution of the carbonate formation in the Earth's history*. M., GEOS Publ., 2003, 262 p. (In Russian)
9. Kuznetsov V.G. Late Ordovician reefs and the biological crisis at the Ordovician–Silurian Boundary. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2018, v. 26, no. 3, pp. 24–30. (In Russian), DOI: 10.1134/S0869593818030085.
10. Kuznetsov V.G., Antoshkina A.I. The late Visean — Serpu-khovian stage in Paleozoic reef formation. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2005, v. 13, no 4, pp. 61–77. (In Russian)
11. Kuznetsov V.G., Zhuravleva L.M. Reef Formations in the West Canada Basin and Their Oil and Gas Potential. *Lithology and Mineral Resources*, 2018a, no. 3, pp. 257–273. (In Russian). DOI:10.7868/S0024497X18030047
12. Kuznetsov V.G., Zhuravleva L.M. Devonian Reef Formation in the Caspian Basin Framing. *Lithology and Mineral Resources*, 2018b, vol. 53, no. 5, pp. 432–443. (In Russian). DOI: 10.1134/S0024497X18050063.
13. Levina S.D., L'vova T.N. The origin of carbonate rocks in the Tastykol'-Kohksor region of Northern Kazakhstan, *Bulletin of Moscow society of naturalists. Section Geology*, 1959, no 5, pp.81–93. (In Russian)
14. L'vova T.N., Dement'ev P.K., Ivanov D.N., Kislyakov Ya.M. Structure of reef deposits in the Lower Paleozoic of Northern Kazakhstan, *Materials on regional tectonics of the USSR*. M., Nedra Publ., 1964, pp. 44–54. (In Russian)
15. Nikitin I.F. Ordovician of Kazakhstan. Part 2. *Paleogeography and tectonics*. Alma-Ata. Nauka Publ., 1973, 99 p. (In Russian)
16. Nikitin I.F., Gnilovskaya M.B., Zhuravleva I.T., Luchinina V.A., Myakova E.I. Anderkent bioherm ridge and the history of its formation. *Environment and life in the geological past. Paleoe-cological problems*. Novosibirsk, Nauka publ, 1974, pp. 122–159. (In Russian)
17. Ravikovich A.I., Zhuravleva I.T. Evolution of organogenic buildings in the of the Earth's history. *Proc. IPGG SB RAS «Fossil Cnidaria»*, issue 202. Novosibirsk, Nauka Publ., 1975, v. 2, pp.11–19. (In Russian)
18. *Modern and fossil reefs. Terms and definitions. Handbook*. M., Nedra Publ., 1990, 184 p. (In Russian)
19. *Stratigraphic Code of Russia. Third edition*. St. Petersburg, VSEGEI Press, 2006, 96 p. (In Russian)
20. Hovorova I.V. The main features of of silica accumulation evolution in the Phanerozoic. *Evolution of sedimentary processes in oceans and continents*. M., Nauka Publ., 1983, pp. 11–120. (In Russian)
21. Cooper P. Evolution, Radiation, and Extinctions in Proterozoic to Mid-Paleozoic Reefs. *The History and Sedimentology of Ancient Reef Systems*, Ed. G.D. Stanly Kluwer Academic, New York, 2001, pp. 89–119.
22. Fluegel E. Kissling W. Patterns of Phanerozoic Reef Crisis. *Phane-rozoic Reef Patterns*. SEPM. Sp. Publ., no 72, 2002, pp. 691–733.
23. Kerkmann K. Riffe und Algenbaenke im Zechstein von Thue-ringen. *Freiberger Forschungshefte*, 1969, no 252, 85 p.
24. Kerans Ch., Zahm Ch., Garcia-Freska B., Harris P.M. Guada-lupe Mountains, West Texas and New Mexico: Key excursions. *AAPG Bulletin*, 2017, v. 101, no 4, pp. 465–474.
25. Krueger B., Hints L., Lehnert O. Ordovician reef and mound evolution: the Baltoscandian picture. *Geol. Mag.*, 2016. DOI: 10.1017/50016756816000303.
26. Kuznetsov V.G. Reef Construction in the Second Half of the Permian and Biotic Crisis at the Permian – Triassic Boundary. *Stratigraphy and the Geological Correlation*, 2018, v. 26, no 7, pp.743–758. DOI: 10.1134/S086959381807002X
27. Kuznetsov V.G., Zhuravleva L.M. Geological and Biological Reasons for the Cessation of Reef Formation: Evidence from the Paleozoic. *Lithology and Mineral Resources*, 2019, vol. 54, no. 2, pp. 93–102. DOI: 10.1134/S0024490219020056/
28. Mazzullo S.J. Permian Stratigraphy and Facies, Permian Basin (Texas–New Mexico) and Adjoining Areas in the Midcontinent United States, *The Permian of Northern Pangea*. Ed. P.A. Scholle, T.M. Peryt, D.S. Ulmer-Scholle. Springer, 1995, v. 2, pp. 41–60.
29. Stemmerik L. Permian history of the Norwegian–Greenland sea area. *The Permian of Northern Pangea*. P.A. Scholle, T.M. Peryt, D.S. Ulmer-Scholle. Springer, 1995, v. 2, pp. 98–118.
30. Walter I. *Geologisches Heimatskunde vjn Thueringen*. 3. Aufg., Iena, 1906, s. 205.
31. Webby B.D. *Patterns Ordovician Reef Development. Phanerozoic Reef Paterns*. SEPM Sp. Publ, 2002, no 72, pp. 129–179.

ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ,
МЕТОДИКА ИХ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

USEFUL MINERALS,
METHODS OF THEIR PROSPECTING AND EXPLORATION

УДК 551.213+552.323.6

**ФОРМИРОВАНИЕ КРАТЕРА И ЭРОЗИОННЫЙ СРЕЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ
ТРУБКИ АРХАНГЕЛЬСКАЯ (РОССИЯ)***

А.В. БОЛОНИН, П.А. ИГНАТОВ, А.В. ПЕТРОВ

*ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., Москва 117997, Россия
e-mail: bolonin.a@inbox.ru*

В Зимнебережном алмазоносном районе позднедевонские кимберлитовые трубки Архангельская, Пионерская, имени Гриба, как и ряд других трубок, обладают полными разрезами кратерных туфогенно-терригенных отложений, мощность которых составляет 120–127 м. Для трубки Архангельская характерны остатки эрозионного раструба, который был денудирован на этапе региональной эрозии — до среднего карбона. На основе систематической документации стенок опытно-промышленного карьера трубки Архангельская авторами произведён расчёт первоначальной высоты раструба (92 м). Он базируется на равенстве объёма вмещающих пород, эродированных в пределах кольцевого раструба, и объёма терригенного материала, содержащегося в кратерных отложениях. Для трубки Архангельская реконструированы последовательность и кинематика формирования кратерных отложений. Выделено четыре фазы развития маар-кратера, наступившие после инъекции кимберлитовой магмы и пирокластики в жерло вулкана до выхода на палеоповерхность: 1) накопление пачки песчаников мощностью 27 м за счёт эрозии вендского цоколя в кольцевом раструбе высотой 50 м с проседанием подошвы кратера амплитудой 77 м; 2) накопление пачки туфотерригенных отложений мощностью 67 м; пачка формировалась в условиях повторной вулканической активности и тефрового кольцевого вала с суммарной амплитудой проседания 169 м; 3) терригенная седиментация с общей амплитудой проседания 219 м; 4) региональная эрозия в период от позднего девона до раннего карбона и перекрытие трубки отложениями среднего карбона и четвертичной системы. Глубина региональной эрозии практически совпадает с расчётной высотой эродированного раструба, равной 92 м. Для трубок Пионерская и имени Гриба расчётная высота эрозионного раструба составляет соответственно 92 и 103 м. Для накопления кратерных отложений требовалось проседание их подошвы амплитудой 212–223 м. В фазы резкого проседания обрушение стенок жерла приводит к образованию крупноглыбовых отложений и «рифов». После завершения гравитационной эрозии маар-кратер переходит в режим плоскостного размыва с накоплением тонкообломочных и хемогенных озерных осадков. Причинами проседания могли быть отток дегазированной магмы вниз по жерлу, выброс из жерла пирокластики и уплотнение туфоосадочного материала в кратере.

Ключевые слова: кимберлиты; трубка Архангельская; кратерные отложения; эрозионный раструб.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-4-37-43

CRATER FORMATION AND EROSIONAL TRUNCATION
OF ARKHANGELSKAYA KIMBERLITE PIPE (RUSSIA)

A.V. BOLONIN, P.A. IGNATOV, A.V. PETROV

*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)
23, Miklouho-Maklay's street, Moscow 117997, Russia
e-mail: bolonin.a@inbox.ru*

The Late Devonian kimberlite pipes Arkhangelskaya, Pionerskaya, named after Grib, as well as a number of other pipes, have full sections of crater tufogenic and terrigenous deposits in the Zimniberezhny diamondiferous region, the thickness of which is 120–127 m. The remains of the erosion bell, which was denuded at the stage of regional erosion in the Middle Carboniferous, are characteristic of the Arkhangelskaya pipe. Based on the systematic documentation of the walls of the pilot industrial pit of the Arkhangelskaya pipe, the authors have calculated the initial height of the bell (92 m). The calculation is based on the equality of the volume of host rocks eroded within the annular bell and the volume of terrigenous material contained in the crater deposits. The sequence and kinematics of the formation of crater deposits were reconstructed for the Arkhangelskaya pipe. Four phases of the development of the maar (explosion) crater were identified, which occurred after the injection of kimberlite magma and pyroclastics into the volcano's vent before reaching the paleosurface: 1 — accumulation of sandstones, 27 m thick, due to erosion of the Vendian socle in a 50-meter-long annular bell with subsidence of the base of the crater with an amplitude of 77 m; 2 — the accumulation of tufogenic and terrigenous deposits with a thickness of 67 m, it was formed under conditions of repeated volcanic activity and a tephra annular shaft with a total subsidence amplitude of 169 m; 3 — terrigenous sedimentation with a total subsidence amplitude of 219 m; 4 — regional erosion in the period from the Late Devonian to the Early Carboniferous and the blocking of the pipe by deposits of Middle Carboniferous and Quaternary system. The depth of regional erosion practically coincides with the estimated height of the eroded bell, equal to 92 m. For the Pionerskaya and Grib pipes, the estimated heights of the erosion bell are 92 and 103 m, respectively. The subsidence of their bases with amplitude of 212–223 m was required to accumulate crater deposits. During the phases of sharp subsidence the collapse of the walls of the crater leads to the formation of coarse deposits and «reefs». After the completion of gravitational erosion, the maar crater switches to the planar erosion mode with the accumulation of fine clastic and chemogenic lake sediments. The causes of subsidence could be the outflow of degassed magma down the crater, ejection of pyroclastic, and compaction of tuff-sedimentary material in the crater.

Key words: kimberlite; Arkhangelskaya pipe; crater deposits; erosion funnel.

В 2004–2014 гг. авторы изучали геологическое строение Зимнебережного алмазодобного района и систематически документировали стенки опытно-промышленного карьера трубки Архангельская. Сделанные наблюдения позволили составить представление о формировании и последующей эрозии кратерной части данной трубки. В статье приведена количественная оценка объёмов и амплитуд кратерного проседания, осадконакопления и эрозионных процессов по трубке Архангельская, выполненная на основе оригинальных геометрических построений. Такие реконструкции могут быть полезными для понимания происхождения ближних и дальних алмазных россыпей, в поисках и разведке коренных месторождений алмазов [6, 7, 9, 10].

Кимберлиты трубки Архангельская, как и все другие кимберлитовые тела Зимнебережного района, прорывают терригенные породы падунской свиты верхнего венда—нижнего кембрия и перекрыты горизонтально залегающей терригенно-карбонатной толщей карбона—перми и рыхлыми четвертичными отложениями. Радиологические датировки в интервале 375–380 (±2) млн. лет указывают на позднедевонский возраст кимберлитов [3–5]. Последующая региональная эрозия трубчатых завершилась до их захоронения песками и доломитами урзугской свиты среднего карбона.

Важной задачей является определение уровня древнего эрозионного среза кимберлитовых тру-

бок, который можно оценить по результатам детальных наблюдений в карьере по трубке Архангельская.

Строение кратера трубки Архангельская иллюстрирует схематический разрез, построенный по данным детальной разведки и наблюдениям в карьере (рис. 1). Вмещающая толща венда представлена мелкообломочными красноцветными породами золотицкой подсвиты. В её разрезе выделяются пять ритмопачек (z_1 — z_5). Особенностью толщи является контрастное переслаивание пластов прочных пород (песчаников и алевролитов с карбонатным цементом) и слабо сцементированных кварцевых песков и пластичных глин. Вмещающие породы послужили источником терригенного материала в кратерных отложениях. Прочные и пластичные породы содержатся в этих отложениях в виде крупных обломков, а рыхлые пески стали источником зёрен обломочного кварца. Мнение о ксеногенном терригенном источнике кварца в кратерных отложениях выражено разными авторами [5, 8].

Кратерные отложения залегают на автолитовой кимберлитовой брекчии. В разрезе кратера выделяются три пачки. Нижняя пачка средней мощностью 27 м представлена кварцевыми песчаниками с примесью кимберлитового материала в объёме не более 1%.

Средняя пачка мощностью 67 м сложена туфами, туффитами и туфопесчаниками. Доля туфово-

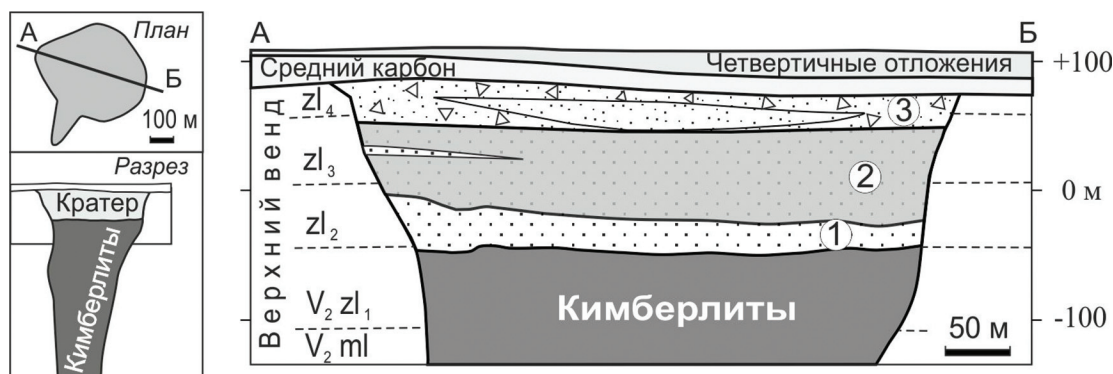


Рис. 1. Разрез кимберлитовой трубки Архангельская (сверху вниз): *перекрывающие отложения*: четвертичные — пески, гравелиты, суглинки; средний карбон — пески с прослоями доломитов; *кратерные отложения*: верхняя пачка (3) — туфопесчаники с обломками вмещающих пород венда; средняя пачка (2) — туффы и туфы; нижняя пачка (1) — песчаники; *кимберлиты* (автолитовая брекчия); *вмещающие породы*: верхний венд, золотицкая толща (V_2zl — четыре пачки) — чередование песчаников, алевролитов и аргиллитов; мельская толща (V_2ml) — аргиллиты с прослоями песчаников

го материала в этой пачке составляет около 50 %, остальное — это терригенный кварц и мелкие обломки вендских пород.

Верхняя пачка средней мощностью 33 м сложена туфопесчаниками, насыщенными обломками вендских пород вплоть до глыб размером один и более метров (рис. 2). Характерно, что в глыбах глинистых пород встречаются вязкопластичные оползневые деформации, указывающие на лавинную седиментацию в связи с обрушением крупных фрагментов вмещающих пород. Присутствие горизонта, насыщенного крупными обломками и глыбами вмещающих кратер пород, указывает на катастрофичность обрушения, вероятно, обусловленного сильными землетрясениями и взрывами, сопровождавшими формирование кратера. Туфовый материал в верхней пачке занимает около 5% объема. В самом верху пачки наблюдались линзы алевроаргиллитов озерной фации, которые указывают на завершенность грубообломочного разреза кратера и его сохранность от последующей эрозии [1].

Стенки кратера имеют крутое падение под углами 65—90°. На западе карьера в самом верху трубки задокументирован резкий перегиб вертикального контакта кратера в пологий с углом около 33° (рис. 3). Очевидно, что пологий контакт является сохранившимся фрагментом эрозионного раструба кимберлитового кратера, а угол 33° равен углу естественного гравитационного откоса крупного песка.

В основу дальнейших реконструкций и расчётов положено допущение о том, что объём эродированных в пределах раструба вмещающих пород равен объёму терригенного материала, содержащегося в кратере.

Профиль раструба до и после эрозии реконструирован на разрезе (рис. 4-1). Его очерчивают линии: палеоповерхности — EC , продолжения жерла — AC и эрозии — AE . Линия AE с начальным углом наклона 33° выполаживается вверх за счёт смены режима гравитационного обрушения вмещающих пород плоскостным смывом. Эродиро-

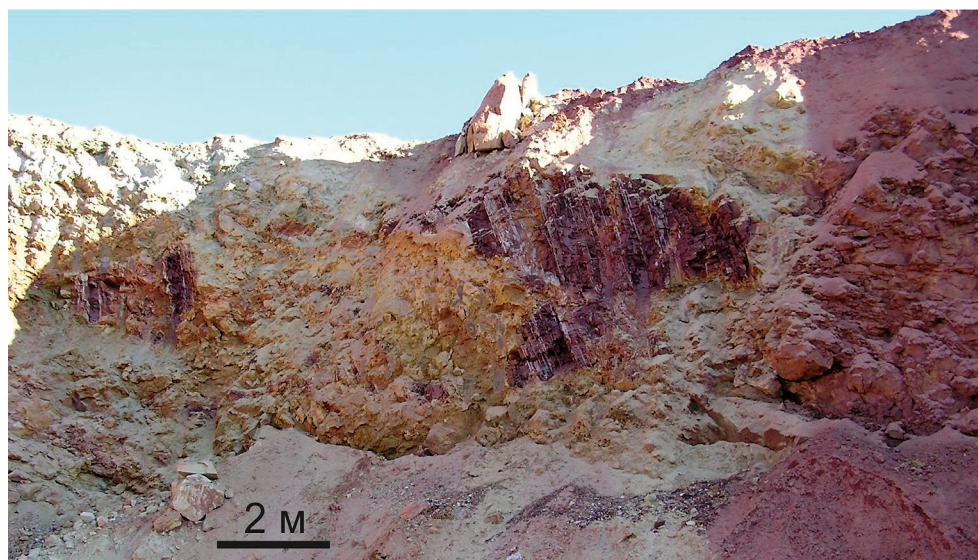


Рис. 2. Крупные глыбы слоистых вендских пород в кратерных отложениях трубки Архангельская (фото северного уступа с абсолютной отметкой основания +76 м, август 2006 г.)

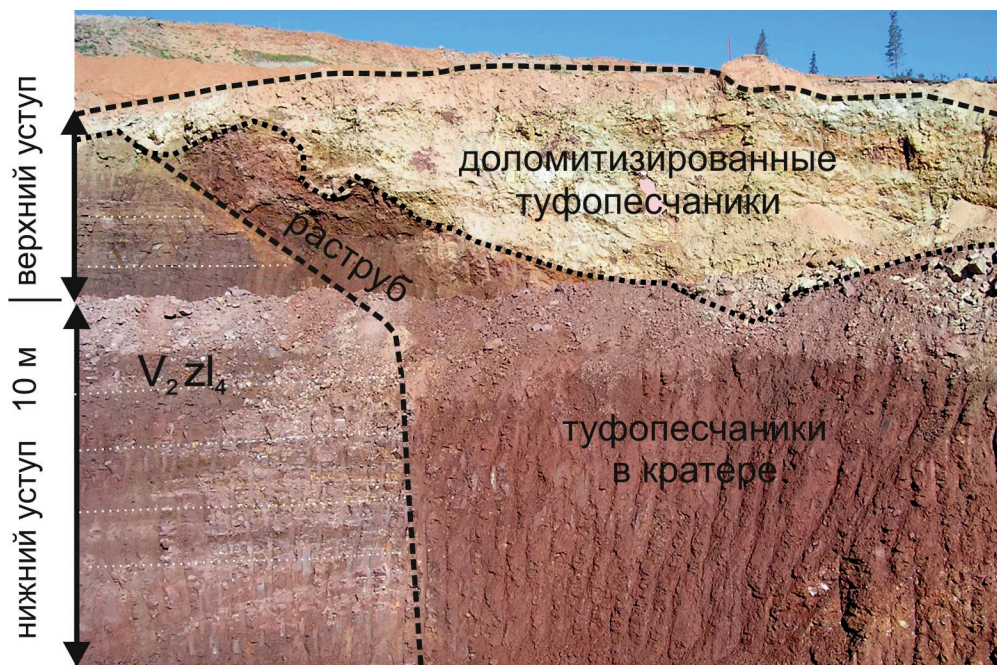


Рис. 3. Западная стенка карьера трубки Архангельская (фото август 2006 г.): в центре — резкий перегиб вертикального контакта кратера с переходом в пологий эрозионный раструб; справа — кратерные туфопесчаники, доломитизированные вверх; слева — вмещающие песчаники и алевролиты венда (четвертая пачка золотицкой толщи V_2zl_4).

ванную кромку ACE аппроксимирует равный по площади прямоугольный треугольник ABD , в котором AB — высота h , BD — ширина, равная $h/\text{tg}33^\circ = 1,54h$. На современной поверхности эмпирическая площадь трубки составляет $S = 150000 \text{ м}^2$ (рис. 4–2). Эту площадь аппроксимирует круг с радиусом $r = \sqrt{S/\pi} = 219 \text{ м}$, где число $\pi = 3,14$.

Итак, эродированная кромка вендского цоколя объёмно представлена кольцевой в плане формой треугольного сечения высотой h и внутренним радиусом $r = 219 \text{ м}$. Объём такого кольца вычисляется вычитанием из объёма усеченного конуса $V_1 = 1/3\pi h(R^2 + R \cdot r + r^2)$ объёма внутреннего цилиндра $V_2 = \pi r^2 h$, где h — общая высота конуса и цилиндра, r — радиус нижнего основания конуса и цилиндра, $R = r + 1,54h$ — радиус верхнего основания конуса. Алгебраическим преобразованием

приходим к формуле объёма кольца: $V = V_1 - V_2 = 4,84rh^2 + 2,48h^3$. Подставляя $r = 219 \text{ м}$, получаем: $V = 1060h^2 + 2,48h^3$.

Объём эродированного терригенного материала может быть рассчитан по параметрам кратерных пачек, приведенным в таблице. По мощности пачек и радиусам, аппроксимирующим их подошву и кровлю, рассчитан объём каждой из трёх пачек по формуле усеченного конуса. Через процентную долю кварца и обломков венда в пачках определяется объём терригенного материала. Суммарно по трём пачкам он составляет 10,8 млн. м^3 . Такой объём мог быть обеспечен эрозией кольца высотой 92 м, что следует из уравнения: $1060h^2 + 2,48h^3 = 1060 \cdot 922 + 2,48 \cdot 923 = 10,9 \text{ млн. м}^3$.

Опираясь на параметры трёх кратерных пачек и функциональную зависимость в балансе объёмов,

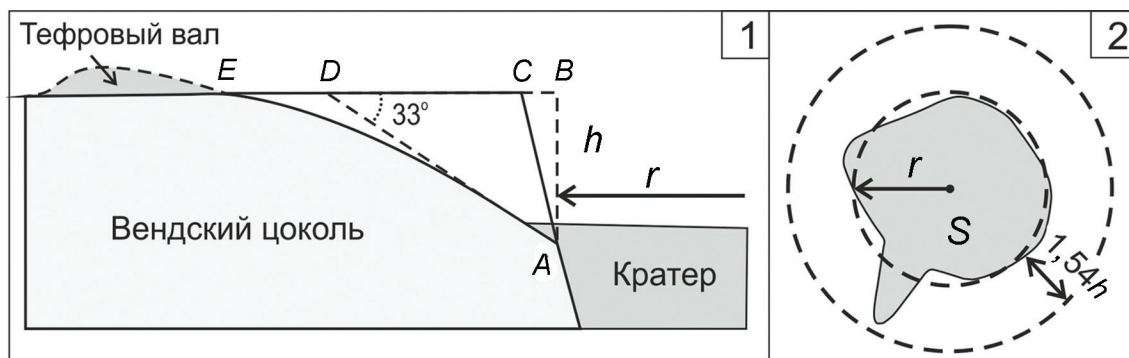


Рис. 4. Реконструкция эрозионного раструба трубки Архангельская: на разрезе (1): AC — линия жерла; AE — линия эрозии; угол $ADB = 33^\circ$; ACE — эродированная кромка вмещающего цоколя; ABD — аппроксимирующий её треугольник, в котором высота $AB = h$, ширина $BD = h/\text{tg}33^\circ = 1,54h$; на плане (2): $S = 150000 \text{ м}^2$ — эмпирическая площадь поверхности трубки (серое); $r = 219 \text{ м}$ — радиус аппроксимирующего круга; внешний край раструба — круг радиусом $R = r + 1,54h$

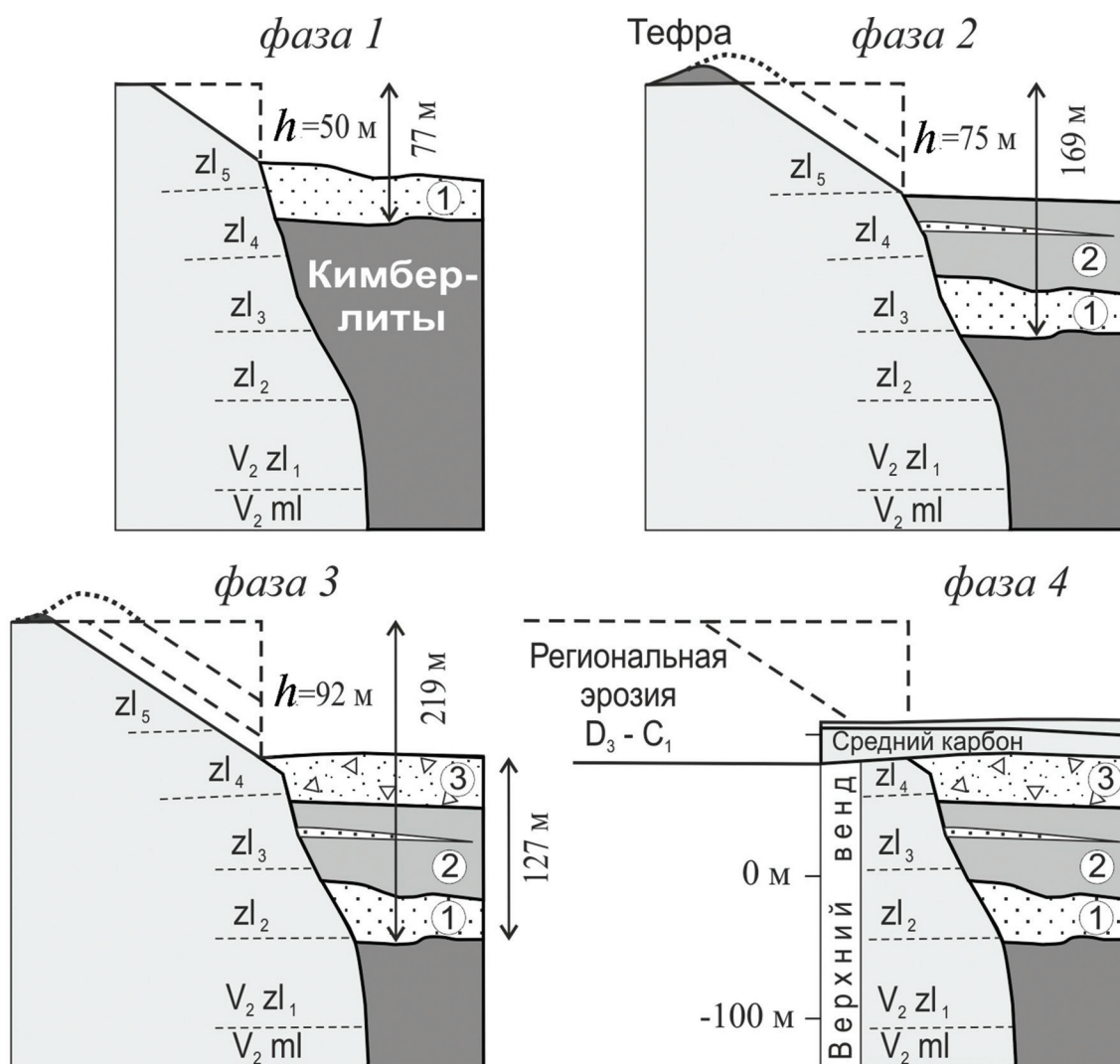


Рис. 5. Последовательность формирования кратерных отложений трубки Архангельская (пояснения в тексте)

можно выполнить реконструкцию отдельных фаз формирования маар-кратера трубки Архангельская. Реконструкция показана на рис. 5. В фазу инъекции кимберлитовая магма и пирокластика заполнили жерло вулкана до выхода на дневную палео-поверхность. Вулканические покровы заметной мощности в зоне раструба не формировались. Этим можно объяснить ничтожную долю кимберлитового материала (1%), участвовавшего в накоплении нижней песчанниковой пачки.

Фаза 1 соответствует моменту после накопления пачки 1. Расчёт показывает (таблица, строка 4), что образование пачки песчанников мощностью 27 м и объёмом 2,57 млн. м³ обеспечивается эрозией вендского цоколя в кольцевом раструбе высотой 50 м с проседанием подшвы кратера амплитудой 27+50 = 77 м.

Фаза 2 (после накопления пачки 2). Туфотерригенная средняя пачка мощностью 67 м формировалась в условиях повторной вулканической активности. В начале фазы вокруг кратера образовался тефровый кольцевой вал. Эрозия тефры и подстилающего вендского цоколя обеспечила образование

смешанных туфотерригенных отложений. Объём терригенного материала по сумме пачек 1 и 2 составляет 2,57 + 3,90 = 6,47 млн. м³. Для его накопления расчётная высота эрозионного кольца составляет 75 м (таблица, строка 3). Суммарная амплитуда проседания (27 + 67) + 75 = 169 м.

Фаза 3 соответствовала времени после накопления пачки 3 мощностью 33 м. Объём терригенного материала по сумме трёх пачек равен 2,57 + 3,90 + 4,32 = 10,8 млн. м³. Для его накопления расчётная высота эрозионного кольца составляет 92 м (таблица, строка 1). Суммарная амплитуда проседания достигает (27 + 67 + 33) + 92 = 219 м.

Фаза 4 отражает современную геологическую ситуацию. К ней привели региональная эрозия в период от позднего девона до раннего карбона и перекрытие трубки отложениями среднего карбона и четвертичной системы. Глубина региональной эрозии практически совпадает с расчётной высотой эродированного раструба, равной 92 м.

