

ИГ УФИЦ РАН

**ISSN 2619-0087** 

# Геологический ВесТник

№ 1(4), 2019

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УФИМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ

# ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

# 2019. № 1

Главный редактор Пучков В.Н.

Заместитель главного редактора Ковалев С. Г.

Редакционная коллегия:

Абдрахманов Р.Ф. Артюшкова О.В. Голованова И.В. Горожанин В.М. Данукалова Г.А. Знаменский С.Е. Казанцева Т.Т. Кулагина Е.И. Маслов А.В. Осипов В.И. Савельев Д.Е. Салихов Д. Н. Серавкин И.Б. Сначев В.И. Эрнст Р.

Учредитель: Институт геологии УФИЦ РАН

*Адрес редакции:* 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2 Институт геологии Тел.: (347) 272-76-36 E-mail: ig@ufaras.ru

© Институт геологии УФИЦ РАН, 2019 © Авторы статей, 2019

## Содержание

<i>Сергеева Н.Д., Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Козлова О.В., Ратов А.А.</i> Ашинская серия венда: орогенный комплекс тиманид на Южном Урале
<i>Курманов Р.Г., Овсянников В.В., Савельев Н.С., Галеев Р.И.</i> Реконструкция растительности и климата Южного Предуралья в суббореале и субатлантике (по материалам памятников кара-абызской культуры)
Ковалев С.Г., Высоцкий С.И., Ковалев С.С. «Древние» цирконы в магматических породах Шатакского комплекса (Южный Урал): морфология и генезис 45
<i>Сначёв А.В., Нугуманова Я.Н., Савельев Д.Е.</i> Рудоносность углеродистых отложений максютовского комплекса (зона Уралтау)
<i>Сначёв В.И.</i> Физико-химические условия формирования гранитоидов Елан- чиковского массива и их металлогеническая специализация
Савельев Д.Е., Нугуманова Я.Н., Гатауллин Р.А., Сергеев С.Н. Хромититы зоны меланжа Нуралинского массива (Южный Урал)77
Шарипова А.А., Мичурин С.В., Никонов В.Н., Калистратова Е.О., Горожанин В.М., Захарова А.Г. Распределение РЗЭ, петро- и геохимические особенности габбро-долеритов Авзянского рудного района (Южный Урал)
Захарова А.Г., Мичурин С.В., Шарипова А.А. Минералогия и геохимия больше- инзерской и суранской свит нижнего рифея (Южный Урал) по результатам шлихового опробования
Латышев А.В., Аносова М.Б., Хотылев А.О. Палеомагнетизм интрузивных тел рубежа раннего-среднего рифея Башкирского мегантиклинория (Южный Урал): значение для палеотектонических реконструкций Восточно-Европейской платформы
Хашпер А.Л., Аминев Т.Р., Федоров А.И., Жонин А.В. Исследование зависи- мости проницаемости горной породы от ее напряженно-деформированного состояния
Хашпер Б.Л., Надеждин О.В., Миникеева Л.Р., Бурикова Т.В. Опробова- ние алгоритма выделения интервалов микропоровых пород по комплексу геофизических исследований скважин с применением методики восста- новления синтетических кривых в турнейском ярусе месторождений Баш- кортостана
<i>Переплеткин И.А., Кузнецов В.И.</i> Выявление областей нефтегазонасыщения в нетрадиционных коллекторах с помощью коэффициента Пуассона при проведении 2D 3C сейсморазведки
Абдрахманов Р.Ф. Проблема удаления жидких промышленных стоков в глубокие водоносные горизонты

Russian Academy of Sciences Ufa Federal Research Centre Institute of Geology

# GEOLOGICHESKII VESTNIK

# 2019. No.1

*Editor-in-Chief* Puchkov V. N.

Deputy Editor Kovalev S.G.

Editorial board: Abdrakhmanov R.F. Artiushkova O.V. Danukalova G.A. Ernst R. Golovanova I.V. Gorozhanin V.M. Kazantseva T.T. Kulagina E.I. Maslov A.V. Osipov V.I. Salikhov D.N. Savel'ev D.E. Seravkin I.B. Snachev V.I. Znamenskii S. E.

*Constitutor:* Institute of geology UFRC RAS

*Editorial address:* 450000, Ufa, Karl Marks st., 16/2. Institute of Geology. Tel.: (347) 272-76-36 E-mail: ig@ufaras.ru

© Institute of geology UFRC RAS, 2019 © Articles autors, 2019

### Contents

Sergeeva N.D., Puchkov V.N., Krasnobaev A.A., Kozlova O.V., Ratov A.A. Asha Series of Vendian: an orogenic complex of Timanides in the Southern Urals .... 3

*Khashper B.L., Nadezhdin O.V., Minikeeva L.R., Burikova T.V.* Testing of Microporous Rocks Identification Method Based on Synthetic Well Logging Curves Calculation Technique in the Tournaisian stage of Bashkortostan Oilfields.... 141

 УДК 551.71/72(234.853)

DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087-2019-1-1

# АШИНСКАЯ СЕРИЯ ВЕНДА: ОРОГЕННЫЙ КОМПЛЕКС ТИМАНИД НА ЮЖНОМ УРАЛЕ

© 2019 г. Н.Д. Сергеева, член-корр. РАН В. Н. Пучков, А.А. Краснобаев, О.В. Козлова, А.А. Ратов