Особенностью кратерных отложений трубки Архангельская является присутствие в них обломоч-

Параметры кратерных отложений кимберлитовых трубок Зимнебережного района

Трубки			Площадь поверхности	Радиус поверхности, r	Радиус подошвы	Средняя мощность, m	Объём кратера	Кварц и обломки пород венда в кратере		Формула объёма эрозионного кольца, $4,84rh^2+2,48h^3$	Высота кольца, h	Проседание подошвы кратера, $m+h$
			тыс. м ²	м	м	м	млн. м ³	доля %	млн. м ³	м ³	м	м
1	Архангельская	всего	150	219		127	14,6		10,8	$1060h^2+2,48h^3$	92	219
2		пачка 3	150	219	200	33	4,55	95	4,32			
3		пачка 2		200	185	67	7,80	50	3,90	$968h^2+2,48h^3$	75	169
4		пачка 1		185	165	27	2,60	99	2,57	$895h^2+2,48h^3$	50	77
5	Пионерская		330	324	210	120	27,3	70	19,1	$1568h^2+2,48h^3$	103	223
6	им. Гриба		163	228	184	120	16,1	70	11,2	$1104h^2+2,48h^3$	92	212
7	Юрасская (494а)		67	146	80	45	1,86	70	1,30	$387h^2+2,48h^3$	50	
8	Суксома (772)		1800	757	580	250	353	70	247	$3664h^2+2,48h^3$	240	490

ного кварца более крупного размера (до 0,5—2 мм), чем зёрна кварца во вмещающих песчаниках золотичкой толщи (примерно до 0,2 мм) [4]. На участке трубки разрез толщи нами расчленяется на четыре тонкообломочные ритмопачки. К востоку от трубки разрез наращивается пятой пачкой, сложенной более крупнозернистыми песками. Судя по реконструкции, отложения этой пачки как раз и попадали в эрозионный раструб при заполнении кратера (рис. 5).

В Зимнебережном алмазоносном районе кратерные фации многих трубок эродированы до уровня диатрем, сложенных ксенотуфобрекциями и интрузивными кимберлитами. В ряде случаев имеются в разной степени эродированные кратеры. Признаками наиболее полного разреза кратерных отложений, помимо трубки Архангельская, обладают трубки Пионерская, имени Гриба, Юрасская (494а), Суксома (772) и 721.

Параметры кратерных отложений трубок приведены в таблице. Они измерены на планах и разрезах детальной разведки. В числе параметров: площадь поверхности трубки (кратера), аппроксимирующие радиусы поверхности и подошвы кратера, средняя мощность отложений, объём кратера, оцененный по формуле усеченного конуса. В расчётах доля терригенного кварца и обломков пород венда принята 70%, как это установлено в трубках Архангельская и имени Гриба. Применительно к каждой трубке приведена формула объёма эрозионного кольца и рассчитанная по ней его высота.

Расчётные значения высот эрозионных колец оказались близкими для разных трубок: Архангельская 92 м, Пионерская 103 м, имени Гриба 92 м. В небольшой трубке Юрасская с кратерными отложениями мощностью 45 м сохранился раструб с пологими углами наклона 20—33° и высотой около 30 м. Эта высота немного меньше расчётного значения 50 м, что указывает на незначительный эрозионный срез трубки (50—30 = 20 м). Отсутствие раструбов у трубок означает их большую эродированность.

В восточной части Зимнебережного района в кимберлитовых трубках в виде обломков и крупных оползневых блоков («рифов») встречаются пестроцветные глинисто-карбонатные породы, отсутствующие в современном коренном залегании. По находкам фауны они датируются кембрием—ордовиком [8]. Такой «риф» размером по вертикали до 170 м и шириной до 80 м вскрыт скважинами в трубке Горелая вдоль вертикального контакта кимберлитовой ксенотуфобрекцией с вмещающими красноцветными породами венда. На востоке района в крупной трубке Суксома мощность кратерных отложений достигает 250 м. Такая мощность могла быть обеспечена эрозией в раструбе-кольце расчётной высотой 240 м (таблица, строка 8). Следовательно, кембрий-ордовикские породы меньшей мощности вполне могли входить в разрез вмещающей толщи во время образования кимберлитов.

Приведённые количественные реконструкции позволяют заключить следующее.

Кимберлитовые трубки Зимнебережного района в кратерных туфогенно-осадочных отложениях содержат значительное количество материала вмещающих терригенных пород в виде обломочного кварца и литокластов. Для трубок с полным разрезом кратерных отложений предложена методика расчёта высоты кольцевого раструба, эрозия которого могла обеспечить накопление в кратере имеющегося там объёма терригенного материала. Профиль эрозионного кольца аппроксимируется прямоугольным треугольником с углом наклона 33°. Такой угол зафиксирован в карьере трубки Архангельская, как соответствующий углу естественного откоса крупного песка.

Позднедевонские трубки Архангельская, Пионерская, имени Гриба имеют кратерные отложения мощностью 120—127 м. Расчётная высота эрозионных раструбов-колец составляет 92—103 м. Раструбы трубок эродированы на этапе денудации в период до среднего карбона. Крупная трубка Суксома на востоке района выделяется кратером

мощностью около 250 м и высотой эродированного раструба не менее 240 м.

Для накопления в трубках мощных кратерных отложений требуется значительное проседание подошвы кратеров. Расчётная амплитуда проседания составляет 212—223 м, а в трубке Суксома до 490 м. В фазы резкого проседания гравитационное обрушение крутопадающих стенок жерла приводит к образованию крупноглыбовых отложений и «рифов». После завершения гравитационной эрозии маар-кратер переходит в режим плоскостного размыва с накоплением тонкообломочных и хемогенных озёрных осадков.

Причинами проседания кратерных отложений могли быть: постэруптивный отток дегазированной магмы вниз по жерлу, выброс из жерла пирок-

ластики, уплотнение туфоосадочного материала в кратере. Период формирования кратерных отложений должен быть скоротечным — до затвердевания магмы, которое блокирует дальнейшее проседание отложений в коническом жерле.

Большинство трубок Зимнебережного района в современном залегании на поверхности представлено интрузивными кимберлитами [2, 4]. Скорее всего, это обусловлено небольшой амплитудой проседания в жерлах с последующей эрозией мало-мощных кратеров.

Авторы выражают благодарность геологам филиала АК «АЛРОСА» в г. Архангельске «Алроса-Поморье» и ПАО «Севералмаз» за содействие в изучении карьера трубки Архангельская и использование других материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- Игнатов П.А., Болонин А.В., Васильев И.Д., Фомин А.А., Ким В. Контакты кимберлитовой трубки Архангельская и деформации вмещающих и перекрывающих пород // Известия вузов. Геология и разведка. 2009. № 5. С. 28—34.
- Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. Архангельск: ОАО «Правда Севера». 2004. 283 с.
- Ларионова Ю.О., Сазонова Л.В., Лебедева Н.М., Носова А.А., Третьяченко В.В., Травин А.В., Каргин А.В., Юдин Д.С. Возраст кимберлитов Архангельской провинции: Rb-Sr, ⁴⁰Ar/³⁹Ar изотопно-геохронологические и минералогические данные для флогопита // Петрология. 2016. Т. 24. № 6. С. 607—639.
- Ларченко В.А., Минченко Г.В., Степанов В.П., Кечик И.А. Алмазоносность кимберлитов и родственных им пород Зимнего берега // Вестник Воронеж. ун-та. Геология. 2004. № 2. С. 134—147.
- Махоткин И., Роби Д., Курслэукис С., Валуев Е., Пылаев Н. Возраст и модель образования трубок Ломоносовского месторождения алмазов. Архангельская область, Северо-Запад России // Тр. конференции «MINEX FORUM Северо-Запад 2007». Петрозаводск, 2007. С. 32—39.
- Подчасов В.М., Минорин В.Г., Богатых И.Я. и др. Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки коренных месторождений алмазов. Книга 1. Коренные месторождения. Якутск: ЯФ ГУ «Издательство СО РАН», 2004. 548 с.
- Подчасов В.М., Минорин В.Г., Богатых И.Я. и др. Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки месторождений алмазов. Книга 2. Россыпные месторождения. Якутск: ЯФ ГУ «Издательство СО РАН». 2004. 424 с.
- Толмачёва Т.Ю., Алексеев А.С., Реймерс А.Н., Ларченко В.А., Гунин А.П. Ордовикские конодонты в ксенолитах кимберлитовых трубок Юго-Восточного Беломорья // Палеострат-2008. Годичное собрание секции палеонтологии МОИП и Московского отделения палеонтологического общества. Москва, 28—29 января 2008 г. Тезисы докладов. Москва, 2008. С. 55—58.
- Scott Smith B.H. Canadian kimberlites: Geological characteristics relevant to emplacement // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2008. V. № 174. P. 9—19.
- Wilson L., Head J. W. Kimberlite ascent and eruption // Nature, 2007. V. № 447. P. 53—57.

REFERENCES

- Ignatov P.A., Bolonin A.V., Vasilyev I.D., Fomin A.A., Kim V. Kontakty kimmerlitovoi trubki Arkhangel'skaya i deformatsii vmeshchayushchikh i perekryvayushchikh porod [Contacts of Arkhangel'skaya kimberlite pipe and deformations of enclosing and overlying rocks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2009, no. 5, pp. 28—34. (In Russian)
- Kutinov Y., Chistova Z., Rank row of the alkali-ultrabasic magmatic Arkhangel'sk diamondiferous province. Reflect in the geological-geophysical data, Arkhangel'sk. *OAO «Pravda Severa»*. 2004, pp. 283. (In Russian)
- Larionova Y.O., Sazonova L.V., Lebedeva N.M., Nosova A.A., Kargin A.V., Tret'yachenko V.V., Travin A.V., Yudin D.S. Kimberlite age in the Arkhangel'sk Province, Russia: Isotopic geochronologic Rb—Sr and ⁴⁰Ar/³⁹Ar and mineralogical data on phlogopite. *Petrology*, 2016, vol. 24, no. 6, pp. 562—593. (In Russian)
- Larchenko V., Minchenko G., Stepanov V., Kechik Y. Diamondiferous kimberlite and conglomeric rock in Zimnt bereg. *Vestnik Voronezh. un. Geology*, 2004, no 2, pp. 134—147. (In Russian)
- Makhotkin I., Robi D., Kurszlaukis S., Valuyev Ye., Pylayev N. Vozrast i model' obrazovaniya trubok Lomonosovskogo mestorozhdeniya almazov. Arkhangel'skaya oblast', Severo-Zapad Rossii. [Age and model of the formation of pipes of the Lomonosov diamond deposit. Arkhangel'sk region, North-West Russia]. *Trudy konferentsii «MINEX FORUM Severo-Zapad 2007»* [Proc. Symp. «MINEX FORUM Northwest-2007»]. Petrozavodsk, 2007, pp. 32—39. (In Russian)
- Podchasov V., Minorin V., Bogatyh Y. et all. *Geology, prognoz, metod of prospecting, estimate and exploration root diamond deposits. Book 1. Root deposits*. Yakutsk, «Publish IaF SO RAN», 2004, 548 p. (In Russian)
- Podchasov V., Minorin V., Bogatyh Y. et all. *Geology, prognoze, metods of prospecting, estimate and exploration diamond deposits. Book 2. Placer deposits*. Yakutsk, «Publish IaF SO RAN», 2004, 424 p. (In Russian)
- Tolmachova T.Y., Alekseyev A.S., Reymers A.N., Larchenko V.A., Gunin A.P. Ordovikskie konodonty v ksenolitakh kimmerlitovykh trubok Yugo-Vostochnogo Belomor'ya [Ordovician conodonts in xenoliths of kimberlite pipes of the South-Eastern Belomor'ye]. *Paleostrat-2008. Godichnoye sobraniye sekcii paleontologii MOIP i Moskovskogo otdeleniya paleontologicheskogo obshchestva* [Annual meeting of the paleontology section of MSN and the Moscow branch of the Paleontological Society]. Moscow, 28—29 January, 2008, Thesis of reports, Moscow, 2008, pp. 55—58. (In Russian)
- Scott Smith B.H. Canadian kimberlites: Geological characteristics relevant to emplacement. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, no 174, pp. 9—19.
- Wilson L., Head J. W. Kimberlite ascent and eruption. *Nature*, 2007, no. 447, pp. 53—57.

ЛИТОФАЦИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ПРОДУКТИВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МОШАКОВСКОЙ СВИТЫ ЮГО-ЗАПАДА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ*

О.А. АНТИПОВА, О.В. ПОСТНИКОВА, В.С. ЯКУШЕВ, Л.В. МИЛОСЕРДОВА

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
65, Ленинский просп. г. Москва 119991, Россия
e-mail: oa_antipova95@mail.ru

Перспективы нефтегазоносности юго-запада Сибирской платформы во многом связаны с вендскими природными резервуарами. Одним из самых перспективных объектов являются отложения тасеевской серии, включающие терригенные отложения мошакловской свиты, широко развитые по периферии Байкитской антеклизы и прилегающим территориям. В отложениях тасеевской серии открыты залежи газа на Абаканском, Имбинском, Ильбокичском месторождениях. Терригенные отложения мошакловской свиты венда Ангарской зоны складок сформировались в условиях разных зон приливно-отливной равнины. Отложения имеют циклическое строение с регрессивной в нижней части и регрессивно-трансгрессивной направленностью циклитов в верхней. Нижние части регрессивных циклитов представлены алевро-глинистыми породами, которые вверх по разрезу сменяются более грубозернистыми. Верхние части этих циклитов сложены преимущественно песчаными разностями, в которых выявлены многочисленные следы роющих организмов, в частности, крупные формы *Skolithos*. Регрессивно-трансгрессивные циклиты имеют несколько иное строение. В нижней части циклита залегают аргиллиты алевролитистые, которые вверх по разрезу сменяются смешанными сульфатно-карбонатно-глинистыми породами. В средней части циклита встречаются тонкие песчаные прослои. Породы-коллекторы мошакловской свиты представлены крупно-, средне- и разномзернистыми песчаниками, обломочная часть в которых сложена кварцем, полевыми шпатами и обломками эффузивных и метаморфических пород. Пустотное пространство относится к межзерновому типу, а также связано с пустотами выщелачивания в зонах растворения карбонатного цемента и полевых шпатов. Породы-коллекторы приурочены к верхним частям регрессивных и средним частям регрессивно-трансгрессивных циклитов. Фильтрационно-ёмкостные свойства пород определяются не только их фациальной принадлежностью, но и в значительной степени интенсивностью и направленностью вторичных процессов, в том числе трещиноватостью.

Ключевые слова: породы-коллекторы; венд; приливно-отливная равнина; зона Ангарских складок; Сибирская платформа.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-4-44-49

LITHOFACIAL MODELS OF PRODUCTIVE DEPOSITS OF THE MOSHAKOV FORMATION WITHIN THE SOUTHWESTEN PART OF THE SIBERIAN PLATFORM

O.A. ANTIPOVA, O.V. POSTNIKOVA, V.S. YAKUSHEV, L.V. MILOSERDOVA

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
building 1, 65, Leninsky prosp., Moscow 119991, Russia
e-mail: oa_antipova95@mail.ru

The oil and gas potential of the south-western part of the Siberian platform is related mainly to the Vendian reservoir rocks. One of the most prospective objects are the deposits of Taseeva series, which include clastic deposits of the Moshakov formation. These deposits are widely developed along the periphery of the Baykit anticline and adjacent territories. Gas deposits were discovered at the Abakan, Imbinskoe and Ilbokichskoye fields in deposits of Taseeva group. The Vendian terrigenous deposits of the Moshakov formation within the Angara folded zone formed in the environment of different zones of the tidal plain. The deposits have a cyclical structure with a regressive orientation of the sedimentary cyclites in the lower part and a regressive-transgressive one in the upper part. The lower parts of the regressive cyclites are represented by silty clay rocks, which are replaced up in the section by more coarse grained ones. The upper parts of the cyclite are built mostly by the sandy variations. Numerous traces of burrowing organisms have been identified in the rocks, in particular, large forms of *Skolithos*. Regressive-transgressive cyclites have a slightly different structure. Silty argillites occur in the lower part of the cyclite, which are replaced upwards along the section by mixed sulphate-carbonate-clay rocks. In the middle part of the cyclite there are thin sandy interbeds. The reservoir rocks are represented by coarse, medium and differently grained sandstones. The clastic part of sandstones is composed of quartz, feldspars and fragments of volcanic and metamorphic rocks. Void space refers to the intergranular type and is also associated with leaching voids in the zones of dissolution of carbonate cement and feldspars. The reservoir rocks are confined to the upper parts of the regressive and middle parts of the regressive-transgressive cyclites formed in the conditions of the sandy covers of the tidal plain. Reservoir properties of rocks are determined not only by their facies but also to a large extent by the intensity and direction of secondary transformations including fracturing.

Keywords: reservoir rocks; Vendian; tidal plain; Angara folded zone; Siberian platform.

Вендские продуктивные отложения тасеевской серии распространены в пределах юго-западной части Сибирской платформы и представляют собой один из наиболее перспективных объектов для открытия месторождений газа и газового конденсата. К настоящему времени в пределах исследуемого региона в отложениях тасеевской серии были выявлены крупные месторождения, как Абаканское, Имбинское, Ильбокичское и др.

Фактический материал и методы исследований

Фактический материал включал в себя керновый материал по 15 скважинам глубокого бурения (общим объемом около 1400 м), данные ГИС по 15 скважинам, 750 петрографических шлифов; результаты петрофизических исследований (более 700 измерений пористости и проницаемости), а также результаты петрофизических исследований. Экспериментальные исследования проводились с использованием поляризационного микроскопа Axio Imager A2m Carl Zeiss и стереомикроскопа Carl Zeiss Micro Imaging GmbH; исследования минерального состава пород-коллекторов — на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6610LV с приставкой для микроанализа OXFORD INSTRUMENTS IE350-IW500-HKL; определение элементного состава пород — с помощью энергодисперсионного спектрометра. Морфометрические характеристики пустотного пространства были получены по результатам имидж-анализа цифровых изображений шлифов с применением специализированного программного обеспечения AxioVision, исследование морфометрических характеристик пустотного пространства литотипов пород-коллекторов — с помощью рентгеновского контроля и 3D реконструкции DeskTom 130.

Постановка проблемы

В тектоническом отношении район исследований расположен в пределах зоны Ангарских складок, Богучано-Манзинского выступа и склона Байкитской антеклизы (юго-западная окраина Сибирской платформы) [2] (рис. 1).

Мошакловская свита относится к тасеевской серии венда, пестроцветные отложения которой имеют толщины около 1500 м и широко распространены на западе Сибирской платформы. Породы мошакловской свиты завершают разрез тасеевской серии и представлены комплексом гравийно-песчаных, песчаных, алевро-песчаных, алевро-глинистых разностей и смешанных сульфатно-карбонатно-глинистых [1, 3—5, 7].

Текстурные особенности отложений мошакловской свиты весьма разнообразны и изменчивы как по разрезу, так и по площади. Для мошакловской свиты характерно наличие текстур косой, косоволнистой, местами пологоволнистой слоистости,

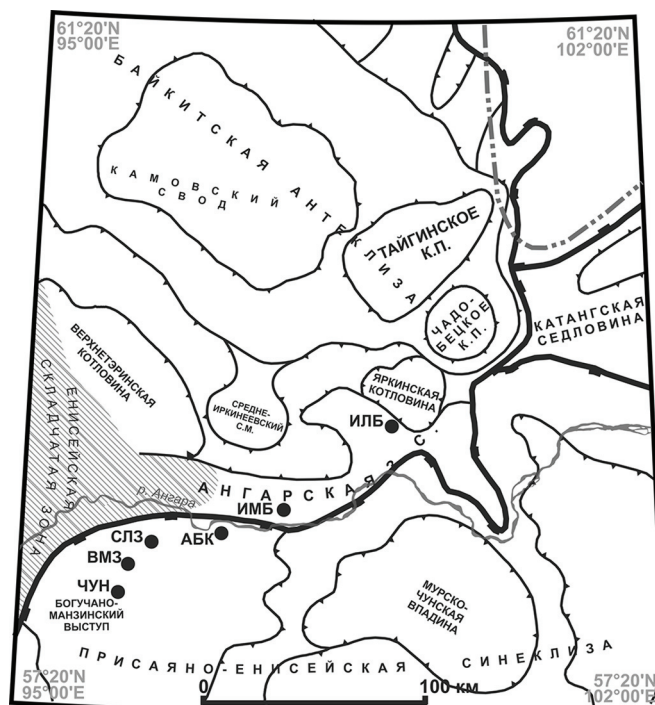


Рис. 1. Район исследований на фрагменте тектонической карты венд-нижнепалеозойского структурного яруса Лено-Тунгусской провинции Сибирской платформы [2]: точки — местоположения скважин, по которым проведены исследования керна: ЧУН — Чунская, ВМЗ — Верхнеманзинская, СЛЗ — Сользаводская, АБК — Абаканская, ИМБ — Имбинская, ИЛБ — Ильбокичская площади)

встречаются текстуры оползания, тонкогоризонтально-слоистые и массивные текстуры. Как правило, в верхней и средней частях разреза присутствуют многочисленные текстуры биотурбации.

В отложениях мошакловской свиты часто отмечаются многочисленные субвертикальные взаимопересекающиеся трещины, реже наклонные. Раскрытость таких трещин составляет в среднем 0,5 см, местами достигает 1,2 см. Трещины соединяют тонкие поровые прослои, образуя при этом сложную фильтрационно-ёмкостную систему. Трещины частично, а участками полностью залечены сидеритом и анкеритом, местами доломитом [6].

Породы-коллекторы отложений мошакловской свиты относятся к поровому и порово-трещинному типам.

Выделенные по комплексу литолого-петрофизических исследований породы-коллекторы порового типа представлены преимущественно песчаниками разно-, крупно-, среднезернистыми, реже мелкозернистыми.

В областях развития интенсивной тектонической раздробленности в отложениях мошакловской свиты развиты породы-коллекторы порово-трещинного типа. Выделенные по комплексу литолого-петрофизических исследований породы-коллекторы порово-трещинного типа представлены преимущественно песчаниками разно-, средне—мелкозернистыми.

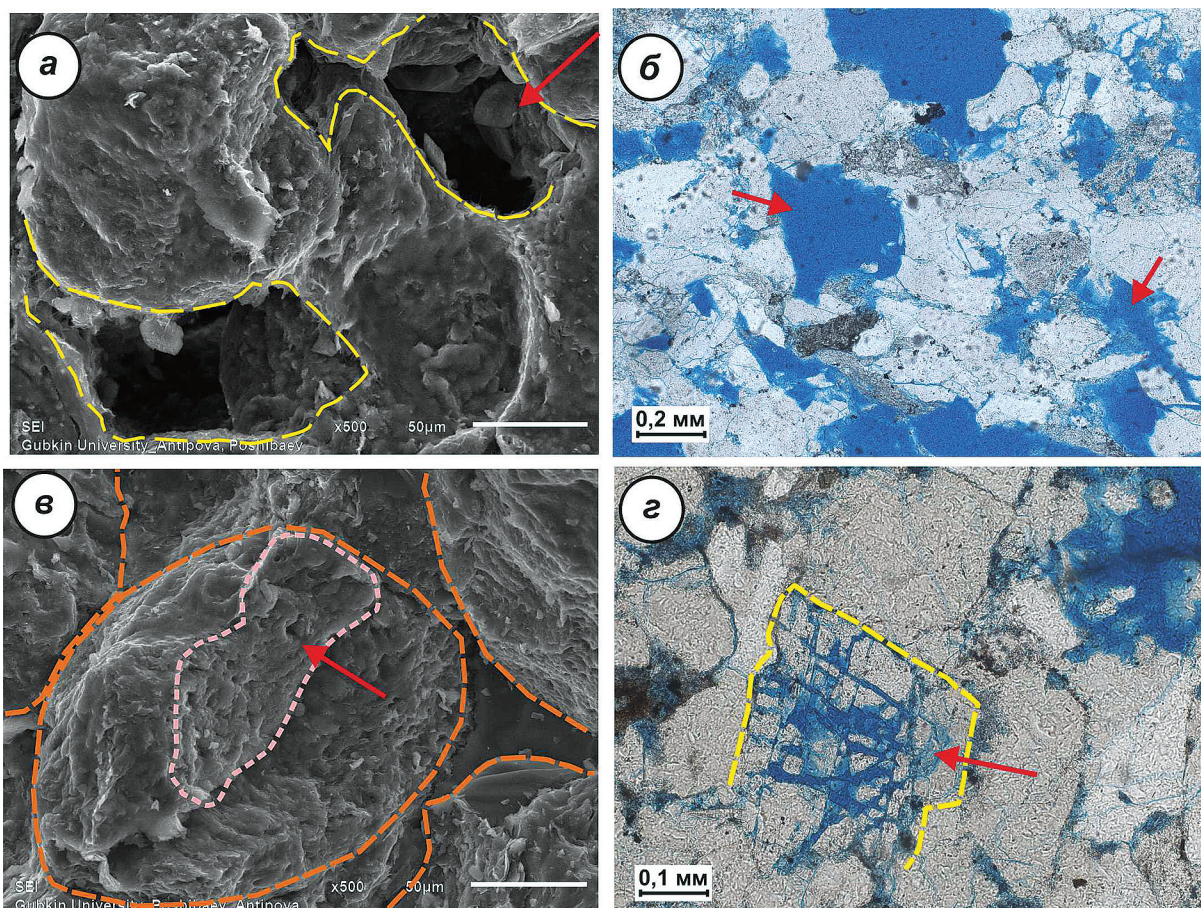


Рис. 2, а — межзерновые пустоты в песчанике (скв. Абаканская 1); б — пустоты выщелачивания по карбонатному цементу (скв. Ильбокичская 3); в — микропустоты в корродированных обломках кварца (скв. Имбинская 4); г — микропустоты в корродированных обломках калиевого полевого шпата (скв. Ильбокичская 3)

Пустотное пространство в коллекторах представлено в основном межзерновыми порами, реже пустотами выщелачивания по карбонатному цементу и микропустотами в корродированных обломках кварца и калиевых полевых шпатов (рис. 2).

Границы межзерновых пустот могут быть извилистыми, а также иметь правильные изометричные формы в участках развития регенерации зёрен. Пустоты выщелачивания, как правило, имеют сложную извилистую форму. Микропустоты в корродированных обломках кварца и калиевых полевых шпатов отмечаются редко, их размеры составляют 1—3 мкм.

По результатам имидж-анализа цифровых изображений шлифов и микротомографии пористость пород-коллекторов мошакской свиты в пределах зоны Ангарских складок (скважина Абаканская 1) колеблется от 5,37 до 11,62%. По результатам микротомографии объём пустот представлен в диапазоне от $13,64 \times 10^{-6}$ до $58,69 \times 10^{-4}$ мм³. Межзерновые поры имеют размеры 0,002—2,250 мм. По результатам петрофизических исследований значения пористости колеблются в диапазоне от 0,37 до 10,76%, а проницаемость не превышает 15,04 мД.

В пределах склона Байкитской антеклизы (скважина Ильбокичская 3) значения пористости

пород-коллекторов мошакской свиты попадают в диапазон от 6,15 до 26,78%. Объём пустот составляет от $3,13 \times 10^{-6}$ до $52,1 \times 10^{-4}$ мм³. Размеры межзерновых пор лежат в диапазоне от 0,072 до 3,770 мм. Значения пористости составляют 0,12—9,15%, а проницаемость не превышает 1,9 мД.

Для прогнозирования зон распространения и свойств пород-коллекторов мошакской свиты был проведен циклостратиграфический анализ этих отложений и определены условия осадконакопления выделенных седиментационных циклитов.

Результаты и обсуждение

Пестроцветные отложения мошакской свиты с постепенным переходом залегают на сероцветных терригенных и терригенно-карбонатных отложениях чистяковской свиты.

Особенности текстурных характеристик, резко различающаяся степень отсортированности и окатанности обломочного материала, обилие следов биотурбации осадка свидетельствуют о формировании отложений мошакской свиты в пределах приливно-отливной равнины (рис. 3).

В разрезе мошакской свиты выделяются четыре срединных циклита. Три нижних цикли-

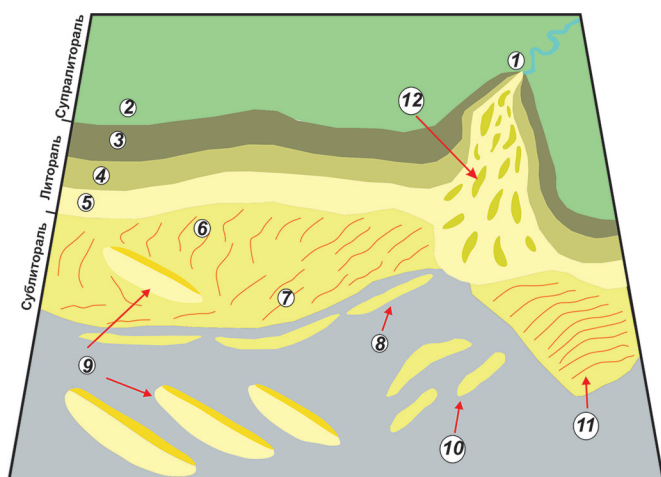


Рис. 3. Условия осадконакопления и распределение песчаных тел в приливо-отливной равнине, по [8] с изменениями: 1 — эстуарий, 2 — супралиторальная зона, 3 — глинистая зона, 4 — песчано-алевроглинистая зона, 5 — песчаная зона, 6 — песчаный покров, 7 — фронтальная часть песчаного покрова, 8 — окаймляющие песчаные тела, 9 — приливо-отливные хребты, 10 — изолированные песчаные тела, 11 — дюнное поле, 12 — бары

та имеют регрессивное строение, а верхний — регрессивно-трансгрессивное (рис. 4).

Цикличность строения разреза обусловлена пульсационным характером движения береговой ли-

нии. Нижние части первого и второго циклитов, сложенные алевроглинистыми породами, видимо, формировались в условиях низкой гидродинамической активности дистальной части приливо-отливной равнины (рис. 5, а). Для пород этой части циклита характерны текстуры горизонтально-слоистые, ритмично-слоистые, со слабыми признаками волновой ряби. Следов биотурбации в нижней части циклита практически не наблюдается (скв. Верхнеманзинская 1). Вверх по разрезу зона осадконакопления перемещается в область развития песчаных покровов. Здесь широко развиты следы биотурбации, в частности, крупные формы *Skolithos* (скв. Абаканская 3) (рис. 5, б) [8].

В отдельных скважинах (скв. Чунская 1) в отложениях верхних частей циклитов отмечаются породы с косослоистыми текстурами, которые сформировались в условиях направленных потоков (рис. 5, в). Возможно, эти отложения характеризуют отдельные протоки в пределах приливо-отливной равнины.

В отложениях нижней части третьего циклита широко развиты текстуры оползания и следы послойного перемещения слабоконсолидированных обломков и взмучивания осадка (скв. Сользавод-

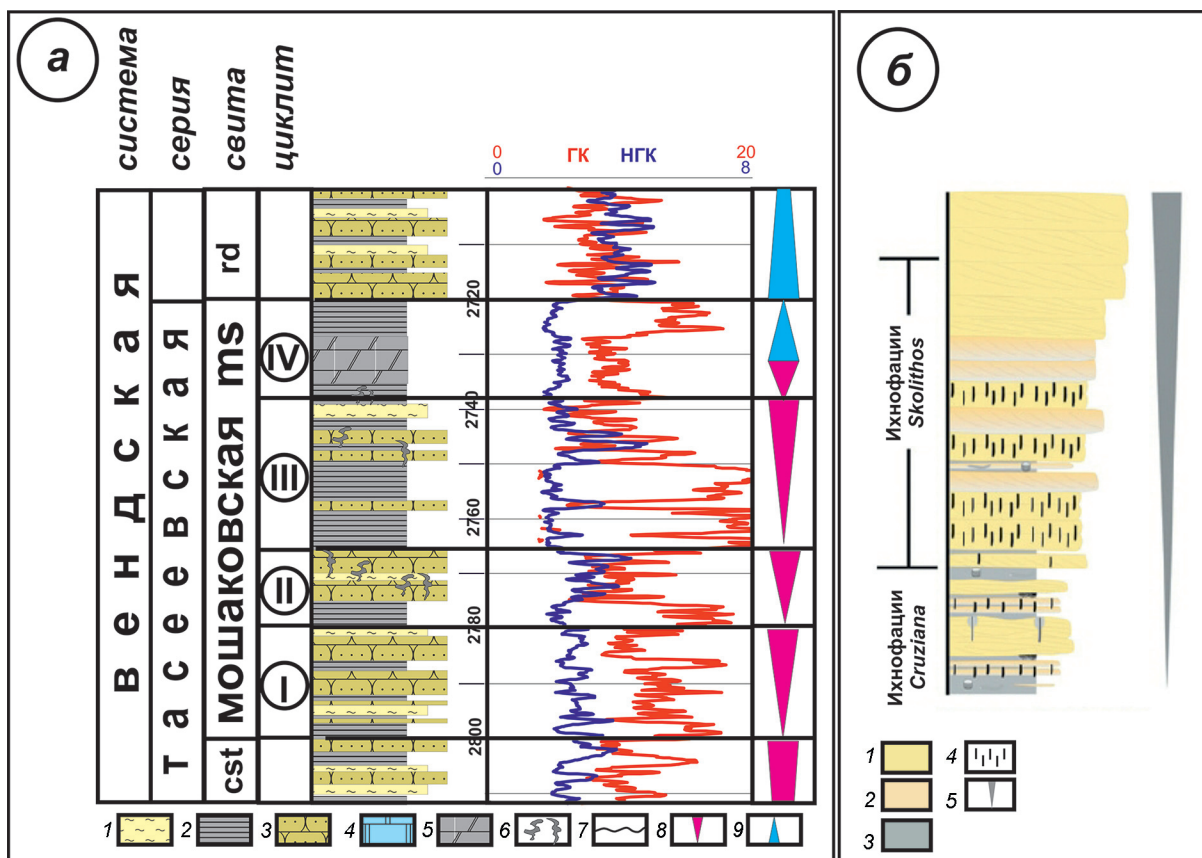


Рис. 4, а — разрез отложений мошакской свиты в пределах зоны Ангарских складок (скв. Абаканская 1): 1 — алевролиты, 2 — аргиллиты, 3 — песчаники, 4 — следы роющих организмов, 5 — предполагаемый перерыв в осадконакоплении, 6 — регрессивный циклит, 7 — трансгрессивный циклит; б — разрез отложений приливо-отливной равнины в зоне развития песчаных покровов, по [8]: 1 — песчаники, 2 — алевролиты, 3 — аргиллиты, 4 — следы роющих организмов, 5 — регрессивный циклит; cst — чистяковская свита, rd — редколесная свита

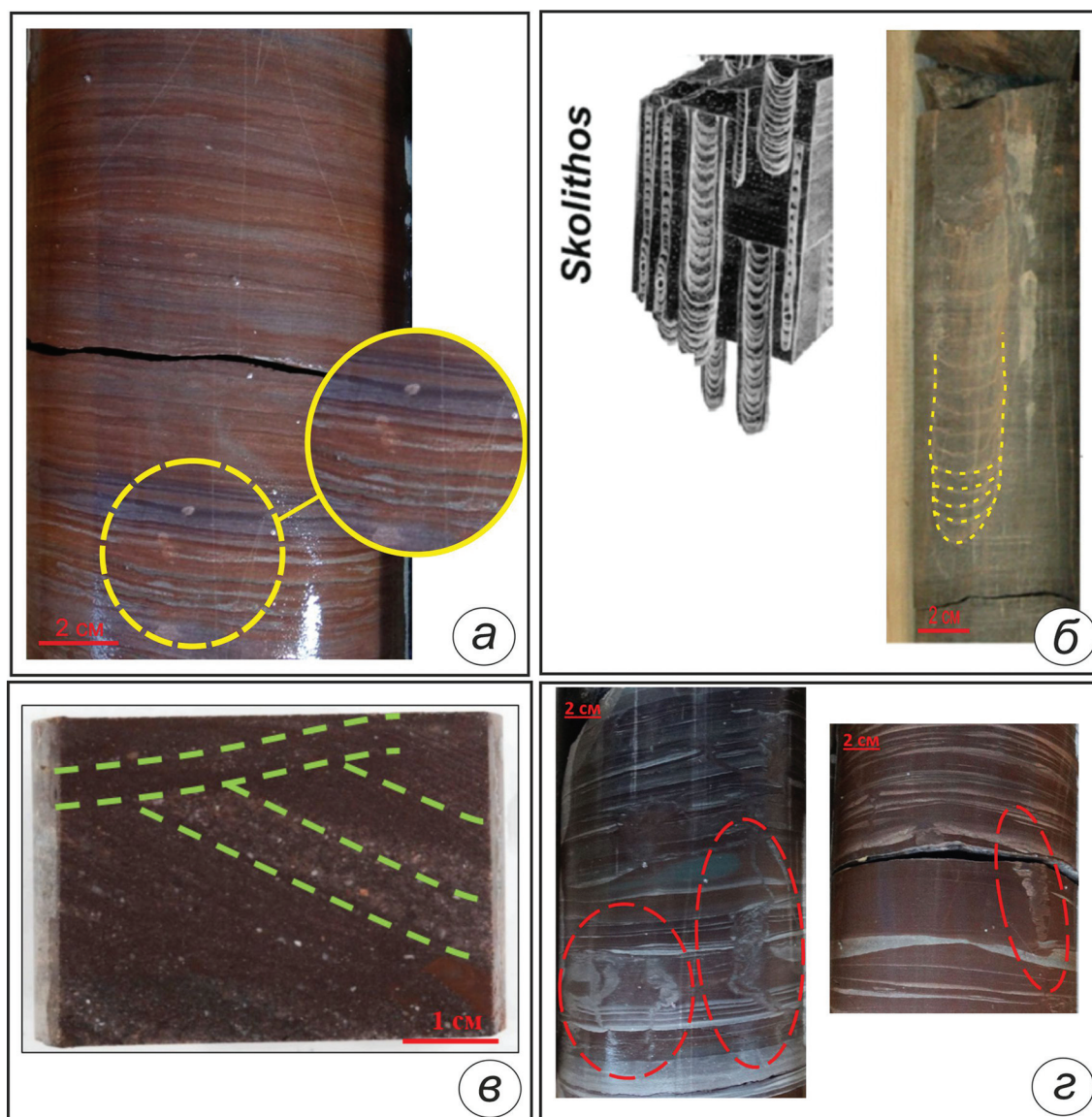


Рис. 5. *а* – отложения мошакской свиты в гидродинамически застойных зонах дистальной части приливо-отливной равнины (скв. Верхнеманзинская 1); *б* – следы роющих организмов *Skolithos* в песчаных покровах приливо-отливной равнины (скв. Абаканская 1); *в* – текстуры срезания и косой слоистости в отложениях мошакской свиты (скв. Чунская 1); *г* – следы роющих организмов (скв. Сользаводская 1)

ская 1). Такие текстуры характерны для глинистой зоны литорали.

В отложениях верхней части циклита развиты породы смешанного сульфатно-карбонатно-глинистого состава (скв. Абаканская 1, Имбинская 4). Они формировались в условиях щелочных прибрежно-морских озер с повышенной солёностью.

Строение четвертого седиментационного циклита мошакской свиты, в отличие от нижележащих циклитов, регрессивно-трансгрессивное.

В основании четвертого циклита залегают смешанные породы со значительным количеством глинистого материала и активно развитыми текстурами биотурбации (рис. 5, *г*). Вверх по разрезу они переходят в аргиллиты тонкослоистые с редкими тонкими прослоями песчаников с отчетливыми следами волновой слоистости.

Если в нижних двух циклитах верхняя часть представлена достаточно крупной пачкой песчаных пород со следами *Skolithos*, то в разрезе четвертого циклита верхняя часть представляет собой переслаивание песчаных и алевроглинистых пород со значительно более мелкими следами биотурбации (скв. Абаканская 1, Сользаводская 1). Для пород этой части разреза характерны параллельно-слоистые, пологоволнисто-слоистые и линзовидно-слоистые, а также шаровые и подушечные текстуры, образование которых типично для застойных зон. В целом формирование отложений верхней части четвертого циклита, видимо, происходило в условиях верхней части литорали, где существовали полуизолированные замкнутые водоёмы с очень спокойным гидродинамическим режимом.

Выводы

Образование отложений мошакской свиты происходило в условиях приливно-отливных равнин с редкими озёрными водоёмами и протоками, которые сформировались после отступления чистяковского морского бассейна. Верхняя часть разреза мошакской свиты несет в себе следы начала мощной трансгрессии вендского бассейна, которая превратила приливно-отливную зону в область мелководного морского бассейна.

Породы-коллекторы, представленные песчаниками разнотекстурными, приурочены к верхним частям первого, второго, третьего циклов и средней части четвертого цикла.

Фильтрационно-ёмкостные свойства пород определяются не только их фациальной принадлежностью, но и в значительной степени интенсивностью и направленностью вторичных процессов, таких как выщелачивание, регенерация, инкорпорация, карбонатизация, сульфатизация, а также трещиноватостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анатольева А.И. Древняя красноцветная терригенно-гематитовая формация на юго-западе Сибирской платформы // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1968. № 5. С. 79–92.
2. Конторович А.Э., Беляев С.Ю., Конторович А.А. и др. Тектоническая карта венд-нижнепалеозойского структурного яруса Лено-Тунгусской провинции Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 8. С. 851–862.
3. Мельников Н.В., Ефимов А.С., Смирнов Е.В. и др. Присаяно-Енисейская синеклиза - объект газопоисковых работ на юго-западе Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2010. № 2. С. 13–20.
4. Мельников Н.В., Якшин М.С., Шишкин Б.Б. и др. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления. Новосибирск: «Гео», 2005. 428 с.
5. Постникова О.В., Пошибаев В.В., Антипова О.А., Духненко Ю.А. Прогноз распространения коллекторов мошакской свиты венда в пределах юго-западной окраины Сибирской платформы // Экспозиция Нефть Газ. 2017. № 4. С. 14–18.
6. Сим Л. А., Постников А. В., Постникова О. В. и др. Влияние новейшей геодинамики на газоносность Иркенеево-Чадобецкого рифтогенного прогиба // Экспозиция Нефть Газ. 2016. № 6. С. 8–12.
7. Советов Ю.К. Седиментология и стратиграфическая корреляция вендских отложений на юго-западе Сибирской платформы: выдающийся вклад внешнего источника классического материала в образование осадочных систем // Литосфера. 2018. Т. 18. № 1. С. 20–45.
8. Knaust, D., Bromley R.G. (Eds.), Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments. Developments in Sedimentology, 2012, vol. 64, Elsevier, Amsterdam, pp. 529–561.

REFERENCES

1. Anatol'eva A.I. Old red-colour terrigene-gematite formation at the south-west Siberian Platform. *Bull. Soc. Imp. Nat. Mosc., geol.*, 1968, no 5, pp. 79–92. (In Russian)
2. Kontorovich A.E., Belyaev S.Yu., Kontorovich A.A. and other. Tectonic map of the Vendian-Lower Paleozoic structural stage of the Lena-Tunguska petroleum province, Siberian Platform Russian. *Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 8, pp. 851–862. (In Russian)
3. Melnikov N.V., Efimov A.S., Smirnov E.V. Prisaiano-Yenisei Syncline is an object of gas prospecting in the southwest of the Siberian Platform. *Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2010, no. 2, pp. 13–20. (In Russian)
4. Melnikov N.V., Yakshin M.S., Shishkin B.B. and other. *Stratigraphy of oil and gas basins of Siberia. Riphean and Vendian of Siberian Platform and its Folded Margins*. Novosibirsk, 2005. 428 p. (In Russian)
5. Postnikova O.V., Poshibaev V.V., Antipova O.A., Dukhnenko Y.A. Prediction of distribution of reservoir rocks of the Vendian Moshakovskaya suite within the southwest end of the Siberian platform. *Exposition Oil Gas*, 2017, no. 4, pp. 14–18. (In Russian)
6. Sim L.A., Postnikov A.V., Postnikova O.V. and other. Influence of recent geodynamics to gas productivity of Irkinevo-Chadobets riftogenic trough. *Exposition Oil Gas*, 2016, no. 6, pp. 8–12. (In Russian)
7. Sovetov J.K. Sedimentology and stratigraphic correlation of Vendian deposits in the southwestern Siberian Craton: major contribution of an exorotonic clastic source to sedimentary systems. *Lithosphere* (Russia), 2018, vol. 18, no. 1, pp. 20–45. (In Russian)
8. Knaust, D., Bromley R.G. (Eds.), Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments. *Developments in Sedimentology*, 2012, vol. 64, Amsterdam, Elsevier, pp. 529–561.

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ
GEOLOGICAL EXPLORATION TECHNIQUE

УДК.621.643.622

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ОБСАДНЫХ ТРУБ
ПРИ СООРУЖЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН
ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА*

А.Г. ИВАНОВ¹, Д.А. ИВАНОВ², Ю.А. АРСЕНТЬЕВ³, А.П. НАЗАРОВ³, В.Н. КАЛИНИЧЕВ³

¹АО «Атомредметзолото»
22, Большой Дровяной пер., Москва 109004, Россия
e-mail: alekgeorivanov@armz.ru

²Weatherford
4, 4-й Лесной пер., Москва 109004, Россия
e-mail: alekgeorivanov@armz.ru

³ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117977, Россия
e-mail: arsentev1956@yandex.ru

Предприятие скважинного подземного выщелачивания (СПВ) на территории Хиагдинского рудного тела ведёт добычу урана на глубинах 90—300 м, ниже зоны распространения многолетнемерзлых пород. При этом широкое применение на месторождениях СПВ урана имели трубы из полиэтилена низкого давления (ПНД), которые в настоящее время заменяются на трубы из модифицированного непластифицированного поливинилхлорида (НПВХ), с целью снижения аварийности технологических скважин в геокриологических условиях сооружения и эксплуатации. Сопоставительный анализ состояния труб ПНД и НПВХ в данных условиях позволил оценить влияние на прочностные характеристики температуры и длительности их применения в качестве обсадных колонн технологических труб скважин. И тем самым убедительно доказать необходимость перехода при формировании обсадных колонн на трубы из НПВХ резьбового соединения с предварительным нанесением на него соответствующих герметиков и указать на необходимость использования предлагаемых авторами технических приспособлений в виде металлических защитных муфт на резьбовые соединения, трубных ключей, специальных хомутов, позволяющих в целом довести аварийность при сооружении и эксплуатации технологических скважин в условиях криолитозоны до 2,5%.

К л ю ч е в ы е с л о в а: скважина; скважинное подземное выщелачивание; полимерные обсадные трубы; резьбовые соединения; герметики.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-4-50-57

FEATURES OF THE APPLICATION OF A POLYMER CASING IN THE CONSTRUCTION OF PRODUCTION WELLS IN UNDERGROUND LEACHING OF URANIUM

A.G. IVANOV¹, D.A. IVANOV², YU.A. ARSENTYEV³, A.P. NAZAROV³, V.N. KALINICHEV³

¹JSC ARMZ (Atomredmetzoloto Uranium Holding Co., the Rosatom's mining division)
22, B. Drovyanoi Lane, Moscow 109004, Russia
e-mail: alekgeorivanov@armz.ru

²Weatherford Llc,
4, 4th Lesnoy Pereulok, Moscow 125047, Russia
e-mail: alekgeorivanov@armz.ru

³Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklouho-Maklay's street, Moscow 117997, Russia
e-mail: arsentev1956@yandex.ru

A borehole underground leaching enterprise in the Khiagda ore body leads to the uranium mining at a depth of 90 - 300 m below the permafrost distribution zone. At the same time, HDPE (high density polyethylene) pipes have been widely used in borehole underground leaching uranium deposits, which are currently being replaced by pipes from modified UPVC (unplasticized polyvinyl chloride), in order to reduce the accident rate of technological wells in the geocryological conditions of their construction and operation. A comparative analysis of the state of the HDPE and UPVC pipes, under these conditions, made it possible to assess the effect on the strength characteristics of wells by temperature and the duration of their use as casing strings of technological wells; and thereby to prove convincingly the need for the transition to the UPVC pipes of a threaded connection with preliminary application of the appropriate sealants on it. The description of these sealants has been given in the paper. And also its comparison allows to indicate the need of using the technical devices proposed by the authors in the form of metal protective couplings for threaded connections, pipe wrenches, special clamps, etc., allowing to reduce generally accidents during the construction and operation of technological wells in the conditions of permafrost zone to 2,5%.

Keywords: borehole; borehole underground leaching; polymer casing and features of its application; threaded joints, sealants.

Добыча урана скважинным подземным выщелачиванием (СПВ) производится с применением преимущественно агрессивных химических растворов: серной кислоты при добыче урана и более агрессивных соляной и плавиковой кислот при выполнении химических обработок прифилтровых зон при выполнении ремонтно-восстановительных работ. Поэтому одним из основных критериев выбора материала обсадных труб наряду с механической прочностью является его химическая стойкость к воздействию таких реагентов.

Наиболее распространёнными материалами для изготовления труб, которые могут применяться для оборудования скважин СПВ, — термопласты различного типа. Основными из них являются полиэтилен низкого давления (ПНД), непластифицированный поливинилхлорид (НПВХ), полипропилен (ПП). Химически стойкими к воздействию агрессивных жидкостей также являются трубы из стеклопластика (СПТ), представляющего собой композитный материал на основе эпоксидной или полиэфирной смолы со стеклонаполнителем (ткани, волокна, нити и др.), и стеклобазальтопластиковые трубы (СБПТ). В период с 1985 по 1995 гг. для обсадки скважин находили применение металлопластиковые трубы (МПТ) конструк-

ции Л.Л. Стриковского, выпускаемые в настоящее время АО «МЕПОС». По различным причинам: высокая стоимость, хрупкость, низкое качество труб, являющееся следствием сложной технологии их изготовления, при сооружении технологических скважин не нашли применения трубы из ПП, СПТ, СБПТ, МПТ. При этом широкое применение на месторождениях СПВ урана имели трубы из ПНД, которые в настоящее время заменяются трубами из модифицированного НПВХ. В связи с этим в настоящей работе рассматриваются варианты применения для сооружения технологических скважин только труб из ПНД и НПВХ.

Основные физико-механические характеристики труб из ПНД и НПВХ, их достоинства и недостатки приведены в [1—5]. Остановимся отдельно на каждом из этих видов труб, особенностях их применения для достижения максимальной эксплуатационной надёжности технологических скважин.

Трубы ПНД. В настоящее время нормативным документом, определяющим выпуск труб ПНД, является ГОСТ 18599-2001¹.

Трубы могут выпускаться из полиэтилена различных марок: ПЭ 32, ПЭ 63, ПЭ 80, ПЭ 100. В практике сооружения технологических скважин

¹ ГОСТ 18599-2001. Трубы напорные из полиэтилена. М.: Изд-во стандартов, 2002.

СПВ применяются трубы из полиэтилена марки ПЭ 100, поскольку имеют более высокие прочностные характеристики по сравнению с трубами одинакового диаметра, изготовленными из полиэтилена других марок. Качественные трубы должны иметь гладкую наружную и внутреннюю поверхности, на наружной, внутренней и торцевой поверхностях труб не допускаются пузыри, трещины, раковины, посторонние включения, видимые без увеличительных приборов. Для сооружения скважин допускается применять только трубы, отвечающие приведённым требованиям. На практике нередки случаи, когда поставляются трубы, изготовленные из некачественных материалов с включением в состав основного сырья продуктов дробления различных видов вторичных полимерных материалов, металлической стружки и мела (для увеличения плотности материала труб). При-

менение таких труб для сооружения скважин любого назначения категорически недопустимо. На рис. 1 приведены фотографии внутренней поверхности труб, изготовленных с добавками в основное сырьё вторичных материалов с посторонними включениями (мелкая металлическая стружка и др.).

Основными недостатками труб являются следующие: не склеиваются никакими доступными для промышленного использования клеями; имеют большой коэффициент температурного расширения при сезонных изменениях температуры выщелачивающих растворов, подаваемых в эксплуатационные колонны закачных скважин; обладают низкой осевой устойчивостью, приводящей к изгибу колонн и разрушению резьбовых соединений; для них характерна высокая скорость старения.

На рис. 2 отражены характерные дефекты обсадных труб ПНД: изгиб колонны труб ПНД по

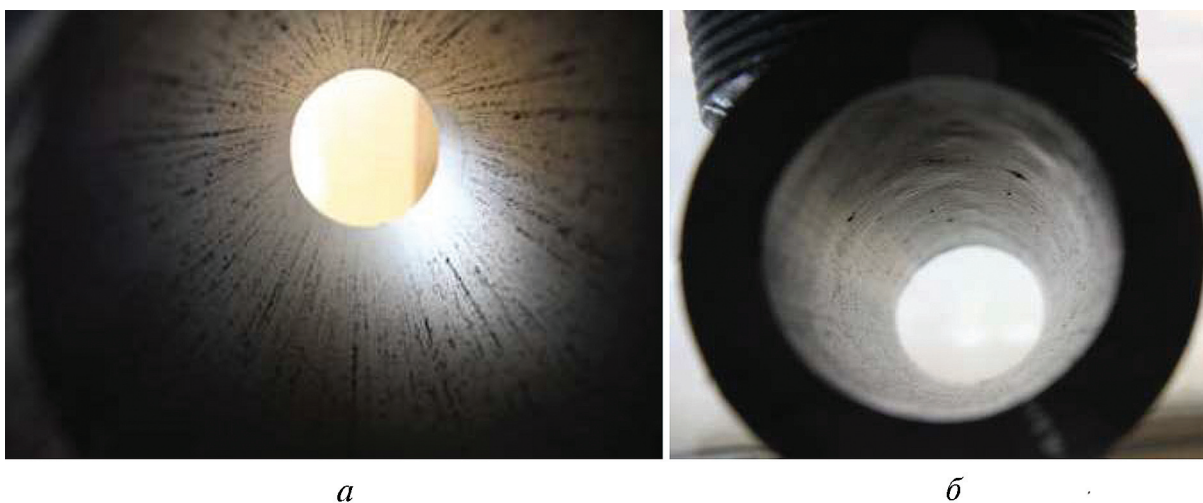


Рис. 1. Внутренняя поверхность труб ПНД, изготовленных с добавками в основное сырьё вторичных материалов и металлической стружки: *а* – труба ПЭ 100 SDR 9 – 160×17,9, *б* – труба ПЭ 100 SDR 6 – 110×18,3



Рис. 2. Дефекты обсадных колонн из труб ПНД: *а* – изгиб обсадной колонны; *б* – смятие трубы ПНД при замерзании воды в заколонном пространстве

резьбовому соединению под действием осевой нагрузки (один из видов деформации, приводящий к нарушению герметичности резьбовых соединений) и смятие обсадной трубы внешним сминающим давлением (потеря поперечной устойчивости трубы) при замерзании воды в затрубном пространстве, что является следствием не соответствующего геологическим условиям способа оборудования устьев скважин [1].

На фотографии (рис. 2, а) видно, что высота витков резьбы с правой и левой сторон различна, что свидетельствует об изгибе резьбового соединения. На рис. 2, б — фотография смятого участка трубы.

На рис. 3 приведены графики длительной прочности ПНД марки ПЭ 100².

На рис. 3 в качестве показателя прочности выбран параметр кольцевого напряжения. Этот параметр отражает соотношение геометрических параметров трубы и давления внутри трубы:

$$\sigma_{\text{кн}} = \frac{P(d-e)}{2e},$$

где $\sigma_{\text{кн}}$ — кольцевое напряжение, МПа; P — давление внутри трубы, МПа; d, e — соответственно наружный диаметр трубы и толщина стенки трубы, мм.

Из графиков следует, что этот показатель снижается в зависимости от продолжительности и температуры эксплуатации материала. Так, при эксплуатации в течение 5 лет при температуре +10°C допустимое кольцевое напряжение для материала ПНД марки ПЭ 100 снижается с 15 до 12 МПа.

Трубы ПНД соединяются следующими основными способами:

- 1) сварка труб на поверхности в плет с последующим спуском её в скважину [8, с. 87];
- 2) сварка труб над устьем скважины с помощью полуавтоматических установок УСВТ-2 [8, с.79];
- 3) сварка труб с помощью сварных проволок, нагретых выше температуры плавления материала труб и перемещаемых в направлении, перпендикулярном оси труб через совмещенные конусные внутреннюю и внешнюю поверхности труб [7];
- 4) соединение с помощью термомуфт (с размещёнными в корпусе нагревательными элементами);
- 5) резьбовые соединения.

Способы 1, 2, 3 имеют следующие основные недостатки: длительность процесса сварки стыков, необходимость тщательной подготовки стыков (подготовка торцов, обезжиривание, центрирование свариваемых труб), наличие града (капли материала труб) на внутренней поверхности сварных швов, приводящее к снижению внутреннего диаметра обсадной колонны. Способ 1 имел также ещё один существенный недостаток — невозмож-

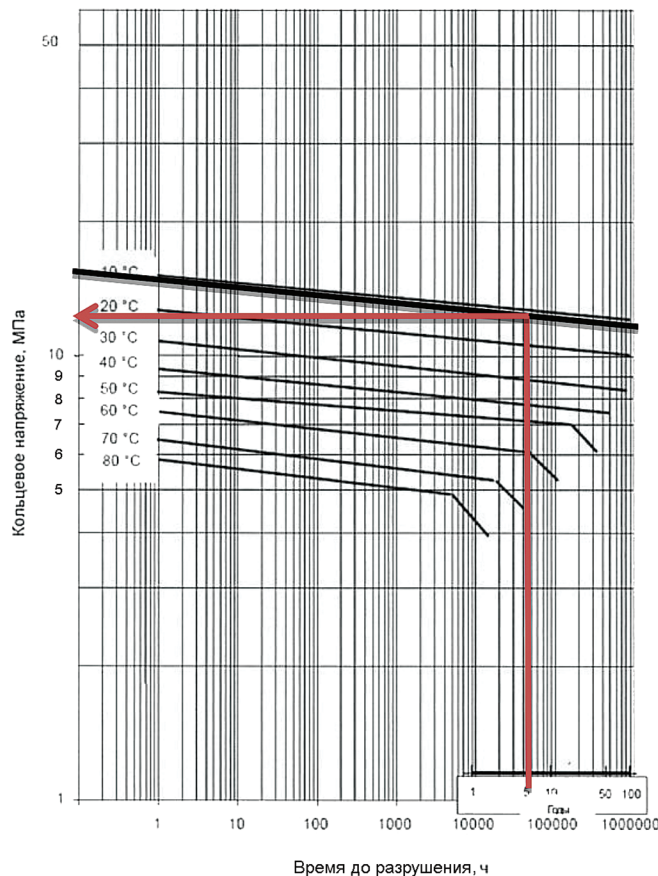


Рис. 3. Графики длительной прочности ПНД марки ПЭ 100 в зависимости от температуры и времени эксплуатации

ность его использования при температурах ниже +5°C, когда гибкость труб значительно снижается, в случае аварийных ситуаций, связанных с необходимостью подъема сварной обсадной колонны из скважины, эту колонну приходится разрезать на отрезки различной длины и для повторного использования необходима повторная подготовка извлечённых из скважины труб (подготовка торцов и пр.). В итоге применение сварных способов оправдано при применении тонкостенных обсадных труб в скважинах небольшой глубины (до 100 м).

Способ 4 предусматривает использование для соединения труб ПНД термомуфт с размещёнными в корпусе нагревательными элементами. Такие муфты, как правило, применяются для соединения горизонтальных трубопроводов. Достоинством их является отсутствие необходимости подготовки торцов соединяемых труб (зачистка, обезжиривание). Применительно к сооружению технологических скважин основные недостатки термомуфт заключаются в следующем: длительности процесса соединения труб; увеличении диаметра ствола скважины при их применении; необходимости использования специального источника электроэнер-

² ГОСТ 32415-2013 Трубы напорные из термопластов и соединительные детали к ним для систем водоснабжения и отопления. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартиформ, 2014.

гии для запитки размещённых в корпусе термомуфты нагревательных элементов; а также недостатках, связанных с аварийным извлечением обсадной колонны из скважины (указаны выше для способов 1, 2, 3 сварных соединений обсадных труб).

Наиболее широкое применение для технологических скважин нашло резьбовое соединение толстостенных труб ПНД по схеме «труба в трубу».

Резьба является ключевым элементом эксплуатационной колонны скважин СПВ, обеспечивая безаварийный спуск обсадных труб при сооружении и герметичность колонны при эксплуатации скважин.

Для труб ПНД на начальных этапах их применения для сооружения технологических скважин СПВ использовались различные виды резьбы: коническая, цилиндрическая прямоугольная, ленточная, треугольная и др. Исследованиями А.Б. Зубарева было доказано, что для труб ПНД наиболее надёжной является коническая упорная трапециевидная резьба с шагом 5 мм, высотой профиля 3,47 мм, углом наклона профиля 3°, конусностью резьбы 5°, шириной гребня 1,5 мм [3]. При изготовлении соединений должно быть достигнуто высокое качество резьбовых поверхностей, что легче обеспечить на предприятиях по выпуску труб, чем в условиях механических мастерских организаций, занимающихся сооружением технологических скважин СПВ и имеющих ограниченный набор станочного парка для механической обработки полимерных материалов. Для повышения герметичности резьбовых соединений любых полимерных труб, и труб ПНД в том числе, обязательным является применение герметиков. В связи с отсутствием клеев единственно доступным способом для резьбовых соединений труб ПНД являются герметики на основе полиизобутилена. А.Б. Зубаревым рекомендован герметик следующего состава: низкомолекулярный полиизобутилен марки П-20 — 31%, высокомолекулярный полиизобутилен марки П-118 — 4%, бензин — 65% [7]. Он в отличие от битумных мастик сохраняет свои пластические свойства в течение всего срока эксплуатации скважин. Перед нанесением герметика на сопрягаемые резьбовые поверхности последние должны быть очищены от посторонних загрязнителей, а сами поверхности должны быть протерты насухо.

Важным моментом в применении обсадных труб ПНД является то, что их температура при обсадке должна быть максимально приближена к температуре промывочной жидкости (вмещающих пород) в стволе скважины. Поэтому при спуске колонн в скважину в летний период при высокой температуре окружающего воздуха, значительно — на десятки градусов Цельсия — превышающей температуру в скважине, обсадку целесообразно проводить в ночное время при минимальной суточной

температуре воздуха, либо перед спуском колонны проливать её холодной водой. В зимний период обсадку скважин следует выполнять при максимальной суточной температуре. Дальнейшие технологические операции по сооружению скважин (оборудование прифилтровых зон гравийными обсыпками и цементирование заколонного пространства, оборудование устьев скважин) должны выполняться после выравнивания температуры вмещающих пород и обсадных труб. Соблюдение этих условий позволяет максимально снизить нагрузки на резьбовые соединения обсадных труб в процессе эксплуатации скважины, так как в трубах на момент окончания ее сооружения практически отсутствуют остаточные температурные напряжения.

В процессе эксплуатации скважины подвергаются различным видам нагрузок. Эксплуатационные колонны закачных скважин, в которые подаются выщелачивающие растворы (ВР) под давлением, превышающим гидростатическое давление пластовой жидкости, подвергаются избыточному гидростатическому давлению. Критическое избыточное внутриколонное давление в зависимости от качества резьбового соединения и применения герметика не превышает 0,7—1,0 МПа. На практике внутриколонное давление при подаче ВР в скважину может превышать допустимые пределы. В результате может происходить разгерметизация резьбовых соединений, связанная в том числе с разрушением муфтовой части резьбы. На рис. 4 показан фрагмент резьбового соединения труб ПНД, извлеченный из скважины с глубины 11 м после обуривания эксплуатационной колонны нагнетательной скважины специальным снарядом на месторождении Канжуган (Республика Казахстан) в 1989 г. [6].

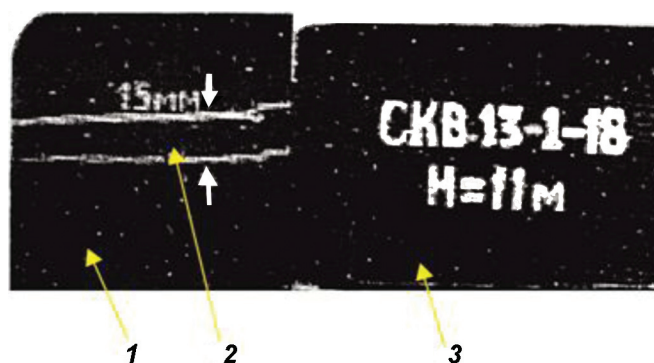


Рис. 4. Фрагмент разрушенного резьбового соединения труб ПНД с толщиной стенки 18 мм: 1 — муфтовая часть резьбы, 2 — разрушенный участок резьбы, 3 — ниппельная часть резьбы

На приведённой фотографии видно, что лопнула муфтовая часть резьбы с образованием трещины около 15 мм в резьбовой части. Через эту щель происходила утечка подаваемых в скважину выщелачивающих растворов.



Рис. 5. Защитная металлическая муфта для резьбовых соединений труб ПНД

Снизить число разрушенных резьбовых соединений труб ПНД можно установкой на резьбовое соединение защитных металлических муфт (рис. 5).

Защитная муфта размещается на муфтовой части резьбового соединения. При свинчивании труб происходит частичное расширение муфтовой части трубы и защитная муфта прочно фиксируется на соединении.

Внедрение защитных металлических муфт на технологических скважинах, сооруженных на месторождениях, обрабатываемых предприятиями, таких как Ленинабадский горно-химический, Навоинский горно-металлургический, Киргизский горнорудный комбинатов и других, позволило в несколько раз снизить аварийность скважин, связанную с разгерметизацией резьбовых соединений эксплуатационных колонн из труб ПНД. В настоящее время на месторождениях Хиагдинского рудного поля более чем на 400 скважинах, сооружённых в условиях многолетнемерзлых пород, установлены защитные металлические муфты, что позволило снизить аварийность скважин с 15 до 2,5%. Наличие защитных металлических муфт на резьбовых соединениях хорошо контролируется методом индукционного каротажа как на стадии сооружения, так и при эксплуатации скважин (рис. 6).

На приведённом графике индукционного каротажа (красный цвет) муфты отбиваются через каждые 6 м глубины скважины, что соответствует дли-

не одной обсадной трубы. Основной недостаток металлических защитных муфт — ограниченный срок службы, определяемый скоростью коррозии материала, из которого они изготовлены. По данным геофизических исследований срок сохранности защитных муфт, изготовленных из низкоуглеродистой стали марки Ст.3 толщиной 1,5—2,5 мм, не превышает двух лет.

Таковы основные особенности применения труб ПНД для оборудования технологических скважин СПВ урана.

Трубы *НПВХ* выпускаются в соответствии с ГОСТ Р 51613-2000³. Трубы и корпуса фильтров из непластифицированного поливинилхлорида изготавливаются по техническим условиям заводов-изготовителей.

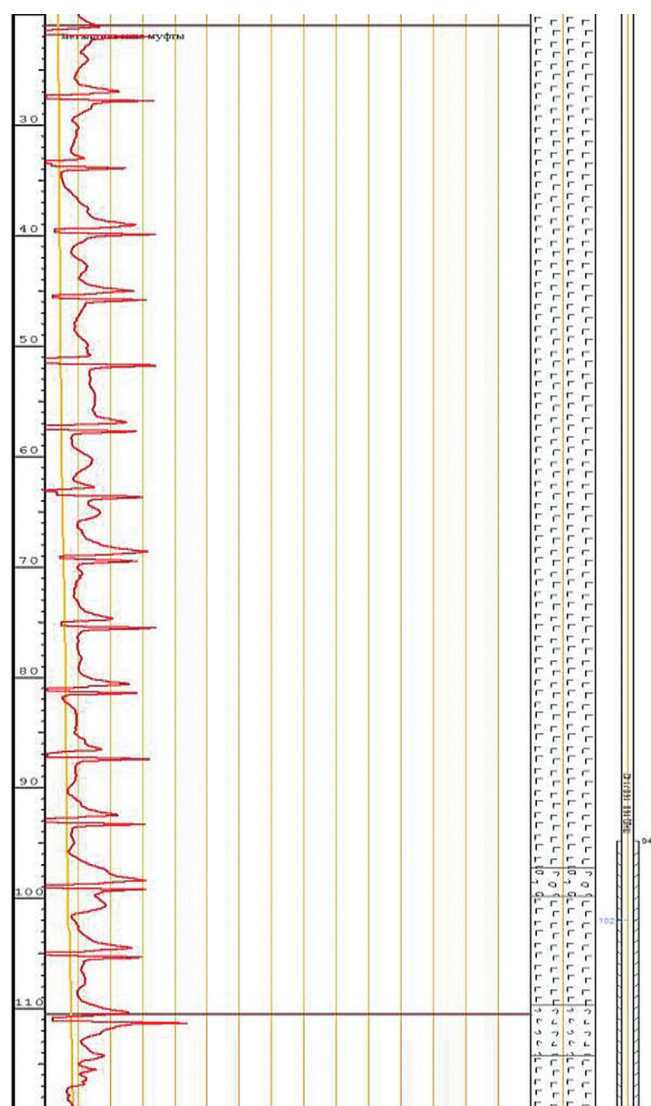


Рис. 6. Контроль за наличием металлических защитных муфт резьбовых соединений труб ПНД эксплуатационной колонны методом индукционного каротажа

³ ГОСТ Р 51613-2000 Трубы напорные из непластифицированного поливинилхлорида. Технические условия (с Поправкой). М.: Госстандарт России, 2000.

Основные определения для труб НПВХ совпадают с таковыми для труб ПНД. Трубы изготавливаются из непластифицированного поливинилхлорида (НПВХ) или непластифицированного поливинилхлорида с модификатором ударной прочности (НПВХ-М). Трубы могут изготавливаться с раструбом (Р) или без раструба, тогда в маркировке буква Р отсутствует. Возможно изготовление труб с двумя типами резьбы: трапецеидальной (ТР) или конической упорной (ТРК). Из практики работ по применению труб НПВХ установлено, что наиболее надёжной является резьба ТРК. Цилиндрическая ленточная резьба для обсадных труб НПВХ неприменима из-за разрушения муфтовой части резьбы при имеющих место перекосах соединяемых труб.

В практике сооружения технологических скважин наибольшее применение находят трубы НПВХ—М—Р—ТРК, имеющие более высокие физико-механические характеристики по сравнению с трубами НПВХ—ТР по следующим показателям: ударной прочности, модулю упругости, морозостойкости, пределу текучести при растяжении и пр. На рис. 7 приведены эталонные графики длительной прочности НПВХ [11].

Из графика следует, что за 5 лет эксплуатации при температуре +20°C предельное кольцевое напряжение в трубах НПВХ снижается с 47 до 27 МПа.

Сравнительный анализ графиков (рис. 3, 7) показывает, что трубы из НПВХ по прочности значительно превосходят трубы из ПНД марки ПЭ 100 и прочность труб НПВХ через 5 лет эксплуатации значительно превышает начальную прочность труб ПНД.

Визуально трубы НПВХ должны удовлетворять следующим критериям: иметь гладкие наружную и внутреннюю поверхности, допускаются незначительные продольные полосы и волнистость, не выходящие за пределы допускаемых отклонений. На наружной, внутренней и торцевой поверхностях не допускаются пузыри, трещины, сколы, раковины, видимые без увеличительных приборов. Концы труб должны быть срезаны перпендикулярно их осям и зачищены от заусенцев. Цвет труб — синий (оттенки не регламентируются). Резьбовые концевики должны иметь фаски 5×5 мм: муфтовые раструбы по внешнему диаметру торца, а ниппельные концевики по внутреннему диаметру торца. Наличие фасок является обязательным для обсадных труб, изготовленных из НПВХ. Это связано с необходимостью исключения ударных нагрузок на несоосные элементы труб при проведении технологических операций по сооружению и ремонту скважин, связанных со спуском технологического снаряда (бурильных труб) в за колонное пространство или внутрь эксплуатационной колонны.

Отличительной особенностью труб НПВХ является то, что в качестве герметика резьбовых сое-

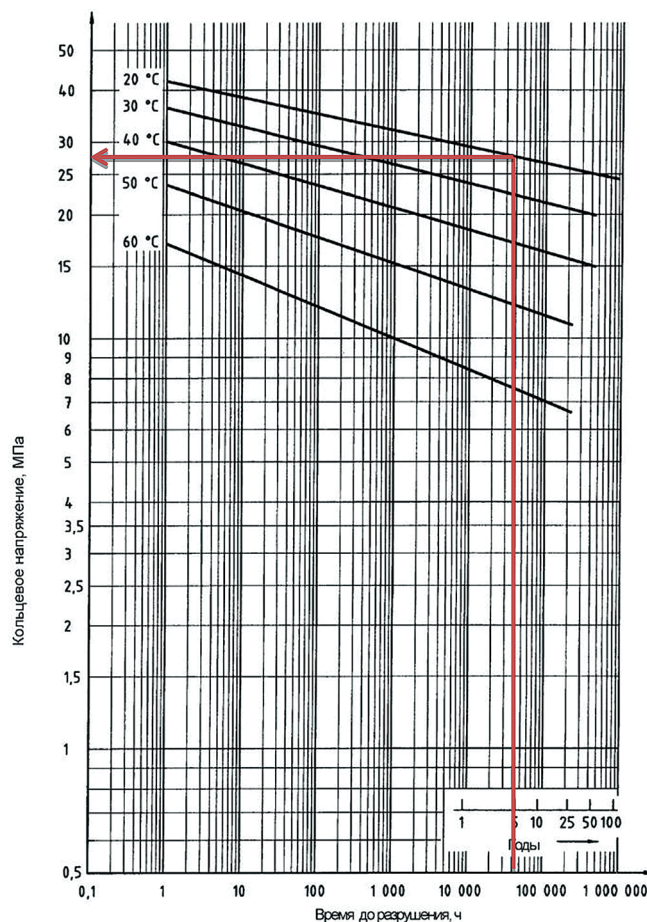


Рис. 7. Эталонные графики длительной прочности НПВХ в зависимости от времени и температуры эксплуатации

динений для них возможно применение клеев с различным сроком схватывания. Применение клеев позволяет получить абсолютно герметичную по всей длине эксплуатационную колонну. В качестве быстросхватывающегося клея (срок схватывания до 20 мин., при обязательном прогреве до температуры не менее +5°C свинчиваемых резьбовых концов труб в зимнее время) чаще всего используется «ТангитPVC-U». Недостаток этого клея один — короткий срок отверждения. Поэтому при необходимости извлечения спущенных в скважину обсадных труб на поверхность, их приходится разрезать на отрезки определённой длины, дальнейшее применение которых становится невозможным. В связи с этим более предпочтительными являются клеи с длительным сроком отверждения, позволяющие производить подъём колонны из скважины с раскручиванием обсадных труб. Эти трубы после очистки резьбовых соединений металлическими щётками можно использовать повторно. Такими клеями с длительным сроком отверждения являются следующие: «M-sealAllPressurePVSSolventCement» или «PVCpegafor». Возможно также применение клеев «GriffonUNI-100», «GEBSOPLASTGEB». Перед нанесением любого клея резьбовые поверхности обязательно очищаются от грязи и вытираются обтирочным материалом насухо.

Трубы НПВХ при работе требуют более бережного обращения, чем трубы ПНД. Особенности заключаются в следующем:

1) транспортировка труб должна исключать свисание их концов с платформы транспортного средства;

2) в процессе транспортировки ударные нагрузки на трубы должны быть исключены;

для выполнения погрузочно-разгрузочных работ допускается использование только текстильных строп;

3) для спуска труб в скважину допускается использование деревянных хомутов с кожаным покрытием рабочей поверхности (для обсадных труб без раструба), либо хомуты с клиновыми вставками, устанавливаемыми под раструб обсадных труб;

4) крутящий момент при свинчивании обсадных труб должен быть ограничен, перетягивать резьбу после характерного щелчка, свидетельствующего о полном сопряжении резьбовых поверхностей, категорически запрещено, для свинчивания труб целесообразнее всего применять ременные ключи из кожи или других тканевых материалов.

Комбинированные обсадные колонны из труб ПНД и НПВХ. Применение комбинированных колонн возможно в случаях, когда эксплуатационная колонна состоит из труб НПВХ, а её верхняя часть — из труб ПНД (на практике это, как правило, 1—2 трубы) для удобства обвязки устья и совместимости материалов и элементов обвязки с эксплуатационной колонной (оголовники, возможность свар-

ки между собой отдельных элементов и пр.). Если нет возможности исключить такое соединение в конструкции технологической скважины, то должно соблюдаться основное правило: резьбовое соединение труб из разных материалов должно находиться над устьем скважины. В этом случае аварийные ситуации по резьбовому соединению труб ПНД и НПВХ легко устранимы.

Выводы

1. Применяемые для оборудования скважин СПВ полимерные трубы должны соответствовать по своим параметрам горно-геологическим условиям месторождений, на которых они применяются, и технологическим регламентам добычи урана, прежде всего величине избыточного внутриколонного давления в закачных скважинах.

2. Для любых типов труб с резьбовыми соединениями применение соответствующих герметиков является обязательным с соблюдением технологии нанесения их на резьбовые поверхности.

3. Спуск обсадных труб в скважину должен производиться с применением инструмента, исключающего возникновение микротрещин или разрушений в трубах в процессе их свинчивания. Сами трубы перед спуском в скважину должны быть визуально осмотрены ответственным руководителем, осуществляющим контроль за технологией работ по их спуску в скважину, для определения их целостности (отсутствия дефектов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсентьев Ю.А., Назаров А.П., Забайкин Ю.В., Иванов А.Г. О расчете эксплуатационных колонн из полимерных материалов для условий многолетнемерзлых пород // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики. Российский и зарубежный опыт. Научное обозрение. № 21. М.: ОПТИМУС, 2019. С. 27–32.
2. Геотехнология урана (русский опыт) / Под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева М.: Университетская книга, 2017. 576 с.
3. Зубарев А.Б. Условия работы, обоснование конструкции и технология применения полиэтиленовых обсадных колонн для крепления технологических скважин подземного выщелачивания металлов. Автореферат дис. ... канд. техн. наук, М., 1983. 24 с.
4. Иванов А.Г., Солодов И.Н. О выборе материала обсадных труб для оборудования эксплуатационных скважин подземного выщелачивания // Тезисы докладов XIV Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле». М., 2019. С. 249–250.
5. Иванов А.Г., Солодов И.Н. Выбор материала обсадных труб для оборудования эксплуатационных скважин подземного выщелачивания // Горный журнал. 2018. № 7. С. 81–85.
6. Иванов А.Г., Кравцов В.А., Костин В.А., Езов А.П. Опыт восстановления герметичности технологических скважин при ПВ // Технический прогресс в атомной промышленности, Серия «Горно-металлургическое производство». 1989. № 6. С. 17–19.
7. Сергиенко И.А., Мосев А.Ф., Бочко Э.А., Пименов М.К. Бурение и оборудование геотехнологических скважин. М.: Недра, 1984. 224 с.
8. Солодов И.Н., Гладышев А.В., Иванов А.Г. Опыт добычи урана методом подземного выщелачивания в криолитозоне // Разведка и охрана недр. 2018. № 11. С. 65–70.

REFERENCES

1. Arsent'yev Yu. A., Nazarov A. P., Zabaykin V., Ivanov A. G., On the calculation of production casing of polymeric materials for the permafrost conditions. *Actual problems and prospects of economic development: Russian and foreign experience, Scientific review*, Issue № 21. M., OPTIMUS, 2019, pp. 2–32.
2. *Geotechnology uranium (Russian experience)*. Ed. I.N. Solodova, E.N. Kamneva. M., University Publ., 2017, 576 p.
3. Zubarev A.B. *Working conditions, grounding design and applications engineering plastic casin for anchoring technology wells underground leaching of metals*, Moskow, 1983, 24 p.
4. Ivanov, A.G., Solodov I.N. About choosing the material casing wells equipment for in-situ leaching. *Book of abstracts of XIV International scientific-practical Conference «New ideas in the Earth Sciences»*, M., 2019, pp. 249–250.
5. Ivanov, A.G., Solodov I.N. Material casing wells equipment for in-situ leaching. *Mountain magazine*, 2018, no 7, pp. 81–85.
6. Ivanov, A.G., Kravtsov V.A., Kostin V.A., Yezhov A.P. Recovery Experience tightness technology wells at DC. *Technical progress in the nuclear industry, a series of mining-metallurgical production*, 1989, no 6, pp. 17–19.
7. Sergienko I.A., Mosev A.F., Bochko E.A., Pimenov M.K. *Out geotechnical equipment and Drilling wells*. M., Nedra Publ., 1984, 224 p.
8. Solodov I.N., Gladyshev A.V., Ivanov A.G. Experience mining of uranium in-situ leaching method in kriolitozone. *Exploration and protection of the subsoil*, 2018, no 11, pp. 65–70.

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ
HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

УДК 518:556.33.04

ФИЛЬТРАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД К ВЫРАБОТКАМ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА*

М.М. БУРАКОВ

*ТОО НППФ «КазГИДЭК»
офис 506, 43а, Мынбаева ул., г. Алматы 050008, Казахстан
e-mail: michael.burakov@gmail.com*

Приведено полученное автором приближённое решение задачи притока напорных подземных вод к водопрёмной системе большого диаметра при возмущении водоносного горизонта с постоянным дебитом. Решение получено с использованием наиболее общего метода отыскания приближённых решений — метода интегральных соотношений Г.И. Баренблатта. Выполнено сопоставление результатов вычислений на базе этого приближённого решения с вычислениями на основе точного решения задачи о притоке флюидов (воды, газа, нефти) к водопрёмным системам большого диаметра — «большим колодцам» — «укрупнённым скважинам». Это сопоставление показало, что приближённое решение обеспечивает вычисление понижения пьезометрического уровня подземных вод (при известном постоянном дебите возмущения) в любой точке водоносного горизонта, в том числе, на стенке водопрёмной системы, с относительной погрешностью менее 5 % для широкого диапазона значений времени от начала возмущения. Полученное решение имеет несоизмеримо большую область приложений в сравнении с традиционно используемым в гидрогеологической практике методом «большого колодца».

Ключевые слова: водопрёмная система большого диаметра; водоносный горизонт; возмущение с постоянным дебитом.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-4-58-67

**FILTRATION OF THE UNDERGROUND WATER TO THE WORKINGS
OF A LARGE DIAMETER**

M.M. BURAKOV

*LP RPDC «KazGIDEK»
of. 506, 43a, ul. Mynbaeva, Almaty 050008, The Republic of Kazakhstan
e-mail: michael.burakov@gmail.com*

An approximate solution obtained by the author for the problem of the flow of pressure groundwater to a large-diameter water receiving system with a disturbed aquifer with a constant flow rate has been given. The solution has been obtained using the most general method of finding approximate solutions — the method of integral relations of G.I. Barenblatt. Comparison of the computational results based on an approximate solution with computations based on accurate and well-known approximate solution about the inflow of fluids (water, gas, oil) to large-diameter water receiving systems — «big wells» — «enlarged wells». This comparison has shown that an approximate solution provides a calculation of piezometric groundwater level lowering (with a known constant disturbance flow rate) at any point of the aquifer, and also at the wall of the receiving system, with a relative error of less than 5 % for a wide range of times from the beginning of the disturbance. The resulting solution has a disproportionately large area of application in comparison with the «big well» method traditionally used in hydrogeological practice.

Keywords: water receiving system of large diameter; aquifer; constant flow disturbance.

В практике гидрогеологических расчётов исключительный интерес представляют расчёты фильтрации подземных вод (ПВ) с осевой симметрией в напорных и безнапорных водоносных горизонтах к выработкам (водоприёмным системам) большого диаметра. Подобные условия фильтрации характерны в первую очередь вблизи карьеров, площадных систем подземных горных выработок, площадных водозаборных и дренажных систем.

Современные представления о фильтрации подземных вод к водоприёмным системам большого диаметра

Фильтрация ПВ к водоприёмной системе большого диаметра в напорном неограниченном в плане водоносном горизонте (рис. 1) описывается уравнением вида:

$$\chi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S}{\partial r} \right) = \frac{\partial S}{\partial t} \quad (1)$$

при следующих начальном и граничных условиях:

$$r \frac{\partial S}{\partial r} \Big|_{r=R} = -\frac{Q}{2\pi T}, \quad S(r, 0) = 0, \quad \frac{\partial S(\infty, t)}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

где $S(r, t)$ — понижение пьезометрического уровня ПВ относительно начального H_0 в точке водоносного горизонта с координатой r в момент времени t от начала возмущения, далее будет обозначаться как S ; T — водопроводимость водоносного горизонта¹, $T = Km$ (здесь K и m — соответственно коэффициент фильтрации и мощность водоносного горизонта); χ — пьезо- или уровнепроводность водоносного горизонта, $\chi = \frac{T}{\mu^*}$ (здесь μ^* — упругая или гравитационная ёмкость водоносного горизонта); R — радиус выработки.

В гидрогеологии расчёты притока ПВ к таким водоприёмным системам традиционно выполняются на основе так называемого метода большого колодца. Сущность его заключается в том, что группы взаимодействующих скважин, системы подземных горных выработок, карьеры — «обобщённые системы» [2, 3, 10] — заменяются одной фиктивной скважиной (колодцем) радиусом R , равным радиусу круга, площадь или периметр которого отвечает площади или периметру обобщённой системы. В центр такой фиктивной скважины или колодца помещается скважина исчезающе малого радиуса (линейный источник-сток с $r_0 \rightarrow 0$, где r_0 — радиус возмущающей скважины). В этом случае понижение уровня ПВ на контуре «большого колодца», работающего с постоянным дебитом Q , и в водоносном горизонте за его пределами может рассчитываться из известного уравнения Тейса [19].

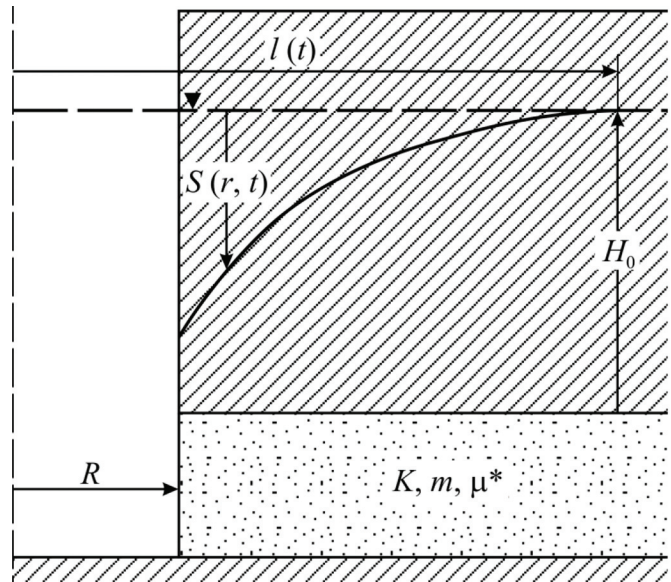


Рис. 1. Схема фильтрации подземных вод к водоприёмной системе большого диаметра

Записанное в понижениях уровня оно имеет следующий вид:

$$S = \frac{Q}{4\pi T} E_1 \left(\frac{R^2}{4\chi t} \right), \quad (3)$$

где $E_1(x)$ — интегральная показательная функция (интегральный экспоненциал). Остальные обозначения прежние.

Вместе с тем в начальные моменты возмущения это уравнение даёт заниженные значения понижения уровня ПВ как на контуре «большого колодца», так и в водоносном горизонте. Последнее обусловлено тем, что принятая схема фильтрации не учитывает наличие фиктивного потока ПВ из внутренней части обобщённой системы. Погрешность определяется заданием постоянства расхода притока ПВ на поверхности источника-стока, а не на контуре «большого колодца», и оценивается на основе соотношения [2]:

$$Q(R, t) = Q \exp \left(-\frac{R^2}{4\chi t} \right), \quad (4)$$

где все обозначения прежние.

Как следует из (4), погрешность уменьшается с течением времени; при

$$\frac{R^2}{4\chi t} \rightarrow 0 \quad (5)$$

теоретический расход потока ПВ на стенке «большого колодца» приближается к общему дебиту возмущения, соответственно понижение уровня, рассчитываемое по формуле Тейса, приближается к истинному. Однако продолжительность возму-

¹ В настоящей статье используется терминология из статьи [12].

щения, необходимая для реализации условия (5), представленного в виде, например, [2]:

$$\frac{R^2}{4\chi t} \leq 0,0025 \quad (6)$$

для обеспечения расчётов приведённого понижения уровня на контуре площадной системы с вероятной относительной погрешностью $\delta_{\frac{4\pi T S}{Q}} \leq 5\%$, в

принципе может оказаться соизмеримой с общей продолжительностью работы площадной системы. Понятно, что в этом случае не может быть и речи об анализе формирования, а тем более о прогнозе притоков ПВ к «большому колодцу» и депрессии поверхности ПВ в водоносном горизонте. К примеру для «большого колодца» радиусом $R = 200$ м, работающего в безнапорном водоносном горизонте с уровнепроводностью $\chi = 10^3$ м²/сут., условие (6) выполняется спустя $t = 4000$ сут., т. е. спустя более 10 лет.

Необходимость реализации достаточно жёсткого условия (6) в ряде случаев снимается за счёт того обстоятельства, что некоторые площадные системы (например, карьеры) можно рассматривать как развивающиеся в плане, иными словами, радиус подобных площадных систем является переменным на протяжении их работы [5–8]. На начальных этапах работы таких систем (соответственно и на начальных этапах возмущения водоносных горизонтов, в которых они работают) их радиус мал, так что условие (6) реально выполняется спустя первые десятки суток от начала возмущения. Дальнейший анализ формирования притоков ПВ в развивающиеся площадные системы и депрессии поверхности ПВ от действия таких систем и их прогнозы выполняются с использованием принципиально иных в сравнении со способом «большого колодца» расчётных моделей (например, [5–8]).

Таким образом, очевидна необходимость обоснования расчётной модели фильтрации ПВ к площадным системам при возмущении с постоянным дебитом вскрытых такими системами водоносных горизонтов, обеспечивающей адекватное представление процесса возмущения по возможности на всём его протяжении.

Заметно раньше проблему исследования работы с постоянным и переменным дебитом так называемых укрупнённых скважин в условиях упругого режима фильтрации жидкости исследовали специалисты-нефтяники². В работе Эвердингена и Херста [18] приведено точное решение задачи фильтрации ПВ, обеспечивающее вычисление давления на стенке скважины любого конечного радиуса, пущенной с постоянным дебитом в неограни-

ченном в плане водоносном горизонте. В статье Ингерсолла и др. [17] выполнено исследование распространения тепла в почве вокруг трубопровода конечного диаметра, приведено точное решение указанной задачи. Это решение в последующем во многих публикациях адаптировано для представления закономерностей распределения давления в жидкости (пьезометрического напора) в любой точке неограниченного в плане горизонта в любой момент времени после пуска «укрупнённой скважины» с постоянным дебитом.

Приведённые в указанных работах точные решения весьма сложны, соответственно они реализованы численными методами и представлены в виде таблиц. Однако и в таком виде их использование для практических целей достаточно сложно. Поэтому из специальной литературы известно значительное число публикаций, в которых изложены варианты приближённых решений задачи фильтрации жидкости (нефти, газа и ПВ) к «укрупнённым скважинам», работающим в водоносных горизонтах (или нефтяных пластах) с постоянным дебитом при упругом режиме фильтрации (например, [11, 13–16]). При этом в [13–16] приведены решения, обеспечивающие вычисление давления (или депрессии давления) только на стенке такой «укрупнённой скважины», и лишь в [11], как отмечает её автор, изложено приближённое решение, представляющее закономерности распределения давления в жидкости в любой точке водоносного горизонта или нефтяного пласта в любой момент времени после пуска «укрупнённой скважины».

Приближённое решение задачи фильтрации подземных вод к водоприёмным системам большого диаметра

В настоящей работе представлено приближённое решение задачи фильтрации ПВ к «большому колодцу» (выраженной уравнениями (1) и (2)) в рамках метода интегральных соотношений Г.И. Баренблатта [1], позволяющее получить распределение пьезометрического напора в пределах всей области возмущения горизонта в любой момент времени от начала возмущения. Полагается, что «большой колодец» работает с постоянным дебитом в напорном неограниченном в плане водоносном горизонте.

В полном соответствии со способом «большого колодца» поместим в центр выработки большого диаметра скважину исчезающе малого радиуса ($r_0 \rightarrow 0$), на стенке которой зададим постоянный дебит возмущения Q , равный дебиту на стенке «большого колодца». Возмущение водоносного горизонта этой

² Термином «укрупнённая скважина» обозначено то же понятие, для которого используется также и термин «большой колодец». Иными словами, термины «укрупнённая скважина» и «большой колодец» следует рассматривать как синонимы.

скважиной будем рассматривать в два этапа. На первом этапе возмущение развивается в области $r \leq R$ (когда и $l(t) \leq R$), т. е. в фиктивной области, совпадающей с объёмом водоносного горизонта, занимаемого «большим колодцем». На втором этапе возмущение развивается в области, внешней по отношению к «большому колодцу» (при $l(t) \geq R$ и соответственно при $r \geq R$).

Приближённое решение задачи фильтрации ПВ к скважине исчезающе малого радиуса, пущенной с постоянным дебитом в неограниченном в плане напорном водоносном горизонте, приведено в работе Г.И. Баренблатта [1]; оно имеет вид:

$$S = \frac{Q}{2\pi T} \left[\ln \frac{l(t)}{r} - 1 + \frac{r}{l(t)} \right], \quad (7)$$

$$l(t) = \sqrt{12\chi t}, \quad r \leq l(t) \leq R.$$

Здесь все обозначения прежние.

В соответствии с постановкой задачи в момент времени от начала возмущения область его влияния станет равной R , т. е. второе равенство в (7) приобретёт вид

$$\sqrt{12\chi t_0} = R. \quad (8)$$

В момент времени t_0 завершается первый этап возмущения и начинается второй, на протяжении которого возмущение развивается в водоносном горизонте в области, внешней по отношению к «большому колодцу». В этом случае возмущение для любого момента от начала его второго этапа описывается уравнениями, аналогичными (7) [4]:

$$S = \frac{Q}{2\pi T} \left[\ln \frac{l(t)}{r} - 1 + \frac{r}{l(t)} \right], \quad (9)$$

$$l(t) = \sqrt{12\chi t + R^2}, \quad r \geq l(t) \geq R,$$

или, если привести первое уравнение в (9) к виду, часто используемому для представления фильтрации ПВ к «большому колодцу»:

$$S = \frac{Q}{2\pi T} \left[\ln \frac{1}{\bar{r}} \frac{l(t)}{R} - 1 + \frac{1}{\left(\frac{1}{\bar{r}} \frac{l(t)}{R} \right)} \right], \quad \bar{r} = \frac{r}{R}. \quad (10)$$

Здесь отсчёт времени t ведётся от момента начала второго этапа возмущения t_0 .

Очевидно, что в такой постановке дебит на стенке «большого колодца» является переменным во времени и не равным дебиту возмущения Q (существенно меньше его, возрастает в пределе от 0 до Q). Выполним на основе приведённого приближённого решения (9) оценку отличия дебита на контуре выработки большого радиуса от дебита скважины исчезающе малого радиуса ($r_0 \rightarrow 0$), помещён-

ной в центр «большого колодца». Дебит на стенке «большого колодца» выражается первым уравнением в (2) и равен

$$2\pi T R \frac{\partial S}{\partial r} \Big|_{r=R} = -Q_{R_1}(t). \quad (11)$$

Здесь все обозначения прежние.

Подстановка в (11) первого выражения из (9) и несложные преобразования полученного соотношения позволяют установить, что

$$Q_{R_1}(t) = Q \left[1 - \frac{R}{l(t)} \right], \quad l(t) \geq R. \quad (12)$$

Уравнение (12) определяет величину полного дебита потока ПВ с осевой симметрией на расстоянии R от центра возмущения. Прирост (уменьшение) его $\Delta Q_{R_1}(t)$ по отношению к полному заданному постоянному дебиту возмущения Q в центре области возмущения (на стенке скважины исчезающе малого радиуса) составляет:

$$\Delta Q_{R_1}(t) = Q - Q_{R_1}(t)$$

или, с учётом (12),

$$\Delta Q_{R_1}(t) = Q \frac{R}{l(t)}. \quad (13)$$

Уравнение (13) показывает, что в момент достижения областью возмущения от скважины, помещённой в центр «большого колодца», его стенки (т. е. при $l(t_0) = R$), $\Delta Q_{R_1}(t_0) = Q$. С продвижением же области возмущения вглубь горизонта (т. е. при $l(t) > R$) величина прироста дебита закономерно уменьшается и в пределе $\lim_{l(t) \rightarrow \infty} \Delta Q_{R_1} = 0$, тогда как $\lim_{l(t) \rightarrow \infty} Q_{R_1} = 0$.

Зададим теперь полный дебит возмущения, который должен быть на стенке «большого колодца», на скважине, помещённой в центр этого «большого колодца». В первом приближении этот дебит должен превышать заданный постоянный дебит возмущения Q на величину прироста $\Delta Q_{R_1}(t)$ с тем, чтобы обеспечить приближённое к действительному понижение уровня на стенке «большого колодца». Такой дебит (в общем случае, как и прежде, переменный) равен:

$$Q_1(t) = Q + \Delta Q_{R_1}(t). \quad (14)$$

Тогда уравнение для понижения пьезометрического уровня на стенке «большого колодца» (а также при $l(t) \geq r \geq R$ в первом приближении) приобретёт следующий вид:

$$S = \frac{Q}{2\pi T} \left[1 + \frac{R}{l(t)} \right] \left[\ln \frac{l(t)}{r} - 1 + \frac{r}{l(t)} \right], \quad (15)$$

в котором в соответствии с принципом суперпозиций и с учётом (13) слагаемое

$$\Delta S_1 = \frac{Q}{2\pi T} \left[\frac{R}{l(t)} \left[\ln \frac{l(t)}{r} - 1 + \frac{r}{l(t)} \right] \right] \quad (16)$$

как раз и определяет составляющую понижения пьезометрического уровня за счёт прироста дебита $\Delta Q_{R_1}(t)$. В уравнениях (15) и (16) все обозначения прежние.

Вновь вычислим величину прироста дебита возмущения теперь уже от величины ΔQ_{R_1} (заданной на возмущающей скважине, помещённой в центр «большого колодца»), на стенке этого «большого колодца». Подставим для этого уравнение (16) в условие (11), в котором в качестве дебита возмущения на стенке «большого колодца» задается величина $Q_{R_{11}}(t)$, после несложных преобразований полученного выражения имеем:

$$Q_{R_{11}}(t) = Q \left[\frac{R}{l(t)} \left[1 - \frac{R}{l(t)} \right] \right], \quad (17)$$

где по-прежнему $l(t) \geq R$. Величину прироста дебита от действия этой составляющей возмущения $\Delta Q_{R_{11}}$ вычислим, как и в (14), вычтя из ΔQ_{R_1} рассчитанный по формуле (17) дебит $Q_{R_{11}}(t)$:

$$\Delta Q_{R_{11}}(t) = \Delta Q_{R_1} - Q_{R_{11}}(t), \quad (18)$$

откуда после подстановки в (18) выражений из (13) и (17) получаем, что

$$\Delta Q_{R_{11}}(t) = Q \left[\frac{R}{l(t)} \right]^2. \quad (19)$$

Здесь все обозначения прежние.

С учётом того, что

$$Q_{11}(t) = Q_1(t) + \Delta Q_{R_{11}}(t) = Q + \Delta Q_{R_1}(t) + \Delta Q_{R_{11}}(t),$$

где величины прироста дебита ΔQ_{R_1} и $\Delta Q_{R_{11}}$ определяются выражениями (13) и (19), уравнение для понижения пьезометрического уровня на стенке «большого колодца» (и в любой точке водоносного горизонта) во втором приближении приобретёт следующий вид:

$$S = \frac{Q}{2\pi T} \left[1 + \frac{R}{l(t)} + \frac{R^2}{l^2(t)} \right] \left[\ln \frac{l(t)}{r} - 1 + \frac{r}{l(t)} \right], \quad (20)$$

$$l(t) \geq r \geq R.$$

Нетрудно заметить, что полное решение задачи в рамках метода интегральных соотношений представляется в виде ряда

$$S = \frac{Q}{2\pi T} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R^n}{l^n(t)} \right] \left[\ln \frac{l(t)}{r} - 1 + \frac{r}{l(t)} \right], \quad (21)$$

$$l(t) \geq r \geq R,$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$. Это решение обеспечивает вычисление понижения пьезометрического уровня в

любой точке водоносного горизонта в любой момент времени от начала возмущения.

Выполним исследование полученного решения (21) с целью обоснования конечного приближения (т. е. некоторого конечного n), обеспечивающего вычисление распределения понижения пьезометрического уровня ПВ S в водоносном горизонте с достаточной для практических целей точностью. При этом в качестве эталона для сравнения полученного здесь решения выбрано решение из работы О.Н. Харина [11], которое, как отмечалось ранее, должно представлять закономерности распределения пьезометрического уровня ПВ в любой точке водоносного горизонта в любой момент времени после пуска «укрупнённой скважины». Для этого решения в [11] выполнено сопоставление его с точными решениями из [17, 18], показавшее, что решение О.Н. Харина обеспечивает вычисление понижения пьезометрического уровня в водоносном горизонте с максимальной относительной погрешностью, не превышающей 3 %, в интервале значений безразмерного параметра $1 \leq \frac{\chi t}{R^2} \leq 1,2$. За

пределами этого интервала относительные погрешности вычислений заметно меньше 1%.

Для малых моментов времени от начала возмущения (или для значений безразмерного параметра $\frac{\chi t}{r^2} \leq 1$ в [11] приведённое понижение пьезометрического уровня предлагается вычислять по формуле:

$$\frac{4\pi TS}{Q} \cong 4\sqrt{\frac{\chi t}{\bar{r}R^2}} \left\{ \operatorname{ierfc} \frac{\bar{r}-1}{2\sqrt{\frac{\chi t}{R^2}}} - \sqrt{\frac{\chi t}{R^2}} \frac{3\bar{r}+1}{4\bar{r}} i^2 \operatorname{erfc} \frac{\bar{r}-1}{2\sqrt{\frac{\chi t}{R^2}}} + \right. \\ \left. + \frac{\chi t}{R^2} \frac{33\bar{r}^2+6\bar{r}+9}{32\bar{r}^2} i^3 \operatorname{erfc} \frac{\bar{r}-1}{2\sqrt{\frac{\chi t}{R^2}}} - \dots \right\}, \quad (22)$$

где все обозначения прежние. Уравнение (22) является приближённым в силу того, что оно ограничено только тремя слагаемыми в его правой части.

Несложные преобразования (22) позволяют представить его в виде, удобном для вычислений приведённого понижения пьезометрического уровня на стенке «большого колодца» [11], т. е. при $\bar{r} = 1$, с учётом уточнения коэффициента при третьем слагаемом знакопеременного ряда в (22):

$$\frac{4\pi TS}{Q} \cong \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\chi t}{R^2}} - \frac{\chi t}{R^2} + \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{\chi t}{R^2}. \quad (23)$$

Для относительно больших моментов времени от начала возмущения (т. е. для значений безразмерного параметра $\frac{\chi t}{R^2} \geq 1$, как указано в [11]),

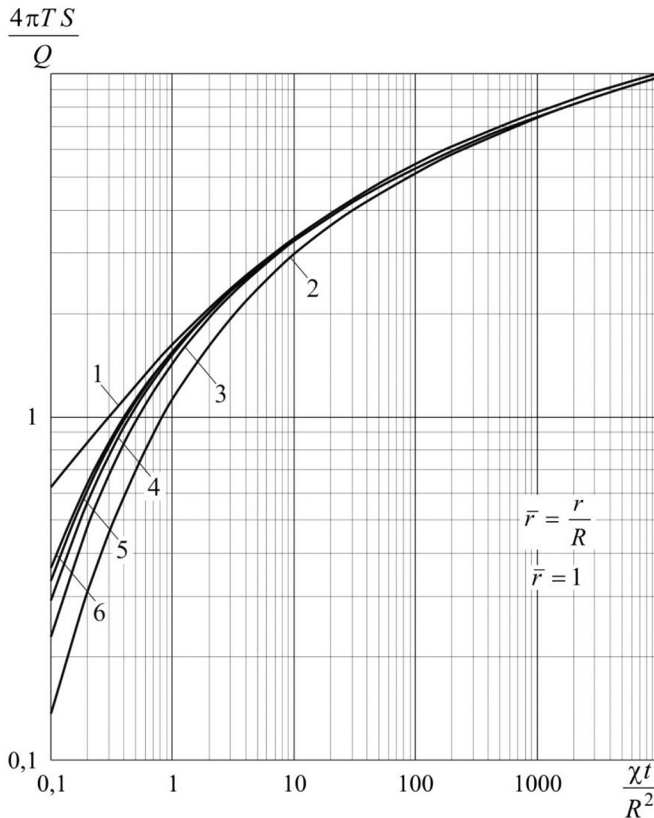


Рис. 2. Графики изменения значений приведённого понижения пьезометрического уровня, отвечающие решению О.Н. Харина (1), приближённым решениям по методу интегральных соотношений для «большого колодца» по формулам из (9) — (2), по формулам из (21) — для первого (3), второго (4), третьего (5) и четвёртого (6) приближения

приведённое понижение пьезометрического уровня в [11] предлагается рассчитывать по формуле, вытекающей из (22) с учётом рекуррентных соотношений для $i^n \operatorname{erfc} u$ [9]:

$$\frac{4\pi TS}{Q} = \left[E_1 \left(\bar{r}^2 \frac{R^2}{4\chi t} \right) + \frac{R^2}{2\chi t} \exp \left(-\bar{r}^2 \frac{R^2}{4\chi t} \right) \left(\ln \frac{4\chi t}{R^2} - \ln \bar{r} - 0,07722 \right) \right], \quad (24)$$

где все обозначения прежние.

Результаты вычислений приведённого понижения пьезометрического уровня на стенке «большого колодца» (при $\bar{r} = 1$) по формулам в (23), как эталона для сравнения, по формуле (10) и по формуле (21) для значений $n = 1, 2, 3$ и 4 (т. е. для четырёх приближений) показаны на рис. 2 в виде графиков в координатах $\lg \frac{4\pi TS}{Q} \left(\lg \frac{\chi t}{R^2} \right)$. В расчётах принималась, как в этом нетрудно убедиться, величина $\frac{\chi t_0}{R^2} = 0,08333$, где t_0 — время достижения областью возмущения от скважины, помещённой в центр «большого колодца», его стенки.

Как следует из рис. 2, расхождения между графиками в области значений $\frac{\chi t}{R^2} \leq 1$ резко сокращаются с возрастанием номера приближения (т. е. с возрастанием показателя степени n в выражении (21)) — от первого к четвёртому, а в области значений этого параметра $\frac{\chi t}{R^2} \geq 6$ эти графики вообще не различаются. Последнее подтверждается графиками изменения относительных погрешностей приведённого понижения пьезометрического уровня $\delta_{\frac{4\pi TS}{Q}} \left(\lg \frac{\chi t}{R^2} \right)$, представленными на рис. 3. Так, для четвёртого приближения уже при $\frac{\chi t}{R^2} \geq 1,0$ относительная погрешность расчётов по формулам этого приближения оказывается меньше 5 %. К примеру, для «большого колодца» радиусом $R = 200$ м, работающего в водоносном горизонте с пьезопроводностью $\chi = 10^4$ м²/сут., указанное условие выполняется спустя $t \cong 4$ сут. от начала возмущения, а для того же «большого колодца», работающего в безнапорном горизонте с уровнепроводностью $\chi = 10^3$ м²/сут. — спустя $t \cong 40$ сут. от начала возмущения.

Вычисления на основе десятого приближения показали практически те же результаты, что и на основе четвёртого; заметные расхождения отмечаются только для малых величин безразмерного параметра $\frac{\chi t}{R^2} \leq 0,3$. Эти расчёты показали также, что

относительные погрешности значений приведённого понижения уровня $\delta_{\frac{4\pi TS}{Q}}$, отвечающие деся-

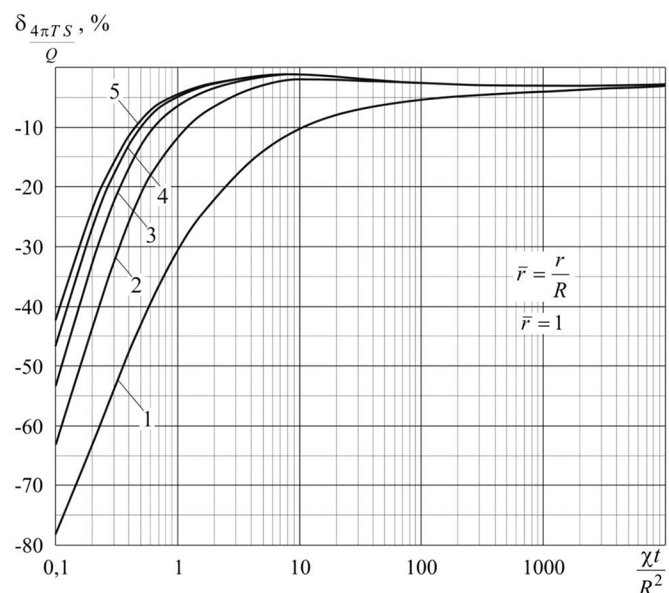


Рис. 3. Графики относительных погрешностей приведённого понижения пьезометрического уровня, вычисленного по методу интегральных соотношений для «большого колодца» по формулам из (9) — (1) и по формулам из (21) для первого (2), второго (3), третьего (4) и четвёртого (5) приближений, по отношению к решению О.Н. Харина

тому приближению, оказываются меньшими 5 % при $\frac{\chi t}{R^2} \geq 1,0$.

Таким образом, для выполнения расчётов с требуемой для практических целей точностью оказывается достаточным ограничиться четвёртым приближением в решении (21), т. е. показателем степени $n = 4$ в этом уравнении.

Это приближённое решение можно уточнить; представим уравнение (21) окончательно в виде:

$$S = \frac{1,032Q}{2\pi T} \left[1 + \sum_{n=1}^4 \frac{R^n}{l^n(t)} \right] \left[\ln \frac{l(t)}{r} - 1 + \frac{r}{l(t)} \right], \quad (25)$$

$$l(t) = \sqrt{12\chi t + R^2}, \quad l(t) \geq r \geq R.$$

Здесь все обозначения прежние.

Соответственно на основе этого четвёртого приближения выполнен анализ достоверности результатов расчётов по уравнениям из (25) приведённого понижения пьезометрического уровня в точках водоносного горизонта, отстоящих от стенки «большого колодца» на расстояниях, кратных его радиусу (например, превышающих его радиус в 2, 5 и 10 раз, т. е. для которых $\bar{r} = 2, 5$ и 10). При этом значения комплексного параметра $\frac{\chi t}{R^2}$, отвечающего времени достижения областью возмущения точек водоносного горизонта, расположенных на указанных относительных расстояниях от центра «большого колодца», составляют соответственно $\frac{\chi t_{0\bar{r}=2}}{R^2} = 0,33333$; $\frac{\chi t_{0\bar{r}=5}}{R^2} = 2,08333$; $\frac{\chi t_{0\bar{r}=10}}{R^2} = 8,33333$ (где $t_{0\bar{r}=2}$; $t_{0\bar{r}=5}$; $t_{0\bar{r}=10}$ и есть те самые величины времени достижения областью возмущения назначенных точек). Результаты расчётов $\frac{4\pi TS}{Q}$ показаны на рис. 4, а; на этом рисунке приведены также и графики приведённого понижения пьезометрического уровня на стенке «большого колодца» (т. е. при $\bar{r} = 1$).

Величины приведённого понижения пьезометрического уровня, отвечающие решению О.Н. Харина [11], на стенке «большого колодца» (при $\bar{r} = 1$) вычислялись для относительно малых значений времени от начала возмущения (т. е. при $\frac{\chi t}{R^2} \leq 1$)

по формуле (23), а для больших (при $\frac{\chi t}{R^2} \geq 1$) — по формуле (24). На рисунке отчётливо видно, что вычисления по формуле (23) дают величину $\frac{4\pi TS}{Q}$,

завышенную по отношению к рассчитанной по методу интегральных соотношений, а по формуле (24) — практически точно совпадающую с рассчитанной по методу интегральных соотношений.

Приведённое понижение пьезометрического уровня при $\bar{r} = 2; 5$ и 10 для малых значений времени от

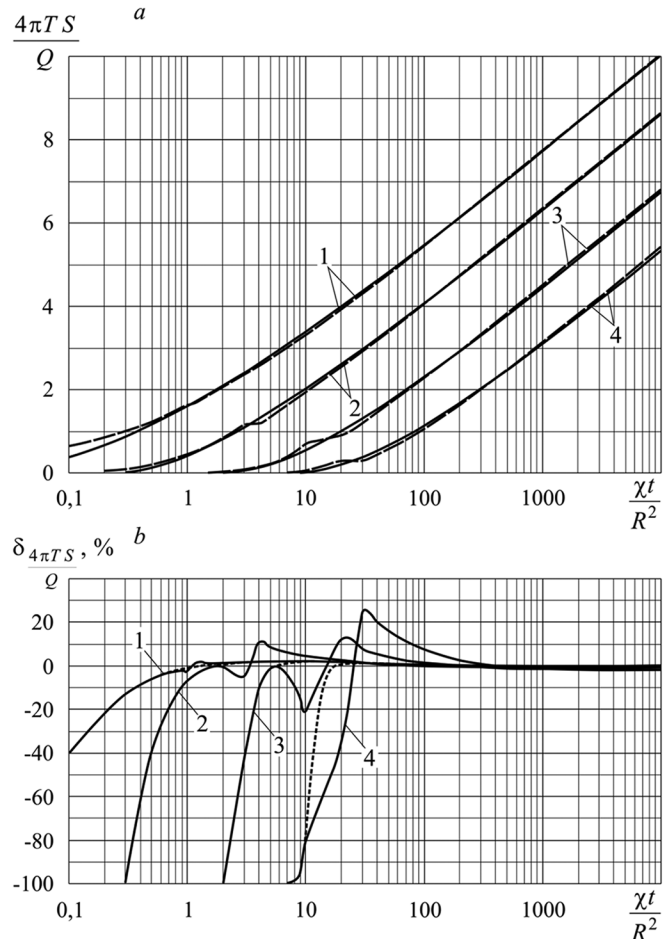


Рис. 4. Графики изменения значений приведённого понижения пьезометрического уровня, отвечающие приближенному решению по методу интегральных соотношений (сплошные линии) и решению О.Н. Харина (пунктирные линии) (а), и графики относительных погрешностей приведённого понижения пьезометрического уровня, вычисленного по методу интегральных соотношений, по отношению к значениям приведённого понижения уровня, рассчитанного по формулам из решения О.Н. Харина (б), для относительных расстояний от центра «большого колодца», равных соответственно $\bar{r} = 1$ (1), $\bar{r} = 2$ (2), $\bar{r} = 5$ (3) и $\bar{r} = 10$ (4)

начала возмущения (соответственно при $\frac{\chi t}{R^2} \leq 3$;

$\frac{\chi t}{R^2} \leq 10$ и $\frac{\chi t}{R^2} \leq 20$) вычислялось по формуле (22), а для больших — по той же формуле (24). Здесь на графиках $\frac{4\pi TS}{Q} \left(\lg \frac{\chi t}{R^2} \right)$ на рис. 4, а для значений

$\bar{r} = 2; 5$ и 10 еще более отчётливо, чем для значения приведённого радиуса $\bar{r} = 1$, наблюдаются расхождения между величинами $\frac{4\pi TS}{Q}$, рассчитанными

по формуле (22), в области значений приведённого параметра $\frac{\chi t}{R^2}$, в которой кривые, отвечающие

уравнению (24), в соответствии с решением О.Н. Харина [11] должны сшиваться. Соответственно приближённое решение по методу интегральных соотношений в области относительно малых зна-

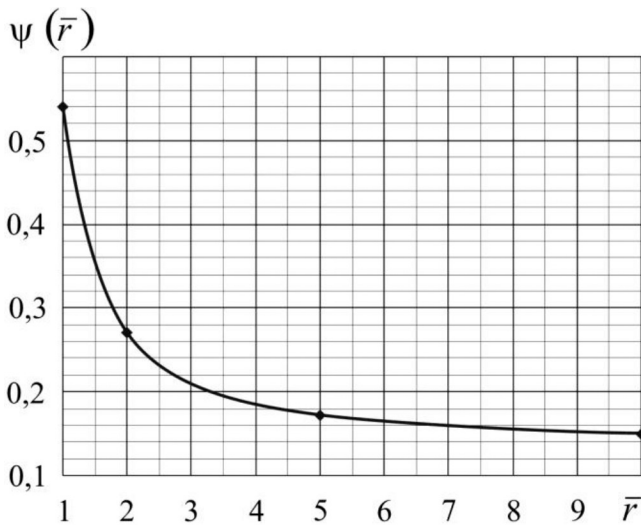


Рис. 5. Графики изменения численного параметра $\psi(\bar{r})$ в критерии (26)

чений времени от начала возмущения (т. е. при относительно малых значениях безразмерного параметра $\frac{\chi t}{R^2}$) обеспечивает некоторое занижение рассчитанных величин приведённого понижения пьезометрического уровня, а при относительно больших значениях времени (т. е. при относительно больших значениях $\frac{\chi t}{R^2}$) — наоборот, завышение.

В некоторой ограниченной области значений указанного безразмерного параметра отмечается практически точное совпадение величин приведённого понижения пьезометрического уровня, вычисленных на основе приближённого решения по методу интегральных соотношений и на основе решения О.Н. Харина [11]. Далее, с возрастанием параметра $\frac{\chi t}{R^2}$, расчёты по методу интегральных

соотношений вновь обеспечивают некоторое занижение значений приведённого понижения пьезометрического уровня с относительной погрешностью по отношению к вычислениям на основе решения О.Н. Харина, не превышающей 5 %.

Все изложенное иллюстрируют графики относительных погрешностей приведённого понижения пьезометрического уровня $\delta_{\frac{4\pi TS}{Q}}$, вычисленно-

го по методу интегральных соотношений, представленные на рис. 4, б. На этом рисунке пунктиром показаны сглаженные кривые, исключаяющие «всплески» величин относительных погрешностей, обусловленные сшивкой двух ветвей решения О.Н. Харина [11], по отношению к которому эти погрешности вычислялись.

С учётом этих графиков обоснован критерий применимости приближённого решения вида (25), позволяющий вычисление критического времени,

по истечении которого приведённые понижения пьезометрического уровня вычисляются на основе приближённого решения по методу интегральных соотношений, с относительной погрешностью по отношению к вычислениям на основе решения О.Н. Харина, не превышающей 5 %. Так, на рис. 5 показан график $\psi(\bar{r})$, где $\psi(\bar{r})$ — некоторый численный параметр, функционально зависящий от приведённого расстояния до наблюдательной скважины. Как следует из этого графика, величина $\psi(\bar{r})$ закономерно уменьшается с возрастанием приведённого расстояния $\bar{r}$ до точки в водоносном горизонте, в которой вычисляется (или измеряется) понижение уровня ПВ, при этом максимальное значение параметра $\psi(\bar{r})$ зафиксировано при $\bar{r} = 1 - \psi|_{\bar{r}=1} = 0,54$ — именно это значение и следует принять в критерии. Соответственно критерий применимости уточнённого приближённого решения по методу интегральных соотношений приобретает следующий вид:

$$0,54 \frac{r^2}{\chi} \leq t_K, \quad (26)$$

где все обозначения прежние.

Так, в частности, как и в предыдущем примере, для «большого колодца» радиусом $R = 200$ м, работающего в водоносном горизонте с пьезопроводностью $\chi = 10^4$ м²/сут., условие (26) выполняется спустя $t_K \approx 2,16$ сут. от начала возмущения. Для «большого колодца» тем же радиусом $R = 200$ м, но работающего в безнапорном водоносном горизонте с уровнепроводностью $\chi = 10^3$ м²/сут., условие (26) выполняется спустя уже $t_K \approx 21,6$ сут. от начала возмущения. Величина контрольного времени $t_K \approx 21,6$ сут. представляется на первый взгляд довольно значительной. Однако это, во-первых, не то $t_K \approx 4000$ сут., которое следует из условия (6) для «большого колодца». А, во-вторых, для водоприёмных систем большого диаметра, продолжительность работы которых исчисляется, по крайней мере, первыми годами, контрольное время $t_K \approx 21,6$ сут. представляется весьма незначительным. При такой его величине появляется возможность прогнозирования изменения распределения понижения уровня ПВ в эксплуатируемом (или дренируемом) водоносном горизонте на всём протяжении возмущения с шагом по времени не менее 21—22 сут.

Выводы

Итак, в настоящей работе представлено приближённое (в рамках метода интегральных соотношений Г.И. Баренблатта) решение задачи фильтрации ПВ к водоприёмной системе большого диаметра при возмущении напорного водоносного горизонта этой системой с постоянным дебитом. Это решение имеет несоизмеримо большую область приложений в сравнении с традиционно ис-

пользуемым в гидрогеологической практике методом «большого колодца». Оно обеспечивает базовую модель для обоснования приближённых решений задачи притока ПВ к водоприёмным системам, развивающимся в плане и на глубину. В этом

состоит очевидное отличие (и преимущество) представленного в настоящей работе авторского приближённого решения по сравнению с сопоставляемыми решениями задачи о притоке флюидов (нефти и газа) к «укрупнённым скважинам».

ЛИТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г.И. О некоторых приближённых методах в теории одномерной неустойчивой фильтрации жидкости при упругом режиме // Известия АН СССР. Отделение технических наук. 1954. № 9. С. 35–49.
2. Боcheвер Ф.М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1968. 328 с.
3. Боcheвер Ф.М., Веригин Н.Н. Методическое пособие по расчётам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. М.: Госстройиздат, 1961. 199 с.
4. Бураков М.М. Исследование водоотбора в неоднородных по фильтрационным и емкостным свойствам водоносных пластах (на примере месторождений Центрального Казахстана). Автореф. дис.... канд. геол.-мин. наук. Алма-Ата, 1987. 25 с.
5. Самсонов Б.Г. Приток подземных вод к разведочным горным выработкам. М.: Недра, 1991. 160 с.
6. Самсонов Б.Г., Рогожина М.А. Расчет предельного водопритока в развивающуюся подземную горную выработку // Экспресс-информация. Гидрогеология и инженерная геология. М.: ВИЭМС, 1983. Вып. 4. С. 1–8.
7. Самсонов Б.Г., Рогожина М.А. Решение задачи о притоке подземных вод в развивающуюся систему горных выработок эллиптической формы // Экспресс-информация. Гидрогеология и инженерная геология. Отечественный производственный опыт. М.: ВИЭМС, 1986. Вып. 7. С. 1–6.
8. Самсонов Б.Г., Рогожина М.А., Плакида Е.К. Оценка достоверности определения гидрогеологических параметров способом опытно-фильтрационных наблюдений при водоотливе // Экспресс-информация. Гидрогеология и инженерная геология. Отечественный производственный опыт. М.: ВИЭМС, 1986. Вып. 2. С. 1–8.
9. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. М.: Наука, 1979. 832 с.
10. Справочное руководство гидрогеолога / Под ред. В.М. Максимова. М.: Недра, 1967. Т. 1. 592 с.
11. Харин О.Н. Вывод приближённых формул, характеризующих работу укрупнённой скважины с постоянным дебитом в условиях упругого режима // Разработка нефтяных и газовых месторождений и подземная гидродинамика. Труды МИНГ и ГП имени акад. И.М. Губкина. 1964. Вып. 55. С. 41–47.
12. Шестаков В.М. Вопросы терминологии в гидрогеодинамике // Водные ресурсы. 1984. Т. 8. № 5. С. 156–159.
13. Щелкачев В.Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. М.: Гостоптехиздат, 1959. 467 с.
14. Щелкачев В.Н. Исследование неустойчивого фильтрационного потока упругой жидкости к круговой батарее стоков // Доклады АН СССР. 1951. Т. 79. № 4. С. 577–580.
15. Щелкачев В.Н. Уточнение приближённой формулы для определения понижения давления на стенке укрупнённой скважины, пущенной с постоянным дебитом // Подземная гидродинамика. Труды МИНГ и ГП имени акад. И.М. Губкина. 1964. Вып. 33. С. 5–13.
16. Щелкачев В.Н., Влюшин В.Е. Дальнейшее упрощение приближённой формулы для подсчёта понижения давления на стенке укрупнённой скважины, пущенной с постоянным дебитом в условиях упругого режима // Известия ВУЗов. Нефть и газ. 1963. № 7. С. 77–82.
17. Ingersoll L.R., Adler F.T., Plass H.T., Ingersoll A.S. Theory of heat exchangers for the heat pump // Journal of American Society of Heating and Ventilating. 1950. Vol. 22. No. 5. P. 113–123.
18. Van Everdingen A.F., Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs // Petroleum Transactions, AIME. 1949. No. 12. P. 305–324.
19. Theis C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage // Transaction. American Geophysical Union. 1935. Vol. 16. P. 519–524.

REFERENCES

1. Barenblatt G.I. On Some Approximate Methods in the Theory of One-Dimensional Unsteady Fluid Filtration in the Elastic Mode. *Izvestiya AN SSSR. Otdeleniye tekhnicheskikh nauk — News of the Academy of Sciences of the USSR. Department of Technical Sciences*, 1954, no. 9, pp. 35–49. (in Russian).
2. Bochever F.M. *Teoriya i prakticheskiye metody gidrogeologicheskikh raschetov ekspluatatsionnykh zapasov podzemnykh vod* [Theory and Practical Methods of Hydrogeological Calculations of the Operational Groundwater Reserves]. Moscow, Nedra Publ., 1968, 328 p. (in Russian).
3. Bochever F.M., Verigin N.N. *Metodicheskoye posobiye po raschetam ekspluatatsionnykh zapasov podzemnykh vod dlya vodosnabzheniya* [Methodological Manual for Calculating the Operational Reserves of Groundwater for Water Supply]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1961, 199 p. (in Russian).
4. Burakov M.M. *Issledovaniye vodoobora v neodnorodnykh po fil'tratsionnym i yemkostnym svoystvam vodonosnykh plastakh (na primere mestorozhdeniy Tsentral'nogo Kazakhstana). Avtoref. dis. kand. geol.-min. nauk* [Investigation of Water Withdrawal in Aquifers That are Heterogeneous in Terms of Filtration and Capacity Properties (by the Example of Fields in Central Kazakhstan). Dis. abstr. of cand. of geol. and min. sci.]. Alma-Ata, 1987, 25 p. (in Russian).
5. Samsonov B.G. *Pritok podzemnykh vod k razvedochnym gornym vyrobokam* [Groundwater Inflow to Exploration Workings]. Moscow, Nedra Publ., 1991, 160 p. (in Russian).
6. Samsonov B.G., Rogozhina M.A. *Raschet predel'nogo vodopritoka v razvivayushchuyusa podzemnyu gornuyu vyroboku. Ekspress-informatsiya. Gidrogeologiya i inzhenernaya geologiya* [Calculation of the Marginal Water Inflow in the Developing Underground Mining Development. Express Information. Hydrogeology and Engineering Geology]. Moscow, VIEMS Publ., 1983, Vol. 4, pp. 1–8. (in Russian).
7. Samsonov B.G., Rogozhina M.A. *Resheniye zadachi o pritoke podzemnykh vod v razvivayushchuyusa sistemu gornyykh vyrobokov ellipticheskoy formy. Ekspress-informatsiya. Gidrogeologiya i inzhenernaya geologiya. Otechestvennyy proizvodstvennyy opyt* [Solution of the Problem of Groundwater Inflow into the Developing System of Mine Workings of Elliptical Form. Express Information. Hydrogeology and Engineering Geology. Domestic Production Experience]. Moscow, VIEMS Publ., 1986, Vol. 7, pp. 1–6. (in Russian).
8. Samsonov B.G., Rogozhina M.A., Plakida E.K. *Otsenka dostovernosti opredeleniya gidrogeologicheskikh parametrov sposobom opytno-fil'tratsionnykh nablyudeniy pri vodootlive. Ekspress-informatsiya. Gidrogeologiya i inzhenernaya geologiya. Otechestvennyy proizvodstvennyy opyt* [Estimation of the Reliability of the Determination of Hydrogeological Parameters by the Method of

- Experimental Filtration Observations with a Watering Factor. Express Information. Hydrogeology and Engineering Geology. Domestic Production Experience]. Moscow, VIEMS Publ., 1986, vol. 2, pp. 1–8. (in Russian).
9. *Spravochnik po spetsial'nykh funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami* [Handbook of Special Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables]. Ed. M. Abramowitz, I. Stegun. Moscow, Nauka Publ., 1979, 831 p. (in Russian).
 10. *Spravochnoye rukovodstvo gidrogeologa* [Reference Guide Hydrogeologist]. Ed. V.M. Maximov. Moscow, Nedra Publ., 1967, vol. 1, 592 p. (in Russian).
 11. Kharin O.N. [Derivation of Approximate Formulas Characterizing the Operation of an Enlarged Well with a Constant Flow Rate in the Conditions of an Elastic Mode]. *Trudy MING i GP imeni akad. I.M. Gubkina «Razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy i podzemnaya gidrodinamika»* [Proc. of the MING and GP named Acad. I.M. Gubkin «Development of Oil and Gas Fields and Underground Hydrodynamics»], 1964, Vol. 55, pp. 41–47. (in Russian).
 12. Shestakov V.M. Terminology Issues in Hydrogeodynamics. *Vodnyye resursy — Water Resources*, 1984, Vol. 8, No. 5, pp. 156–159. (in Russian).
 13. Schelkachev V.N. *Razrabotka neftevodonosnykh plastov pri uprugom rezhime* [Development of Oil Reservoirs in the Elastic Mode]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1959, 467 p. (in Russian).
 14. Schelkachev V.N. Investigation of the Unsteady Filtration Flow of an Elastic Fluid to a Circular Battery of Sewers. *Doklady AN SSSR — Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1951, Vol. 79, no. 4, pp. 577–580. (in Russian).
 15. Schelkachev V.N. Refinement of the Approximate Formula for Determining the Pressure Drop on the Wall of an Enlarged Well, Fired with a Constant Flow Rate. *Trudy MING i GP imeni akad. I.M. Gubkina «Podzemnaya gidrodinamika»* [Proc. of the MING and GP named Acad. I.M. Gubkin «Underground Fluid Dynamics»], 1964, Vol. 33, pp. 5–13. (in Russian).
 16. Schelkachev V.N., Vlyushin V.E. Further Simplification of the Approximate Formula for Calculating the Pressure Drop on the Wall of an Enlarged Well Put Into Operation With a Constant Flow Rate in an Elastic Mode. *Izvestiya VUZov. Neft' i gaz — News of Universities. Oil and Gas*, 1963, no. 7, pp. 77–82. (in Russian).
 17. Ingersoll L.R., Adler F.T., Plass H.T., Ingersoll A.S. Theory of heat exchangers for the heat pump. *Journal of American Society of Heating and Ventilating*, 1950, vol. 22, no. 5, pp. 113–123.
 18. Van Everdingen A.F., Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. *Petroleum Transactions, AIME*, 1949, no. 12, pp. 305–324.
 19. Theis C.V. The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground-Water Storage. *Transactions. American Geophysical Union*, 1935, vol. 16, pp. 519–524.

УДК 624.131.1

ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ УГЛОВ ЗАЛОЖЕНИЯ ОТКОСОВ КАРЬЕРА С УЧЁТОМ АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ И ТРЕЩИНОВАТОСТИ СКАЛЬНОГО МАССИВА (на примере Стойленского железорудного месторождения КМА)*

Л.А. ЯРГ¹, И.К. ФОМЕНКО¹, О.М. ЖИТИНСКАЯ²

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., Москва 117997, Россия

²Старооскольский филиал ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет»
14/13, Ленина ул., Старый Оскол 309530, Россия
e-mail: gonjarova_o@mail.ru

Разработка Стойленского железорудного месторождения открытым способом на протяжении 50 лет, сопровождающаяся извлечением огромных масс горных пород и руд, кардинально изменяет напряженно-деформационное состояние массива и формирование техногенного водоносного горизонта. Длительная эксплуатация карьера вызывает возникновение инженерно-геологических процессов: осыпей, обвалов, оползней, оплывин, суффозий. Развитие процессов, инициируемое технологическими работами, носит прогрессирующий характер в пространственно-временном отношении. Решение вопросов устойчивости бортов карьера, обеспечивающих безаварийное ведение горнодобывающих работ при длительной разработке месторождения, базируется на современной методологии расчёта. Предлагается алгоритм оптимизации углов заложения откосов Стойленского карьера и расчёт коэффициента устойчивости различными методами с учётом трещиноватости скального массива на основе использования критерия анизотропии прочности пород.

Ключевые слова: природно-техническая система; месторождение; карьер; откос; процессы; анизотропия; трещиноватость; устойчивость; модель.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-4-67-77

THE ANGLES OPTIMIZATION ALGORITHM OF SLOPES LAYING ON IRON ORE OPEN CAST MINE CONSIDERING ANISOTROPY OF STRENGTH PROPERTIES AND FRACTURE DENSITY OF THE SOLID ROCK (on the example of Stoylensky iron ore open cast mine at Kursk Magnetic Anomaly)

L.A. YARG¹, I.K. FOMENKO¹, O.M. ZHITINSKAYA²

¹*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklouho-Maklay's street, Moscow 117997, Russia*

²*Starooskolsky branch of the Russian State Geological Prospecting University
14/13 Lenina st., the city of Stary Oskol 309514, Belgorod region, Russia
e-mail: gonjarova_o@mail.ru*

The development of Stoylensky iron ore opencast mine during the 50 years is accompanied by the extraction of huge masses of rocks and ores, that radically changes the stress-strain state of the array and the formation of a technogenic aquifer. The long-term quarry exploitation has a result of progressive development of engineering-geological processes: scree, landslides, creeps, suffusion. The development of processes initiated by technological works has a progressive space-time character. The solution of problem of the open pit slope stability which provides accident-free conducting of mining operations at long-term development of the field, is based on modern methodology of calculations. The angles optimization algorithm of slopes staking on Stoylensky iron ore open cast mine and the calculation of the coefficient of stability by different methods with the consideration of the anisotropy of strength properties and fracture density of the solid rock, have been suggested.

Key words: natural-technological system; field; quarry; slopes; processes; anisotropy; model; stability; fracture density; properties.

Стойленское месторождение КМА разрабатывается с 1969 г. открытым способом. Размеры карьера (по дневной поверхности) составляют около 2,3×2,5 км. Сегодня глубина Стойленского карьера достигла 350 м, проектная глубина — 475 м. Длительная эксплуатация ПТС «Стойленский ГОК» (50 лет) привела к изменению компонентов природной среды [2].

Одним из основных факторов при оптимизации системы риск—экономическая эффективность является согласование параметров разработки МПИ с его инженерно-геологическими условиями, главным образом, это связано с оценкой устойчивости бортов карьеров.

Цель работы: обеспечение устойчивости откосов глубокого заложения в сложных инженерно-геологических условиях.

Задачи исследования:

1. Установление тенденций изменения компонентов инженерно-геологических условий при длительном функционировании природно-технической системы (ПТС) МПИ.

2. Обоснование параметров и геомеханических моделей расчёта устойчивости бортов карьера с учётом основных причин и условий, определяющих развитие процессов и обуславливающих перманентного изменения состояния горного массива.

3. Расчёты устойчивости борта карьера и оценка различных факторов (блочность массива, прочность породы в массиве) на полученные результаты.

Геологическое строение. В геолого-структурном отношении Курская магнитная аномалия находится в сводовой части Воронежской антеклизы — крупной положительной структуры Русской платфор-

мы и приурочен к юго-западному склону Воронежского кристаллического массива и северо-восточной окраине Днепровско-Донецкой впадины [1].

Месторождения Лебединское и Стойленское расположены в центральной части северо-восточной полосы КМА. В геологическом строении месторождений принимают участие два структурных комплекса: нижний — кристаллический фундамент, представленный сложнодислоцированными метаморфизованными кристаллическими породами докембрия, и верхний — осадочный чехол, трансгрессивно перекрывающий кристаллические породы и сложенный горизонтально залегающими отложениями палеозоя, мезозоя и кайнозоя [6].

Фундамент представлен комплексом метаморфических пород докембрия: железорудной коробковской и подстилающей её стойленской свитой (мощностью 159—500 м), представленной кварцито-песчаниками с прослоями сланцев. Основные типы руд — магнетитовые 43% и силикатно-магнетитовые 34%. Минеральный состав неокисленных кварцитов, %: магнетит 37,7, гематит 31, силикаты 25, сидерит 3, пирит 0,2, кварц 29. Физико-механические свойства: плотность 3,44 г/см³, пористость 4%, влажность 3%, коэффициент крепости по шкале Протодьяконова 12—16 [1].

Рельеф докембрийского массива отличается большей сложностью. Сбросы, возникшие в процессе образования Днепровско-Донецкой впадины, обусловили наличие уступов и глубоких ложбин. В результате тектонических движений породы протерозойского комплекса смяты в сложную систему антиклинальных и синклинальных скла-

док преимущественно северо-западного простирания с крутым (60—90°) падением крыльев. Интенсивная складчатость докембрийских образований обусловила крутое, нередко вертикальное залегание рудных пластов.

Сложноскладчатый рудно-кристаллический фундамент разбит крупными тектоническими нарушениями различного порядка. Западный региональный разлом и тектонические нарушения I и II порядка протяженностью от 1000 до нескольких сотен метров. Разрывные нарушения крутопадающие (65—85°). Зоны тектонических нарушений, представляющие собой зоны дробления, расщепления с глиной трения, сопровождаются зонами повышенной трещиноватости. Расстояния между зонами нарушений колеблется от 30 до 150 м. Системы трещин и разломов расчленяют рудно-кристаллический массив на блоки. По степени структурной нарушенности массив характеризуется как крупно—среднеблочный, кора выветривания — как мелкоблочная [6]. Широкое распространение имеют межпластовые и секущие дайки, а также жилы диорит-порфиринов и гранитов, мощностью 10—20 см.

Докембрийский кристаллический массив трансгрессивно перекрыт осадочным чехлом: четвертичными песчано-глинистыми отложениями, мергельно-меловой формацией турон-коньяк-сантонского яруса, плотными неоднородными по гранулометрическому составу песками альб-сеноманского яруса, юрско-неокомскими песчано-алевритистыми и глинистыми отложениями девона. Мощность осадочного чехла 150—180 м [1].

Наличие четырёх водоносных горизонтов: рудно-кристаллического, альб-сеноманского, турон-коньякского, четвертичного определяет сложность условий разрабатываемых месторождений. Осушение Лебединского и Стойленского карьеров осуществляется комбинированным способом с применением подземного дренажного комплекса, перехватывающего основную часть потока подземных вод за пределами штреков на альб-сеноманский и лучевые скважины на рудно-кристаллический водоносные горизонты, и внутрикарьерного дренажного комплекса: дренажные каналы, горизонтальные дренажные скважины [12]. Суммарный водоприток по контуру карьера достигает 7000 м³/с и меняется по контуру карьера, вследствие неравномерной трещиноватости мергельно-меловой толщи.

Работа дренажной сети привела к образованию депрессионной воронки, диаметром 11 км и глубиной 40 м [12]. Понижение напоров подземных вод на больших площадях и многократное увеличение мощности зоны аэрации, появление новых областей питания и разгрузки водоносных пластов; увеличение степени взаимосвязи поверхностных и подземных вод обуславливают форми-

рование техногенного режима подземных вод. Изменение гидрогеологических условий в процессе добычи руд (возникновение градиентов напора и резкое возрастание скоростей фильтрации; изменение интенсивности инфильтрационного питания подземных вод; усиление взаимосвязи между водоносными горизонтами посредством перетекания) перманентно провоцируют возникновение горно-геологических процессов в бортах карьера.

В прибортовых участках пород с изменённым напряжённым состоянием развиваются инженерно-геологические процессы: осыпание, обрушение, оползание, поверхностная эрозия, механическая, химическая суффозия: фильтрационные деформации. Одним из наиболее важных вопросов разработки МПИ открытым способом является оценка устойчивости бортов карьера. Выбор оптимальных параметров заоткоски уступов и выбор генерального угла наклона борта карьера оказывают влияние на технико-экономические показатели отработки месторождения и безопасность горных работ.

Борта карьера месторождений на *конечных контурах* формируются в толще пород осадочного чехла и пород рудно-кристаллического фундамента. Карьерное поле характеризуют следующие параметры: суммарная длина фронта карьера, рельеф поверхности карьера, уступы: их число, высота и угол заложения, бермы, отвалы.

Методика исследований. Оптимизация функционирования ПТС МПИ базируется на современной методологии расчётов бортов карьера и включает: 1) *выделение инженерно-геологических комплексов* (ИГК), различающихся горно-геологическими условиями и механизмом формирования процессов; 2) *инженерно-геологическую типизацию* бортов карьера с учётом состава и свойств горных пород, динамики техногенного водоносного горизонта; 3) *выбор расчётных параметров* для численного прогнозирования состояния откосов карьера; 4) *обоснование геомеханических моделей* расчёта устойчивости бортов карьера с учётом основных причин и условий, определяющих механизм развития процессов; 5) *реализацию геомеханических моделей* путем компьютерного моделирования.

Закономерности изменчивости компонентов инженерно-геологических условий являются основанием для установления предельных значений параметров ПТС «Стойленское месторождение», при котором длительно функционирующая система не выходит за пределы (границы) области допустимых состояний. Это предусматривает оценку коэффициента устойчивости (K_u) бортов карьера при техногенном изменении состояния и прочностных свойств пород, слагающих борта, в процессе извлечения полезного ископаемого (разработки карьера).

С точки зрения структуры локальной ПТС «Карьер» борта карьера на конечных контурах формируются в толще пород осадочного чехла и рудно-кристаллического фундамента.

Авторами оценена устойчивость бортов карьера, сформированных в толще рудно-кристаллических пород.

Обоснование геомеханических моделей расчёта устойчивости бортов карьера. Для толщи рудно-кристаллических пород, сложенной скальными породами мощностью до 600 м параметрами, необходимыми для расчёта, являлись следующие: плотность ρ , г/см³; сцепление C , МПа; угол внутреннего трения φ° ; с учётом анизотропии пород в массиве; трещиноватость и ориентировка по отношению к бортам карьера; блочность массива; также при расчетах методом конечных элементов — деформационные характеристики — модуль упругости E , МПа и коэффициент Пуассона μ .

Разрывные нарушения, являющиеся продольными относительно складчатости, расчленяют рудно-кристаллическую толщу на блоки пластинчатой и клиновидной форм, шириной 200—460 м. Падение разрывных нарушений крутое до субвертикального (70—90°). Разрывные нарушения представляют собой зоны дробления и рассланцевания с глиной трения; их мощность от 0,5 до 5—7 м.

В массиве докембрия прослеживаются следующие системы трещин [6]: напластования по слоистости (полосчатости) северо-восточного и юго-западного падения, азимут падения 310—320°, угол падения 60—85°, среднее расстояние между трещинами 0,7 м; продольной относительно складчатости субпараллельные простиранию пород, угол падения 10—30°, среднее расстояние между трещинами 0,85 м; поперечной относительно складчатости субортогональные простиранию трещин напластования, система трещин крутопадающая 60—85°, среднее расстояние между трещинами 1,0 м; крутопадающие разрывные нарушения не являются потенциальными поверхностями скольжения, а деформации уступов могут происходить по неблагоприятно ориентированным системам трещин.

Анизотропия свойств прочностных свойств пород массива обусловлена наличием «зон ослабления» — дробления и рассланцевания, брекчирования, дизъюнктивных нарушений с глиной трения. Поэтому точечные испытания не моделируют поведение массива горных пород в целом, т. е. результаты лабораторных испытаний образцов керна пород не характеризуют прочность и упругость горного массива. Влияние трещиноватости, слоистости и других структурных особенностей приводит к тому, что прочность и модуль упругости могут на порядок быть меньше соответствующих величин. Для перехода от свойств образца к свойству пород в массиве используют коэффициенты структурного ослабления. При количественной оценке

трещиноватости используют ряд параметров: модуль трещиноватости (M_t), модуль кусковатости (M_k), показатель нарушенности пород (RQD), коэффициент зон дробления ($K_{з.д.}$). В зарубежной практике при расчётах устойчивости скальных склонов и уступов для уточнения расчетных прочностных параметров широко применяются критерии прочности Хоека-Брауна и Бартон-Бандиса [15, 20].

В данном исследовании для скальных грунтов была использована анизотропная модель прочности, включающая три направления с различными прочностными свойствами:

скальных грунтов массива в продольном направлении относительно складчатости, субпараллельно простиранию трещинам с углами падения 10—30°;

скальных грунтов в поперечном направлении относительно складчатости направлении, субортогонально простиранию трещин напластования, система трещин крутопадающая 60—85°;

скальных грунтов в массиве (приняты для сильно трещиноватых пород).

Оптимизация функционирования ПТС МПИ базируется на современной методологии расчёта устойчивости бортов карьера [7, 13, 14, 24].

В горной геомеханике широкое применение нашли варианты расчётов по методам предельного равновесия, конечных элементов и объёмных скальных блоков, позволяющие оценить устойчивость с учётом существующих плоскостей раздела (трещиноватости) [4, 18].

Выбор местоположения и направления расчётных профилей производился исходя из принципа наибольшей опасности (вероятности обрушения борта карьера). «Чаша» карьера может быть условно разделена на зоны условной стабильности и потенциальной нестабильности бортов [11, 21].

Для потенциально нестабильных бортов карьера задача устойчивости может быть решена в плоской постановке при условии, что азимут падения трещин совпадает с азимутом падения борта карьера. Расчёты были выполнены в плоской постановке задачи методами предельного равновесия и конечных элементов [11, 21].

Применение методов предельного равновесия при оценке устойчивости скальных откосов. Для учёта существующих плоскостей раздела (трещиноватости) при оценке устойчивости бортов карьера методами предельного равновесия может быть применён подход с учётом следующих дополнительных положений:

1. Расчёт производится по оптимизированной блоковой поверхности скольжения, которая моделирует направление имеющихся в массиве поверхностей раздела.

2. Задание прочностных характеристик скальных грунтов производится на основе модели анизотропной прочности [3].

Моделирование устойчивости борта карьера, сформированном в толще рудно-кристаллического комплекса пород с использованием методов предельного равновесия выполнено по следующей схеме: в расчёте принят диапазон субгоризонтальных трещин от 10 до 30°, субвертикальных от 60 до 85°. Диаграмма прочностных свойств массива скальных грунтов с учётом их анизотропии, использованная при расчете методами предельного равновесия, приведена на рис. 1.

Результаты расчёта устойчивости борта карьера, приведены на рис. 2.

Результаты расчёта показывают, что коэффициент устойчивости (K_u) борта будет уменьшаться при увеличении угла падения субгоризонтальных трещин (в замеренном диапазоне падений от 10 до 30°) и уменьшении — субвертикальных (в замеренном диапазоне падений от 85 до 60°). Наиболее неблагоприятным является следующее сочетание трещин: субгоризонтальные трещины падают в карьер под углом 30°, субвертикальные — 60°. При этих значениях углов падения систем трещин борт карьера находится в состоянии близком к предельному равновесию (по методам расчета Моргенштерн-Прайса и Бишопа [16, 23]), по методу Янбу [22] — неустойчив.

Применение метода конечных элементов при оценке устойчивости скальных откосов с учётом трещиноватости массива. Метод конечных элементов (МКЭ) наряду с методами конечных разностей является

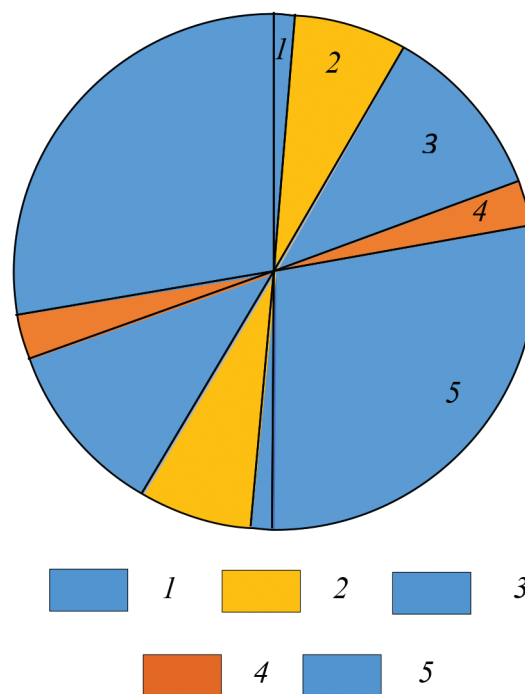


Рис. 1. Диаграмма анизотропии прочностных свойств массива скальных грунтов: 1 — от 90 до 85°; C 690 кПа, ϕ 32°; 2 — от 85 до 60°; C 730 кПа, ϕ 28°; 3 — от 60 до 20°; C 690 кПа, ϕ 32°; 4 — от 20 до 10°; C 510 кПа, ϕ 29°; 5 — от 10 до -90°; C 690 кПа, ϕ 32°

одним из основных численных методов решения задач по оценке устойчивости склонов и откосов в рамках механики сплошной среды [10, 17].

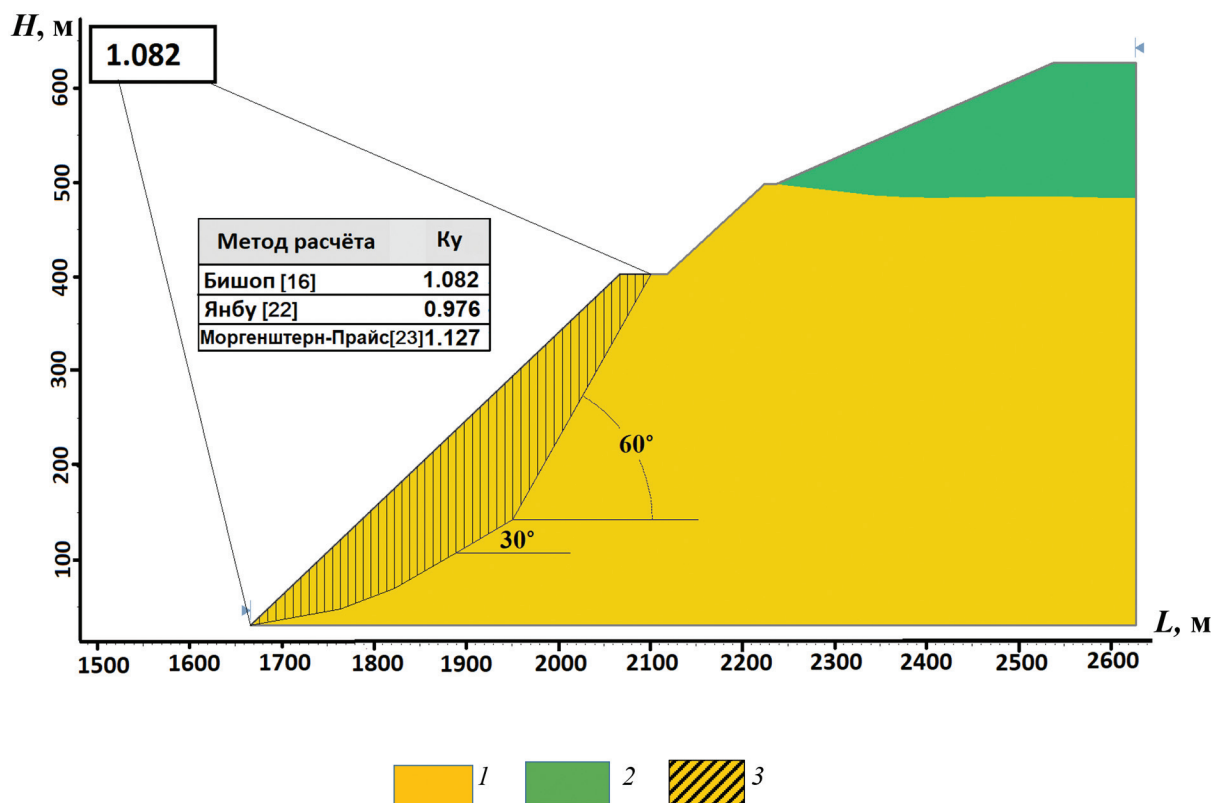


Рис. 2. Модель расчёта устойчивости борта карьера методом предельного равновесия (вариант I): 1 — породы вскрыши, 2 — породы рудно-кристаллического фундамента, 3 — блок смещения пород

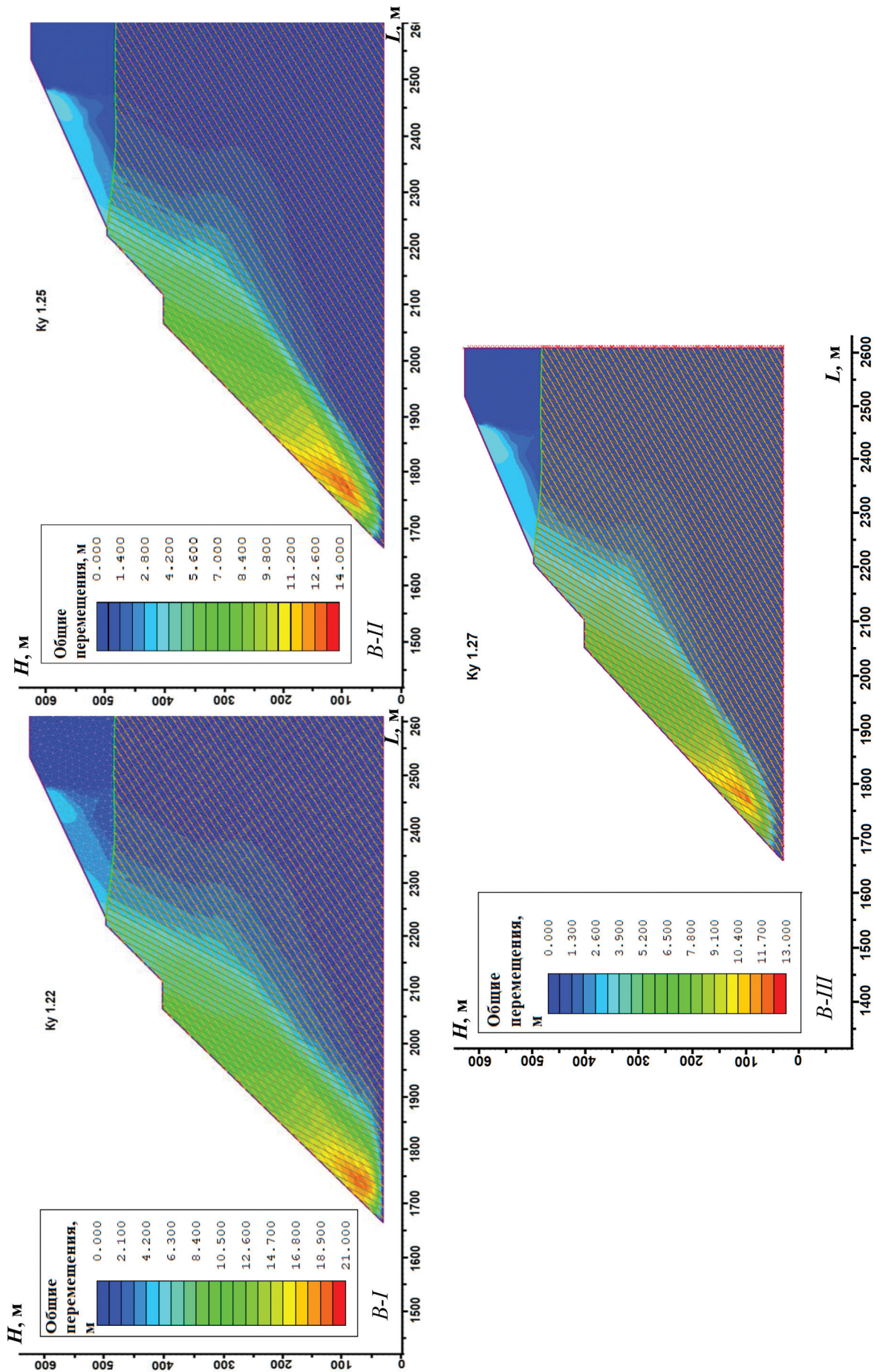


Рис. 3. Варианты расчёта устойчивости борта карьера методом конечных элементов с целью оценки влияния прочности скальных грунтов на коэффициент устойчивости: B-I – массив сложен сильнотрещиноватыми породами с прочностными свойствами: C 690, кПа; ϕ 32°; B-II – массив сложен среднетрещиноватыми породами с прочностными свойствами: C 1130, кПа; ϕ 36°; B-III – массив сложен слаботрещиноватыми породами с прочностными свойствами: C 3140, кПа; ϕ 39°

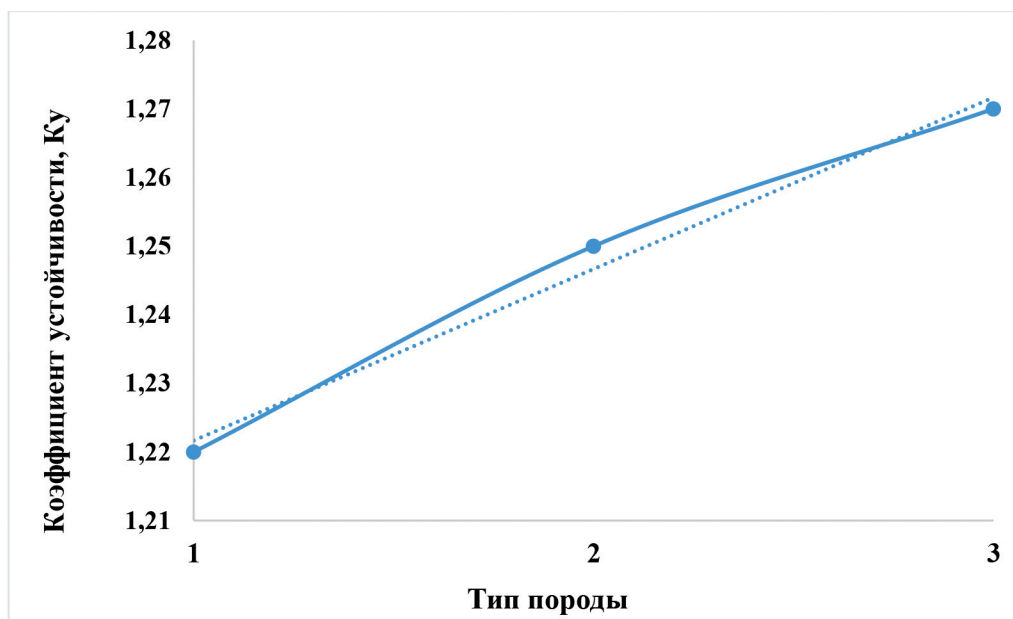


Рис. 4. Влияние прочности рудно-кристаллических пород в массиве на K_u : 1 — сильнотрещиноватые породы с прочностными свойствами: C 690, кПа; ϕ 32°; 2 — среднетрещиноватые породы с прочностными свойствами: C 1130, кПа; ϕ 36°; 3 — слаботрещиноватые породы с прочностными свойствами: C 3140, кПа; ϕ 39°

В МКЭ структурные неоднородности в массиве горных пород, как имитация структуры первичной или вторичной трещиноватости, могут быть смоделированы с использованием особого механизма совместных границ [19]. Последние могут быть заданы для различных статистических или детерминистических моделей и моделируются как зоны, где происходит скачок смещений частей конечно-элементной сетки. Рассматриваемые зоны могут быть представлены как пружины, обладающие нормальной и сдвиговой жёсткостью. Такая формулировка совместных границ позволяет общим узлам конечно-элементной сетки перемещаться один относительно другого, создавая нормальные и касательные деформации. Эта идея берёт свое начало в концепции, заложенной в методе граничных элементов [5].

С использованием механизма совмещенных границ МКЭ оценено влияние на устойчивость борта карьера таких факторов, как прочность пород и блочность скального массива.

Влияние прочности пород в массиве на K_u . Одним из наиболее существенных инженерно-геологических факторов, определяющих устойчивость бортов карьеров в скальных грунтах, принято считать их прочность [8, 9].

С целью оценки значимости данного фактора, методом конечных элементов были выполнены расчёты по следующим вариантам: I — сильнотрещиноватый массив, прочностные свойства пород: C 690 кПа, ϕ 32°; II — среднетрещиноватый массив, прочностные свойства пород: C 1130 кПа, ϕ 36°; III — слаботрещиноватый массив, прочностные свойства пород: C 3140 кПа, ϕ 39°. Расстояние меж-

ду трещинами условно принято постоянным и равным 10 м (рис. 3).

На рис. 4. расположен график зависимости K_u от прочностных свойств скальных грунтов. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что с увеличением прочности грунтов в массиве K_u закономерно возрастает по зависимости, близкой к линейной. Однако расчёты показывают, влияние данного фактора на устойчивость борта карьера незначительно. Увеличение сцепления более чем в 4,5 раза привело к росту K_u на 0,05. Это доказывает, что устойчивость борта карьера в данном случае определяется в первую очередь прочностью по поверхностям ослабления.

Влияние блочности на K_u борта карьера. Существенным инженерно-геологическим фактором, определяющим устойчивость бортов карьеров в скальных грунтах также принято считать блочность массива скальных грунтов.

С целью оценки значимости блочности массива на устойчивость бортов карьера методом конечных элементов были выполнены расчёты по следующим вариантам: I — расстояние между трещинами 10 м (данный вариант расчёта соответствует первому варианту, описанному выше); II — 20 м; III — 7,5 м; IV — 5 м; V — 2,5 м. (рис. 5).

На рис. 6. приведён график зависимости K_u от блочности массива скальных грунтов. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что с увеличением расстояния между трещинами в массиве K_u закономерно растёт по зависимости близкой к логарифмической. Однако расчёты показывают, что влияние данного фактора на устой-

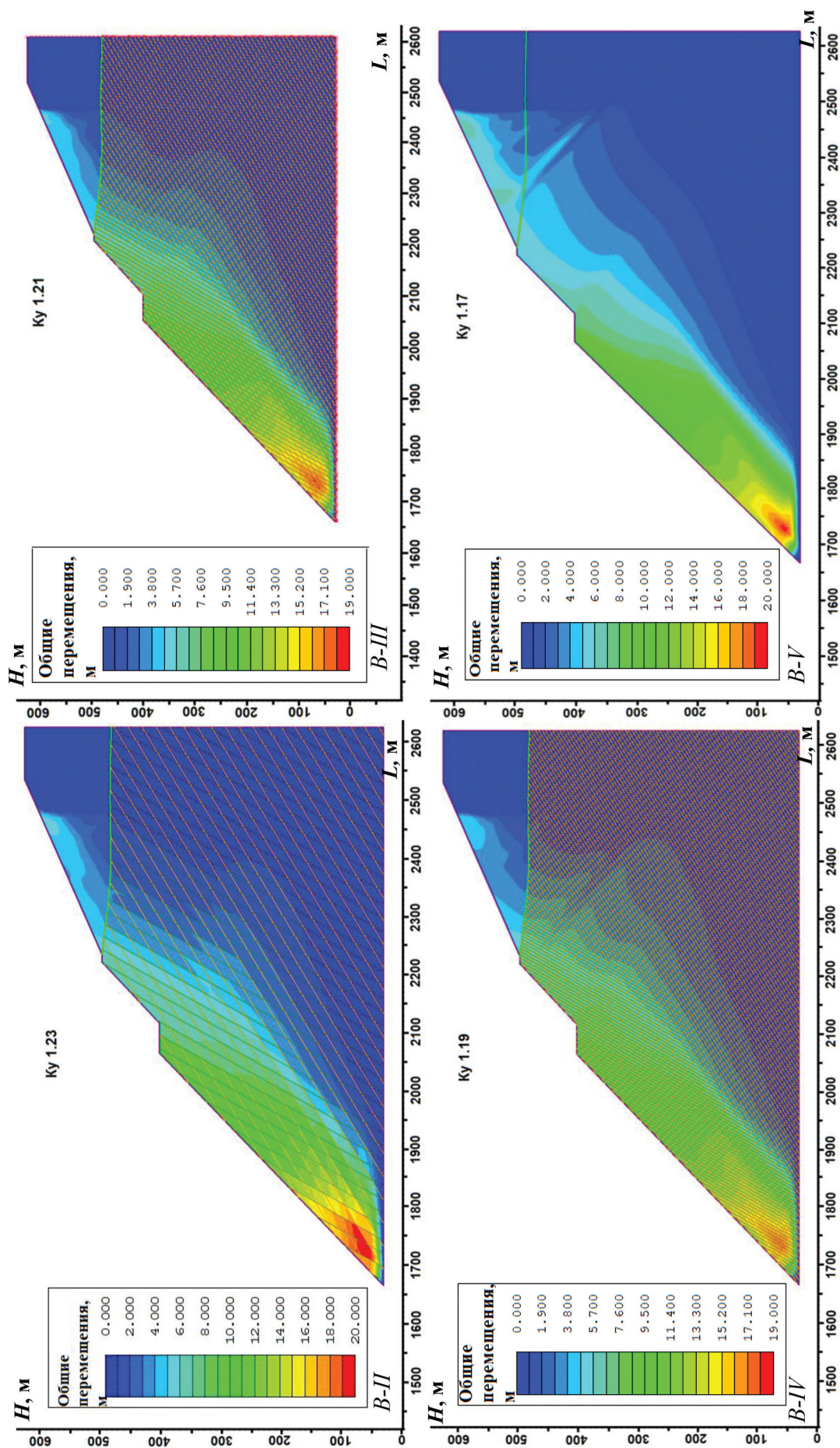


Рис. 5. Варианты расчёта устойчивости борга карьера методом конечных элементов с целью оценки влияния блочности массива скальных грунтов на коэффициент устойчивости, рас-
стояние между трещинами условно принято: B-II – 20 м; B-III – 7,5 м; B-IV – 5 м; B-V – 2,5 м

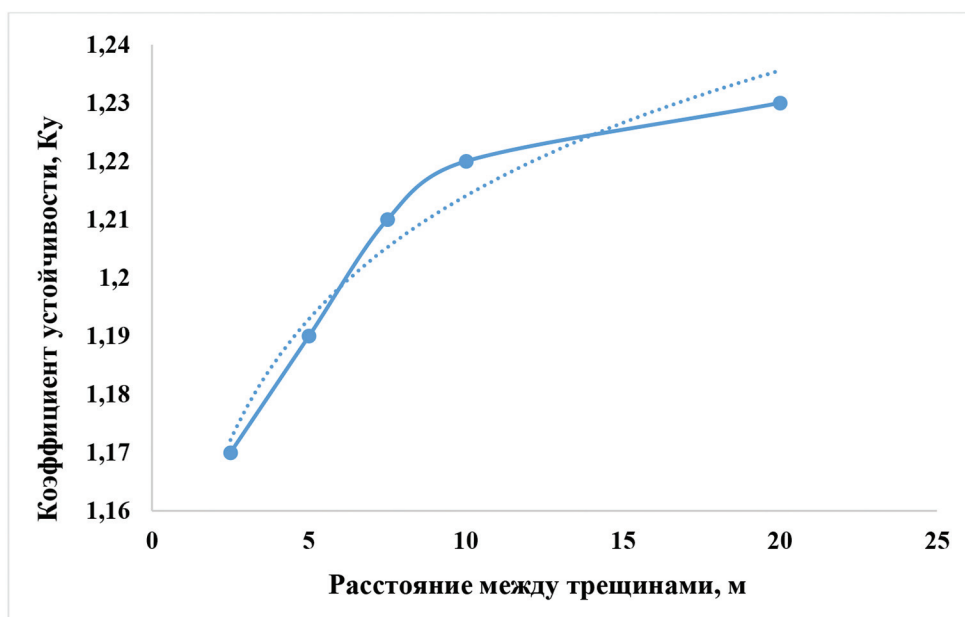


Рис. 6. Зависимость K_u от блочности массива скальных грунтов

чивость борта карьера также незначительно. Уменьшение расстояния между трещинами в восемь раз приводит к увеличению K_u на 0,06. Это также доказывает, что устойчивость борта карьера в данном случае определяется в первую очередь прочностью по поверхностям ослабления.

Выводы

1. Развитие процессов, инициируемое технологическими работами, носит прогрессирующий характер в пространственно-временном отношении: буровзрывные работы, перманентное углубление карьера и работа дренажных установок приводят к изменению напряженного состояния, разуплотнению пород, увеличению размеров депрессионной воронки, активизации инженерно-геологических процессов. Поэтому актуальность проблемы обеспечения устойчивости массива пород в динамике развития горных работ очевидна. Основным фактором, влияющим на устойчивость борта карьера, является анизотропия прочности пород массива.

2. Оценка устойчивости бортов карьера на конечных контурах выполнена с использованием современных технологий (компьютерных программ) методами предельного равновесия: Моргенштер-

на-Прайс, Бишопа, Янбу и методом конечных разностей. Расчёты устойчивости выполнены в программном комплексе Rocscience: методами предельного равновесия — в Rocscience Slide 7, методом конечных элементов — в Rocscience RS 2.

3. Дальнейшая разработка карьера (проектная мощность 450 м) требует контроля и прогноза состояния приоткосных массивов.

4. Прогнозные оценки устойчивости бортов карьера должны выполняться с учётом изменения компонентов инженерно-геологических условий под влиянием техногенных взаимодействий производственного процесса и корректироваться с учётом их влияния на коэффициент устойчивости.

5. Устойчивость борта карьера в пределах руднокристаллического фундамента определяется в первую очередь прочностью по поверхностям ослабления.

6. В настоящее время борт карьера с неблагоприятной ориентацией систем трещин: (субгоризонтальные трещины падают в карьер под углом 30° , субвертикальные — 60°), находится в состоянии близком к предельному равновесию и при дальнейшей разработке карьера на нынешних уровнях эффективности приведет к возрастанию рисков его эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Железные руды КМА: монография / под ред. В.П. Орлова, И.А. Шевырева, Н.А. Соколова. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. 616 с.
2. Житинская О.М., Ярг Л.А. Изменение компонентов природной среды при длительной разработке месторождений открытым способом (на примере КМА) // Известия высших учебных заведений. Научно-методический журнал. Геология и разведка. 2018. № 1. С. 49–61.
3. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оценка влияния анизотропии свойств грунтов на устойчивость склонов // Инженерные изыскания. 2013. № 9. С. 44–50.
4. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оползни в скальных грунтах и оценка их устойчивости // Инженерная геология. 2016. № 4. С. 4–21.
5. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела: пер. с англ. М. А. Тлеужанова / Под ред. А.М. Линькова. М.: Мир, 1987. 328 с.

6. Определение оптимальных параметров бортов карьера и отвалов ОАО «Стойленский ГОК» при развитии горных работ с увеличением добычи сырой руды до 42 млн. тонн в год: Отчет о НИР/ФГУП ВИОГЕМ / Рук. Киянец А.В., исп. Будков В.П., Григорьева С.Н., Кабанов Н.Н. [и др.]. Белгород, 2007. 55 с.
7. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: Изд-во РФ «Ленанд», 2015. 320 с.
8. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. СПб.: ВНИМИ, 1998. 208 с.
9. Пустовойтова Т.К., Кагермазова С.В. Инженерно-геологическое обеспечение прогноза устойчивости бортов карьеров // Маркшейдерское дело в социалистических странах. Т. 2. Л.: ВНИМИ, 1988. С. 250–256.
10. Фоменко И.К. Математическое моделирование напряженного состояния инженерно-геологического массива, сложенного анизотропными горными породами. Дис... канд. геол. мин. наук. М., 2001. 138 с.
11. Фоменко И.К., Пендин В.В., Горобцов Д.Н. Оценка устойчивости бортов карьеров в скальных грунтах // Горные науки и технологии. 2016. № 3. С. 10–21.
12. Ярг Л.А., Житинская О.М., Фоменко И.К. Оптимизация системы мониторинга природно-технической системы «Железорудные месторождения» на базе анализа временных рядов // Материалы Международной научно-практической конференции «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ)» г. Москва, МГИ-РГГРУ, 4–6 апреля 2018. Т. 2. М.: НПП «Филтроткани», 2018. С. 220–221.
13. Bar N., Heweston A. Considerations for Effectively Using Probability of Failure as a Means of Slope Design Appraisal for Homogeneous and Heterogeneous Rock Masses // 20th International Conference on Geological, Geotechnical and Environmental Engineering «ICGGEE 2018». Melbourne, Australia. 2018. Vol. 12 (2). P. 66–72.
14. Bar N., Weekes G., Welideniya S. Benefits and limitations of applying directional shear strengths in 2D and 3D limit equilibrium models to predict slope stability in highly anisotropic rock masses. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Neil_Bar/research. (Дата обращения 06.08.2018).
15. Barton N.R., Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice // Rock Mech. 1977. Vol. 10 (1–2). P. 1–54.
16. Bishop A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes // Geotechnique. 1955. N. 5. P. 7–17.
17. Duncan J.M. Finite element analyses of slopes and excavations. State-of-the-Art Report // Proceedings of the First Brazilian Seminar on the Application of the Finite Element Method in Soil Mechanics. COPPE. Rio de Janeiro, Brazil. 1974. P. 195–208.
18. Duncan J.M., Wright S.G. Soil Strength and Slope Stability. John Wiley & Sons, Inc. 2005. 309 p.
19. Esterhuizen J., Filz G.M., Duncan J.M. Constitutive Behaviour of Geosynthetic Interfaces // Journal of GeoTechnical and Geoenvironmental Engineering. October 2001. P. 834–840.
20. Hoek E., Caranza-Torres C.T., Corcum B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition // Proc. of the North American Rock Mechanics Society (NARMS-TAC'2002). Toronto: Mining Innovation and Technology, 2002. N. 1. P. 267–273.
21. Hoek E., Bray J.W. Rock Slope Engineering/3rd ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981. 358 p.
22. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis // In Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes. Stockholm, Sweden. 1954. P. 43–49.
23. Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general slip surface // Geotechnique. 1965. N.15. P. 79–93.
24. Rui Wang, Xi Wang, Kun Yin, Yang Zhao. Landslide Stability Analysis Based on GeoStudio // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 634–638. P. 3701–3704.

REFERENCES

1. Zheleznye rudy KMA: monografiya / pod red. V.P. Orlova, I.A. Shevyreva, N.A. Sokolova [Iron ores of KMA]. M., ZAO «Geoinformark» Publ., 2001. 616 p. (In Russian)
2. Zhitinskaya O.M., Yarg L.A. Izmeneniye komponentov prirodnoy sredy pri dlitel'noy razrabotke mestorozhdeniy otkrytym sposobom (na primere KMA) [Changes in the components of the natural environment in the long-term development of deposits by the open method (for example, KMA)]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Nauchno-metodicheskiy zhurnal. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2018, no. 1, pp. 49–61. (In Russian)
3. Zerkal' O.V., Fomenko I.K. Otsenka vliyaniya anizotropii svoystv gruntov na ustoychivost' sklonov [Evaluation of the influence of anisotropy of soil properties on slope stability]. Inzhenernyye izyskaniya [Engineering Surveys], 2013, no. 9, pp. 44–50. (In Russian)
4. Zerkal' O.V., Fomenko I.K. Opolzni v skal'nykh gruntakh i otsenka ikh ustoychivosti [Landslides in rocky soils and an estimation of their stability]. Inzhenernaya geologiya [Engineering geology], 2016, no. 4, pp. 4–21. (In Russian)
5. Crouch S., Starfield A. Methods of boundary elements in the mechanics of a rigid body. (Russ. ed.: Krauch S., Starfield A., translation from English: Tleuzhanova M. A., Lin'kova A. M. Metody granichnykh elementov v mekhanike tverdogo tela. Moscow, Mir, Publ., 1987, 328 p.).
6. Opredeleniye optimal'nykh parametrov bortov kar'yera i otvalov ОАО «Stoylenskiy GOK» pri razvitiy gornyykh rabot s uvelicheniyem dobychi syroy rudy do 42 mln. tonn v god [Determination of optimal parameters of the sides of the quarry and dumps of JSC «Stoilensky GOK» in the development of mining operations with an increase in the extraction of crude ore to 42 million tons per year]. Belgorod, 2007. 55 p. (In Russian, unpublished)
7. Pendin V.V., Fomenko I.K. Metodologiya otsenki i prognoza opolznevoy opasnosti [Methodology of landslide hazard assessment and forecast]. Moscow, Publishing House of the Russian Federation Lenand, 2015, 320 p. (In Russian).
8. Pravila obespecheniya ustoychivosti otkosov na ugol'nykh razrezakh [Rules for ensuring the stability of slopes on coal mines]. SPb., VNIMI Publ., 1998, 208 p. (In Russian)
9. Pustovoytova T.K., Kagermazova C.B. Inzhenerno-geologicheskoye obespecheniye prognoza ustoychivosti bortov kar'yero v [Engineering and geological support for the forecast of stability of the sides of quarries] Marksheyderskoye delo v sotsialisticheskikh stranakh [Mine surveying in the socialist countries] T. 2, L., VNIMI Publ., 1988, pp. 250–256. (In Russian)
10. Fomenko I.K. Matematicheskoye modelirovaniye napryazhennogo sostoyaniya inzhenerno-geologicheskogo massiva, slozhennogo anizotropnymi gornymi porodami. Dis. kand. geol.-min. nauk [Mathematical modeling of the stressed state of the engineering-geological massif, composed of anisotropic rocks]. Dis. kand. geol. min. sciences. Moscow, 2001, 138 p. (In Russian)
11. Fomenko I.K., Pendin V.V., Gorobtsov D.N. Otsenka ustoychivosti bortov kar'yero v skal'nykh gruntakh [Estimation of the stability of quarries in rocky soils]. Gornyye nauki i tekhnologii [Mining sciences and technologies], 2016, no. 3, pp. 10–21. (In Russian)
12. Yarg L.A., Zhitinskaya O.M., Fomenko I.K. Optimizatsiya sistemy monitoringa prirodno-tekhnicheskoy sistemy «Zhelezorudnyye mestorozhdeniya» na baze analiza vremennykh ryadov [Optimization of the monitoring system of the natural-technical system «iron ore deposits» on the basis of the analysis of time series]. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Strategiya razvitiya geologicheskogo issledovaniya neдр: nastoyashcheye i budushcheye» [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Strategy for the Development of Geological Exploration of the Earth: present and future» (on the occasion of the 100th anniversary of MGRI-RGGRU)]. M., Fil'trotkani Publ., 2018, T. 2, pp. 220–221. (In Russian)
13. Bar N., Heweston A., Considerations for Effectively Using Probability of Failure as a Means of Slope Design Appraisal for Homogeneous and Heterogeneous Rock Masses. Conference: ICGGEE 2018: 20th International Conference on Geological,

- Geotechnical and Environmental Engineering At, Melbourne, Australia, 2018, vol. 12(2), pp. 66–72.
14. Bar N., Weekes G., Welideniya S. *Benefits and limitations of applying directional shear strengths in 2D and 3D limit equilibrium models to predict slope stability in highly anisotropic rock masses*. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Neil_Bar/research. (accessed 06.08. 2018).
 15. Barton, N.R. and Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech*, 1977, vol. 10 (1–2), pp. 1–54.
 16. Bishop A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 1955, no. 5, pp. 7–17.
 17. Duncan. J.M. Finite element analyses of slopes and excavations, State-of-the-Art Report, *Proceedings of the First Brazilian Seminar on the Application of the Finite Element Method in Soil Mechanics*, COPPE, Rio de Janeiro, Brazil, 1974. pp. 195–208.
 18. Duncan J.M., Wright S.G. *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons, Inc., 2005, 309 p.
 19. Esterhuizen, J., Filz, G.M. and Duncan, J.M. Constitutive Behaviour of Geosynthetic Interfaces. *Journal of GeoTechnical and Geoenvironmental Engineering*, October 2001, pp. 834–840.
 20. Hoek E., Caranza-Torres C.T., Corcum B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proc. of the North American Rock Mechanics Society (NARMS-TAC'2002)*, Toronto: Mining Innovation and Technology, 2002, no. 1, pp. 267–273.
 21. Hoek E., Bray J.W. *Rock Slope Engineering/3rd ed.* London, Institution of Mining and Metallurgy, 1981, 358 p.
 22. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis. *Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes*. Stockholm, Sweden, 1954, pp. 43–49.
 23. Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general slip surface. *Geotechnique*, 1965, no. 15, pp. 79–93.
 24. Rui Wang, Xi Wang, Kun Yin, Yang Zhao. Landslide Stability Analysis Based on GeoStudio, *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 634–638, pp. 3701–3704.
-

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ
GEOPHYSICAL METHODS OF PROSPECTING AND EXPLORATION

УДК 550.831+550.348

СЕЙСМОГРАВИТАЦИОННЫЕ ПУЛЬСАЦИИ
НА КОНТИНЕНТАХ ЗЕМНОГО ШАРА*

Ю.В. АНТОНОВ, И.А. ПОНОМАРЕНКО

*Воронежский государственный университет
1, Университетская пл., г. Воронеж 394006, Россия
e-mail: yuriyantono@yandex.ru*

Гравиметрические и сейсмические пульсации синхронно совпадают во времени между собой. Указанное обстоятельство синхронности ранее проанализировано для Евразийского континента, где имеются данные по сейсмическим и гравиметрическим наблюдениям. Оказалось, что пульсации гравиметрического и сейсмического полей могут возникать не только под действием метеорных потоков, но и за счёт процессов, происходящих в атмосфере. Пульсации, связанные с погодой, в основном приурочены к морской части Евразии и прилегающей к ней прибрежной части континента. Внутриконтинентальные пульсации, а их число на порядок меньше, чем в морских акваториях, наблюдаются по всему земному шару и синхронны между собой. Вероятно, причиной образования внутриконтинентальных пульсаций являются удары метеорных потоков по атмосфере Земли, которые вызывают в результате колебания атмосферы. Пульсации в океане и прибрежных зонах создаются за счёт циклонических вихрей, которые являются продуктом неравномерного нагревания поверхности Земли.

Ключевые слова: пульсации; вертикальная составляющая сейсмического поля; лунно-солнечные вариации силы тяжести; неприливные вариации силы тяжести; метеорные потоки; сейсмический шум.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-4-78-84

SEISMOGRAVITATIONAL PULSATIONS ON THE CONTINENTS OF THE EARTH

YU.V. ANTONOV, I.A. PONOMARENKO

*Voronezh State University
1, Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russia
e-mail: yuriyantono@yandex.r*

Gravimetric and seismic pulsations coincide in time with each other. This synchrony circumstance was previously analyzed for the Eurasian continent, where the data on seismic and gravimetric observations are available. The pulsations of the gravimetric and seismic fields have been appeared to be able to occur not only under the action of meteor showers, but also due to the processes occurring in the atmosphere. Weather-related pulsations are mainly confined to the maritime part of Eurasia and the adjacent coastal part of the continent. Intercontinental pulsations, and their number is much less than in the sea, are observed around the globe and are synchronous with each other. It is likely that the cause of the formation of intercontinental pulsations is the impact of meteor showers on the Earth's atmosphere, creating as a result of fluctuations in the atmosphere. Ripples in the ocean and coastal zones are created by cyclonic vortices, which are the product of the uneven heating of the Earth's surface.

Keywords: pulsation; vertical component of the seismic field; lunar-solar variations in gravity; non-tidal variations of gravity; coronal mass; meteor showers; the seismic noise.

Пульсации неприливных вариаций силы тяжести были обнаружены в 2014 г. [2]. Последующие исследования [2—7] показали, что измеренные пульсации силы тяжести в различных пунктах Евразийского континента по времени совпадают между собой. Такие результаты измерения пульсаций представлены в Киргизстане (г. Бишкек), пгт. Арти (Свердловская обл.) и г. Перми. Также обнаружено [7], что пульсации сейсмического поля в Воронеже (ст. Сторожевое) также совпадают с пульсациями силы тяжести в Бишкеке. Такое совпадение обеспечивается тем, что в гравиметрах и сейсмографах используется один и тот же датчик — маятник Голицына. Сила тяжести пропорциональна растяжению пружины маятника, а скорость растяжения соответствует сейсмическому колебанию [7]. Поэтому при одновременных мониторинговых измерениях силы тяжести и сейсмических колебаний последние по отношению к силе тяжести являются аналогом производной по времени. Дальнейшее исследование сейсмических данных в прибрежной юго-восточной части Евразийского континента показало [4, 6], что гравиметрическим пульсациям внутри континента соответствуют сейсмические пульсации, но большая часть прибрежных сейсмических пульсаций не находит своего соответствия внутри континента. Оказалось, что прибрежные пульсации вызваны атмосферными процессами, обусловленными циклонами, тайфунами и т. д.

В связи с этим было решено изучить дополнительно вариации гравитационного и сейсмического

полей внутри континентов Земли. Приводимые в статье результаты основаны на обработке материалов сейсмических наблюдений Калифорнийского университета в Сан-Диего (УКСД) [9]. Преимущественно использовались сейсмические измерения, так как гравиметры применяются крайне редко. При этом надо отметить, что качество наблюдаемого материала не всегда является высоким. Прежде всего это обусловлено техническими помехами. Вначале, как правило, после создания мониторинговой станции идут измерения высокого качества. Затем по прошествии нескольких лет, видимо, из-за развития инфраструктуры и обустройства окружающей местности качество резко снижается.

Сейсмические записи часто зависят от используемого типа аппаратуры. Кроме того, на показания гравиметров и сейсмографов оказывают влияние не только землетрясения, но и другие геодинамические процессы, происходящие внутри Земли, в атмосфере и ближайшем космосе. Влияние ближайшего космоса прежде всего определяется притяжением Луны и Солнца. Какие бы точные формулы при вычислении лунно-солнечных вариаций силы тяжести не использовались, все равно остается ощущение неполного учёта поправок на притяжение Луны и Солнца. Влияние притяжения Луны и Солнца хорошо видно на примере измерений сейсмических колебаний прибором STS — 1H/VBB (рис. 1) на станции BFO в Германии. Наблюдённые измерения сейсмического поля (рис. 1, а)

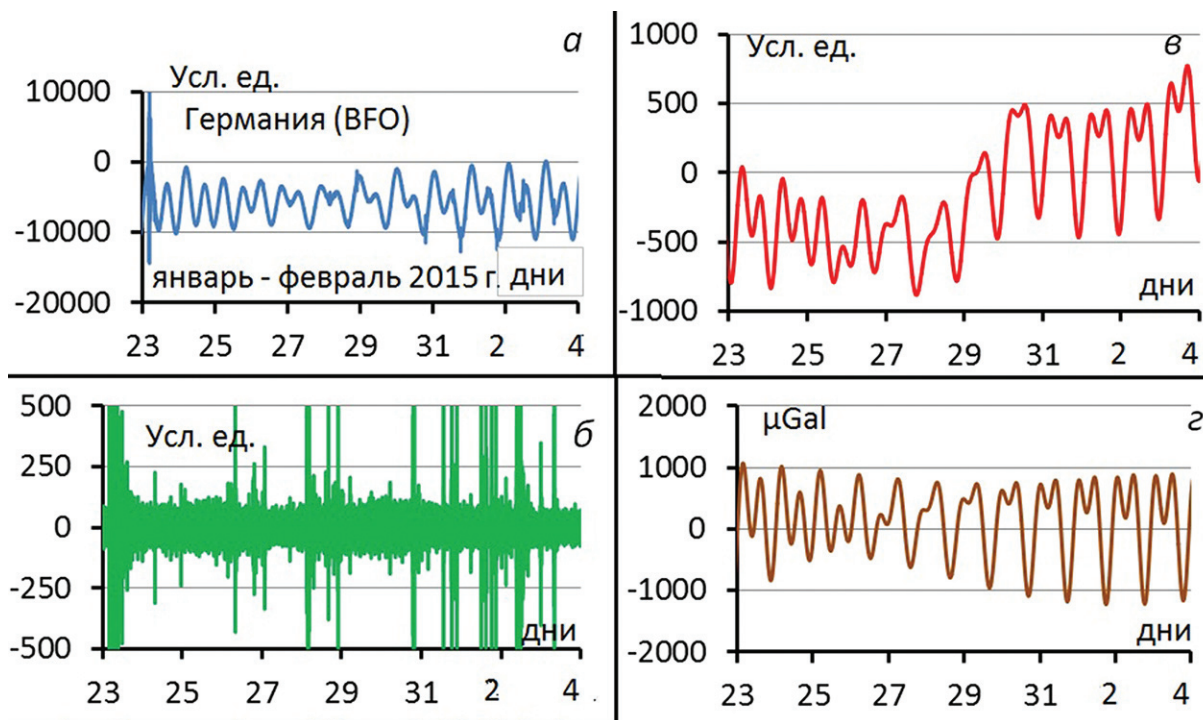


Рис. 1. Пример сейсмической записи прибором STS — 1H/VBB на станции BFO (Германия): а — исходная сейсмическая запись; б — остаточная аномалия неприливной вариации в результате осреднения; в — результат интегрирования исходной сейсмической записи; г — расчётные значения лунно-солнечных вариаций силы тяжести (формула Тиммена-Венцеля)

полностью повторяют градиент лунно-солнечных вариаций. Значения градиента более чем на порядок превышают значения неприливных вариаций, кривая наблюдений внешне выглядит почти гладкой. Была предпринята попытка выделить неприливно-вариации с помощью метода осреднения (рис. 1, б). В [6] показано, что использование метода осреднения позволяет по исходным измерениям сразу же получить неприливную пульсацию, минуя операции учёта притяжения Луны и Солнца, смещения нуля-пункта и вычисления остаточной неприливной вариации. На полученной остаточной вариации с помощью осреднения (рис. 1, б) чётко выделяется пульсация, хотя сейсмическая обстановка, судя по изрезанности графика, довольно нестабильная. Видимо, это обусловлено произошедшим землетрясением на севере Италии (М—4,4) 23 января 2015 г. и целым рядом других мелких землетрясений (М 2—4) в третьей декаде января в Средиземноморье. Катастрофические землетрясения в Тихом океане (о. Вануату), произошедшие 23 января (М 7) и 30 января 2015 г. (М 6), вряд ли могли оказать существенное влияние на сейсмическую обстановку в Европе.

На рис.1, а, видим, что исходные измерения по форме напоминают кривую градиента лунно-солнечных вариаций силы тяжести. Воспользуемся этим фактом [5] и проинтегрируем по времени исходные измерения. В результате кривая интегрирования (рис. 1, в) напоминает теоретически рассчитанные по формуле Тиммена и Венцеля [8] лунно-солнечные вариации (рис. 1, г). Искажения в интегрированной кривой обусловлены сейсмической обстановкой. Например, для первой половине января 2015 г., когда сейсмическая обстановка была несколько спокойнее, приведены результаты обработки измерений гравиметрических данных на станции ВФО (рис. 2). Внешне исходные данные напоминают лунно-солнечные вариации силы тяжести (рис. 2, а). На остаточной аномалии после осреднения чётко выделяются пульсации силы тяжести (рис. 2, б), которые полностью совпадают с пульсациями в Бишкеке (рис. 2, в).

Таким образом, Луна и Солнце непосредственно влияют на гравиметрические и сейсмические датчики. Это влияние надо исключать. Для всех типов гравиметров это делается прямым вычислением лунно-солнечных вариаций силы тяжести. А вот различные типы сейсмографов по-разному реагируют на притяжение Луны и Солнца. В приведённом выше примере с прибором STS — 1Н/VBB (рис. 1) ясно и чётко просматривается влияние Луны и Солнца. А что делать, если такого влияния не видно. Представим, что сейсмических колебаний нет. Маятник тем не менее под действием Луны и Солнца перемещается в пространстве. Величина этого перемещения может быть намного меньше амплитуды лунно-солнечных вариаций, но

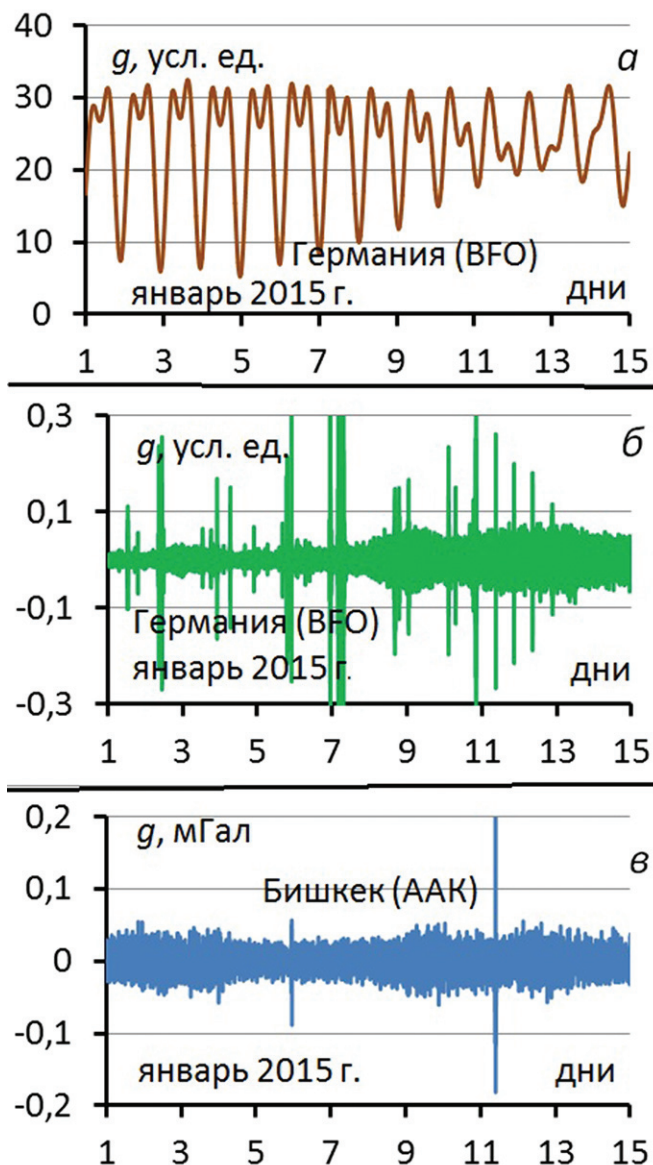


Рис. 2. Сравнение неприливно-пульсаций силы тяжести в Киргизии (ААК) и Германии (ВФО): а — исходная запись переменного поля силы тяжести; б — пульсации силы тяжести в Германии (остаточная аномалия в результате осреднения); в — пульсация силы тяжести в Киргизии (остаточная аномалия в результате осреднения)

значимой величиной, например, при вычислении неприливных вариаций. В целом для сравнения сейсмических пульсаций на различных континентах с гравиметрическими пульсациями в Евразии старались брать данные с сейсмографов типа Trilium [9].

Поскольку данных для Америки, Африки и Австралии гравиметрических мониторинговых наблюдений не удалось найти в открытом доступе, то далее рассмотрим сравнение сейсмических пульсаций в Америке, Африке и Австралии с гравиметрическими пульсациями в Евразии. В частности, на рис. 3, а представлена сейсмическая пульсация в Канаде (FFC), которая достаточно удовлетворительно совпадает с гравиметрическими пульсациями в Киргизии (ААК) и России (ARTI).

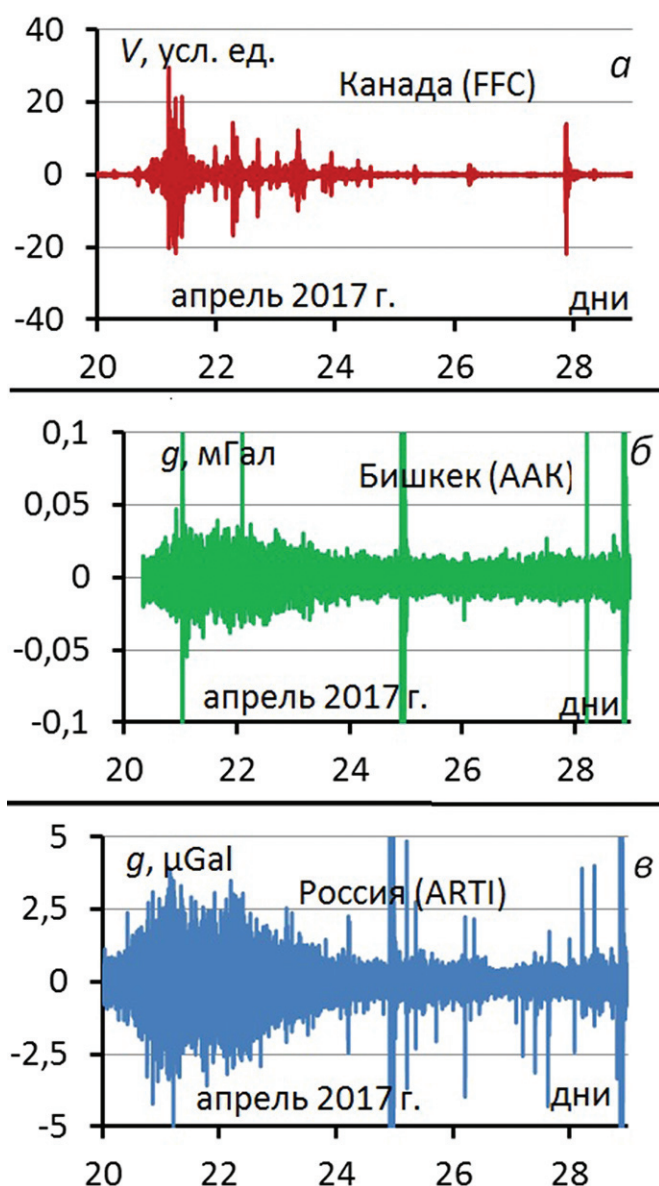


Рис. 3. Сравнение неприливных пульсаций силы тяжести в Киргизии (ААК) и России (АТИ) с сейсмическими пульсациями в Канаде 20–29 января 2017 г.: а — сейсмическая пульсация в Канаде (FFC); б — пульсация силы тяжести в Киргизии (ААК); в — пульсация силы тяжести в России (АТИ)

Примерно такая же картина наблюдалась в марте–апреле 2017 г. для той же станции FFC в Канаде при сравнении сейсмических и гравиметрических пульсаций (рис. 4). Отметим любопытную деталь, 29 марта 2017 г. в районе Берингова моря у Камчатки произошло землетрясение с магнитудой 6,6. Землетрясение отмечено этого числа в Бишкеке (ААК) и в Перми (рис. 4, б, в.), а в Канаде (рис. 4, а) — 30 марта. Это досадная ошибка, наверное, произошла при смене дат, на что надо обращать внимание при обработке наблюдений. Если убрать землетрясение и переместить даты на одни сутки на рис. 4, а, то сравнение сейсмических и гравиметрических пульсаций становится похожим на рис. 3.

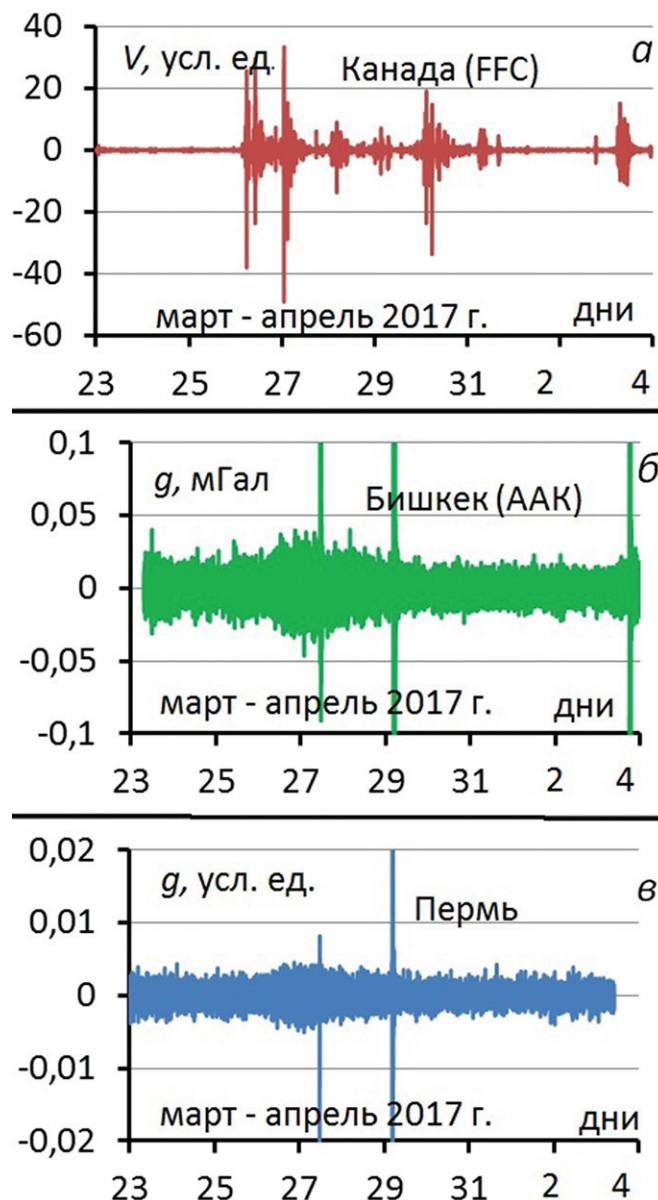


Рис. 4. Сравнение неприливных пульсаций силы тяжести в Киргизии (ААК) и России (г. Пермь) с сейсмическими пульсациями в Канаде 20 марта — 4 апреля 2017 г.: а — сейсмическая пульсация в Канаде (FFC); б — пульсация силы тяжести в Киргизии (ААК); в — пульсация силы тяжести в России (г. Пермь)

Далее рассмотрим сравнение пульсаций на Африканском континенте в январе 2015 г. (рис. 5). К сожалению, мониторинговая станция MBAR попадает в зону Восточно-Африканского разлома и находится рядом с оз. Виктория, что явно способствует влиянию местных землетрясений и атмосферных фронтов [4, 6] над озером на показания сейсмометров. Тем не менее имеется сходство, может быть не очень четкое, сейсмических пульсаций с гравиметрическими пульсациями в Бишкеке. Примерно такое же совпадение пульсаций в январе 2014 г. наблюдалось на станциях WRAB в Австралии и ААК в Киргизии (рис. 6). Но надо отметить, что качество наблюдений, по данным [9], является проблемным. Других станций внутри континента

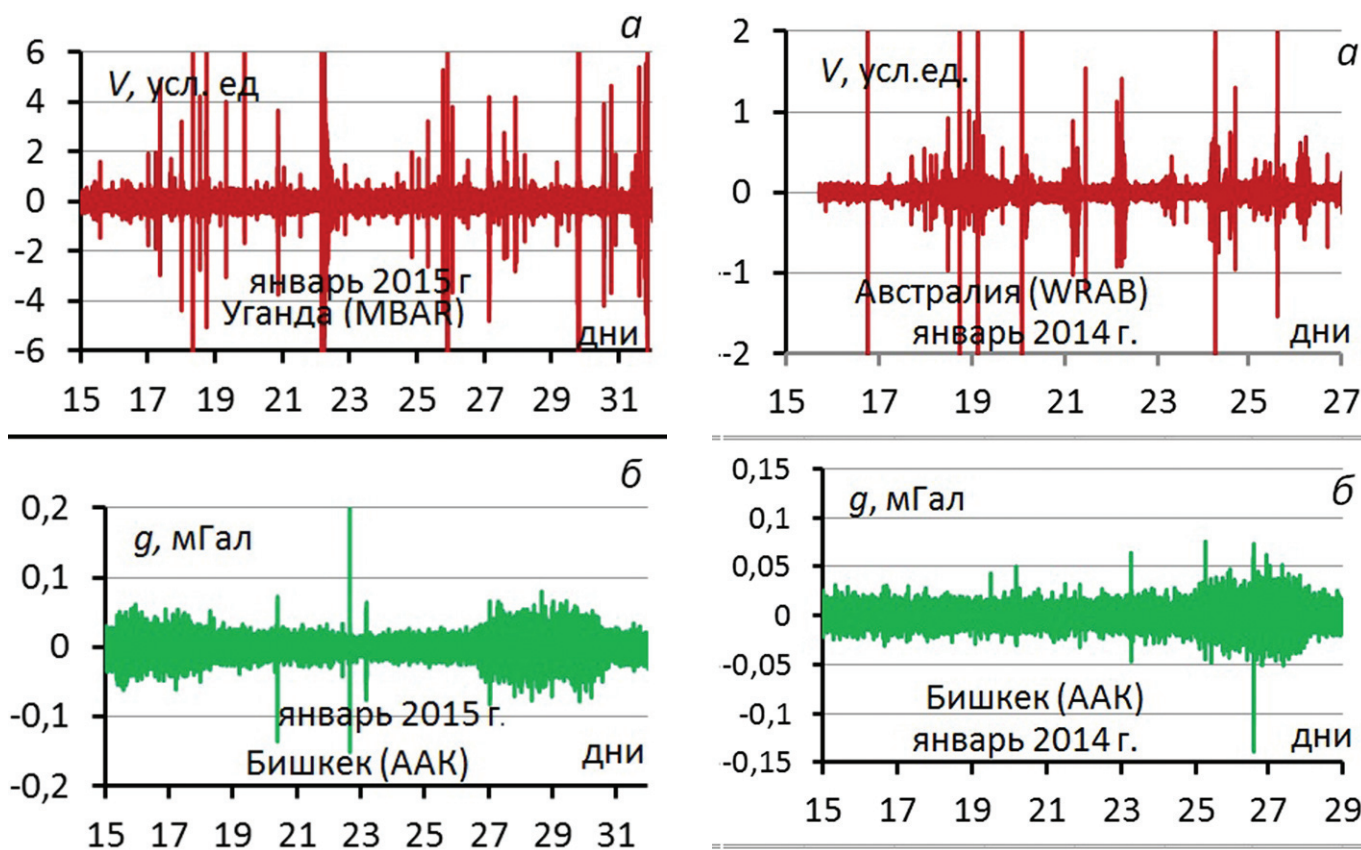


Рис. 5. Сравнение неприливных пульсаций силы тяжести в Киргизии (ААК) с сейсмическими пульсациями в Уганде (МВАР): а — сейсмическая пульсация в Уганде (МВАР); б — пульсация силы тяжести в Киргизии (ААК)

нет. Также непонятно отсутствие гравиметрической пульсации 17–19 января 2014 г. на станции ААК Киргизии. Пульсации из года в год повторяются. Если сравнивать пульсации в Бишкеке за 2015 и 2014 гг. (рис. 5, б и 6, б), то видим отсутствие пульсации за 17–19 января 2014 г. Среднеквадратическая погрешность измерений (6, в), как показано в [1, 2], повторяет пульсации. Действительно, на данном интервале повышенная погрешность измерений (рис. 6, в). Кстати, сейсмические пульсации на станциях МВАР и WRAB более или менее совпадают между собой, хотя они произошли соответственно в январе 2015 и 2014 гг., что ещё раз подтверждает периодичность повторения пульсаций.

Таким образом, пульсации сейсмического и гравиметрического полей внутри континентов на земном шаре происходят одновременно. Причиной этому, как отмечено в [2–7], служат удары метеорных потоков по атмосфере. Вернемся к рис. 3. Судя по форме пульсаций — резкое возрастание и постепенное понижение амплитуды, можно предположить [1–7], что удар метеорного потока по атмосфере Земли вызывает эти пульсации. Метеорные потоки имеют размеры от нескольких до нескольких десятков миллионов километров. Пульсации длятся несколько суток при скорости Земли 30 км/с

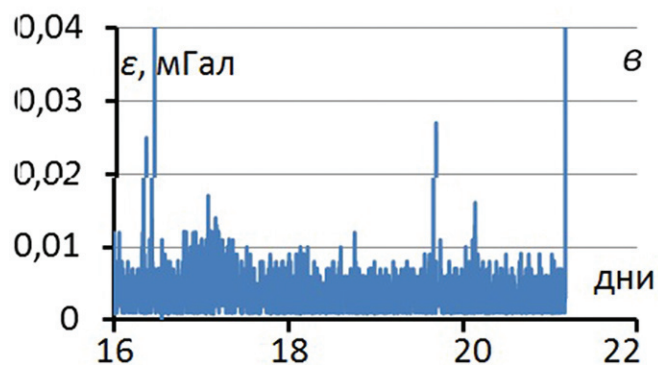


Рис. 6. Сравнение неприливных пульсаций силы тяжести в Киргизии (ААК) с сейсмическими пульсациями в Австралии (WRAB): а — сейсмическая пульсация в Австралии (WRAB); б — пульсация силы тяжести в Киргизии (ААК); в — среднеквадратическая погрешность измерений силы тяжести в Киргизии (ААК)

и до 100 км/с для метеорных потоков в космическом пространстве. Удары метеорного потока захватывают всю Землю разом, поэтому отсюда следует, что пульсации должны проявляться в целом для всей Земли. Кроме того, отметим, что собственные колебания атмосферы после удара метеорного потока по атмосфере не меняют своей частоты, а лишь увеличивают амплитуду колебаний. На рис. 7 представлены периодограммы неприливных вариаций силы тяжести при отсутствии (рис. 7, б) и наличии (рис. 7, г) пульсаций. Наблюдения для сравнения выбраны для момента, когда не было никаких помех. Амплитуды вариаций различаются примерно в два раза и амплитуды периодограмм тоже.

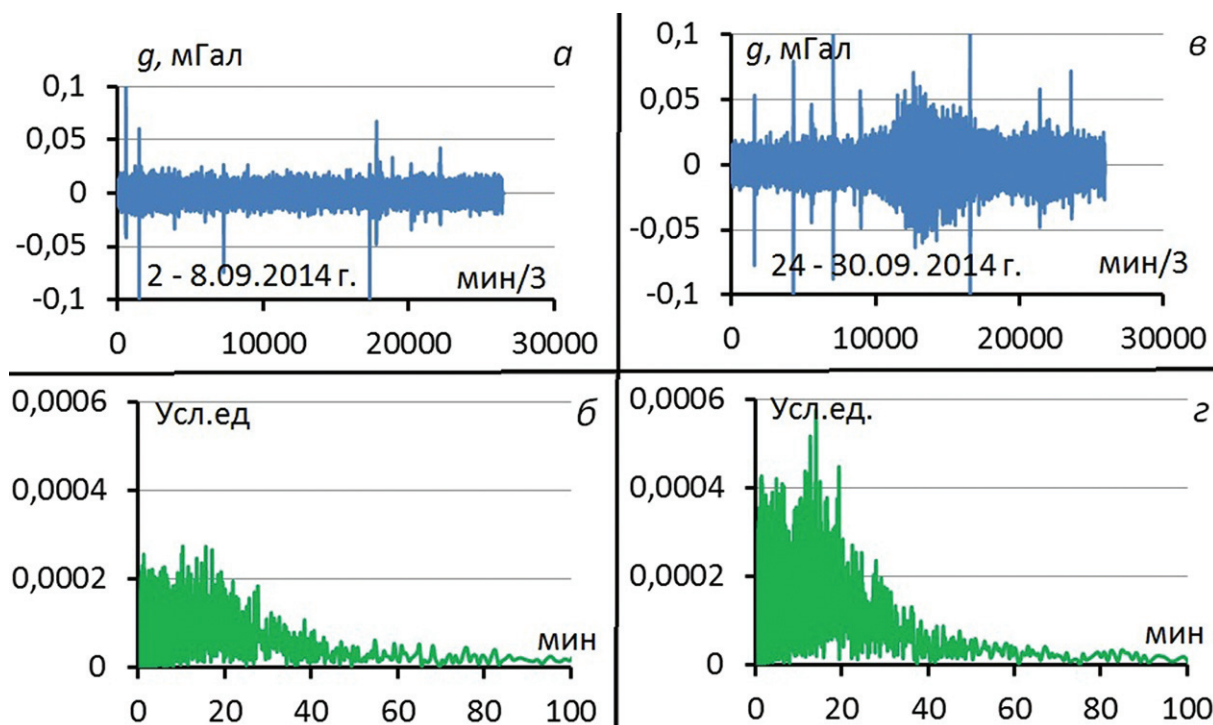


Рис. 7. Сравнение спектров при наличии и отсутствии пульсаций силы тяжести в Киргизии (ААК): а — исходная запись неприливной вариации силы тяжести при отсутствии пульсаций; б — периодограмма при отсутствии пульсаций; в — исходная запись неприливной вариации силы тяжести при наличии пульсаций; з — периодограмма при наличии пульсаций

Выводы

Таким образом, пульсации сейсмического и гравитационного полей имеют глобальное распространение для всей Земли. На суше пульсации в большей части своей вызваны ударами метеорных потоков по атмосфере. На морских и океанических

акваториях пульсации тоже связаны с колебаниями в атмосфере, но которые вызваны переносом тепла на поверхности Земли, и ограничены по площади. Поэтому при изучении сейсмического шума необходимо учитывать данное обстоятельство.

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамов Д.В., Бычков С.Г. Возможная природа пульсаций гравитационного поля // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Казань: Казанский университет, 2018. С. 16—18.
- Антонов Ю.В. Пульсации неприливных вариаций силы тяжести // Известия вузов. Геология и разведка. 2014. № 5. С. 54—57.
- Антонов Ю.В. Разделение неприливных вариаций силы тяжести на основе спектрального анализа и метода осреднения // Вестн. Воронеж, гос. ун-та. Сер. Геология. 2016. Вып. 2. С. 100—106.
- Антонов Ю.В. Влияние атмосферного фронта на показания гравиметров и сейсмометров // Известия вузов. Геология и разведка. 2017. № 4. С. 66—71.
- Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Сравнение приливных вариаций силы тяжести и вертикальной составляющей сейсмографа // Геофизика. 2013. № 2. С. 27—31.
- Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Сейсмогравитационные пульсации на Евразийском континенте // Известия вузов. Геология и разведка. 2019. № 1. С. 70—75.
- Антонов Ю.В., Сизаск И.А. Синхронные пульсации в неприливных вариациях гравитационного и сейсмического полей // Известия вузов. Геология и разведка. 2015. № 5. С. 46—52.
- Timmen L., Wenzel H.-G. Worldwide synthetic gravity tide parameters / International Association of Geodesy symposia. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag. 1996. Vol. 113. P. 92—101.
- Yandex.ru // https; IRIS.EDU/, дата обращения — 28.05.2019.

REFERENCES

- Abramov D.V., Bychkov S.G. Possible nature of gravitational field pulsations. *Problems of theory and practice of geological interpretation of geophysical fields*. Kazan, Kazanskiy university Publ., 2018, pp. 16—18. (In Russian).
- Antonov Y.V. Pulsations of non-tidal variations of gravity. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2014, no 5, pp. 54—57. (In Russian).
- Antonov Y.V. Separation of non-tidal gravity variations based on spectral analysis and averaging method, *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Geologiya*, 2013, no. 2, pp. 100—106. (In Russian).

4. Antonov Y.V. The influence of atmospheric front on the readings of the gravimeters and seismometers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2017, no 4, pp. 66—71. (In Russian).
 5. Antonov Y.V., Antonova I.Y. Comparison of tidal variations of gravity and vertical component of the seismograph, *Geofizika*, 2016, no 2, pp. 27—31. (In Russian).
 6. Antonov Y.V., Antonova I.Y. Seismic-induced gravitational pulsations on the Eurasian continent. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2019, no 1, pp. 70—75. (In Russian).
 7. Antonov Y.V., Sizask I.A. Synchronous pulsations in non-tidal variations of gravitational and seismic fields. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2015, no 5, pp. 46—52. (In Russian).
 8. Timmen L., Wenzel H.-G Worldwide synthetic gravity tide parameters / International Association of Geodesy symposia. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag. 1996. Vol. 113. pp. 92—101.
 9. Yandex.ru// <https://IRIS.EDU/>, дата обращения — 28.05.2019.
-