Реферат. Орогенный комплекс тиманид представлен на Южном Урале отложениями басинской, куккараукской и зиганской свит ашинской серии венда, отвечающими молассовой формации. Особенности состава и строения ашинской молассы рассмотрены в типовых разрезах венда западного крыла Башкирского мегантиклинория. Впервые область сноса вендского времени была охарактеризована реперной SHRIMP-датировкой (713.6±6.1 млн лет) по циркону из гранитной гальки конгломератов куккараукской свиты. Эта датировка свидетельствует о том, что в вендское время в области сноса происходил размыв пород, близких по возрасту и составу к гранитам Мазаринского массива (710-740 млн лет) и Барангуловского габбро-гранитного комплекса (725±5 млн лет), расположенных в северной части зоны Уралтау на Южном Урале к востоку от точки взятия пробы на цирконы. Тем самым намечаются как область осадконакопления, так и область размыва. Формирование осадков венда за счет образований самого молодого рифейского стратона (аршиния) свидетельствует, что на рубеже рифея и венда на востоке Башкирского мегантиклинория не было длительного перерыва в осадконакоплении, а значит — сохранилась достаточно полная геологическая информация, касающаяся эволюционного развития региона. В то же время, на западном крыле Башкирского мегантиклинория аршинская серия завершающего рифея полностью выпадает из разреза и здесь особенности проявления и масштаб предашинского перерыва требуют дополнительных исследований. Ключевые слова: венд, тиманиды, ашинская серия, свита, моласса, циркон, U-Pb датировка, Южный Урал

# ASHA SERIES OF VENDIAN: AN OROGENIC COMPLEX OF TIMANIDES IN THE SOUTHERN URALS

N. D. Sergeeva, corresponding member of RAS V. N. Puchkov, A. A. Krasnobaev, O. V. Kozlova, A. A. Ratov

Abstract. The orogenic complex of Timanides is represented in the Southern Urals by deposits of Basu, Kukkarauk and Zigan Formations of the Vendian Asha Series, which belong to molasse. The composition and structure of the Asha molasse are described in the standard Vendian sections of the western limb of the Bashkirian meganticlinorium. For the first time, the Vendian provenance area was characterized by a reference SHRIMP date (713.6±6.1 Ma) after zircon from a granite pebble of Kukkarauk Formation conglomerates. This date indicates that in the Vendian time in the provenance area were eroded rocks that were close in the age and composition to the granites of the Mazara massif (710-740 Ma) and Barangulovo gabbro-granite complex (725±5 Ma), situated in the northern part of the Uraltau zone in the Southern Urals, to the East of the sampling place of the granite pebble. Therefore, both areas of sedimentation and provenance are suggested. The formation of the Vendian sediments at the expense of the complexes of the youngest Riphean straton (Arshinian) shows that at the boundary of the Riphean and Vendian in the east of the Bashkirian meganticlinorium there was no long break of sedimentation and therefore a fairly complete geological information was preserved concerning the evolutionary development of the region. At the same time, in the western limb of the Bashkirian meganticlinorium the Asha series of the terminal Riphean falls out of the section completely, and here the manifestations and scale of the Pre-Asha erosion need additional study. Keywords: Vendian, Timanide, Asha Series, Formation, zircons, U-Pb dating, Southern Urals

Для цитирования: Сергеева Н.Д., Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Козлова О.В., Ратов А.А. Ашинская серия венда: орогенный комплекс тиманид на Южном Урале // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 3–34. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087-2019-1-1

**For citation:** Sergeeva N.D., Puchkov V.N., Krasnobaev A.A., Kozlova O.V., Ratov A.A. Asha Series of Vendian: an orogenic complex of Timanides in the Southern Urals // Geologicheskii vestnik. 2019. No. 1. P. 3–34. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087-2019-1-1

#### Введение

Тиманский орогенез является завершающим этапом тектонического цикла докембрийской истории развития Урала. В результате тиманской орогении в вендское время (возрастной интервал от 600 до 543 млн лет [Дополнения..., 2000]) на краю рифейского платформенного бассейна [Пучков, 2010] на западном склоне Южного Урала и прилегающей части Восточно-Европейской платформы возникает ороген, в прогибах которого на западном склоне Южного Урала формируется моласса.

Докембрийские молассы на Южном Урале были выделены М.И. Гаранем в 50-е годы XX века, позднее Н.С. Шатский [1960] отметил, что рядом особенностей, типичных для моласс, обладает ашинская серия. Обоснование молассовой природы ашинских образований дано Ю.Р. Беккером [1968, 1988]. К молассовой формации венда Ю.Р. Беккер [1988] относил образования всей ашинской серии в составе бакеевской, урюкской, басинской, куккараукской и зиганской свит, которые широко распространены на западном крыле Башкирского мегантиклинория, и аршинской, криволукской, кургашлинской и байназаровской свит, имеющих значительно меньшее распространение на восточном крыле мегантиклинория [Гарань, 1946; Шатский, 1960; Келлер, 1973; Козлов, 1982; Беккер, 1988; Семихатов и др., 1991; Стратиграфические..., 1993]. Так как ашинские образования с угловым несогласием залегают на разновозрастных отложениях верхнего рифея, то предашинский размыв Ю.Р. Беккер [1988] относил к числу наиболее существенных перерывов в разрезе верхнего докембрия Урала.

Несмотря на длительную историю изучения венда в Уральском регионе, проблематичными остаются вопросы объема и формационной принадлежности литостратиграфических единиц венда, взаимоотношение вендских отложений с подстилающими рифейскими тиманидами и перекрывающими палеозойскими уралидами, а отсутствие надежных радиометрических данных в отложениях как ашинской серии венда, так и в вендских образованиях других регионов привело к тому, что до сих пор дискуссионным является вопрос о возрасте нижней границы венда. В Общей шкале докембрия России по решению МСК [Дополнения..., 2000] она проводится на  $600\pm10$  млн лет; по мнению Н.М. Чумакова [2011], эта граница древнее (660 млн лет). В последние годы получена более достоверная Rb-Sr датировка (638±13 млн лет) бакеевской свиты (основание ашинской серии) по Al-глаукониту [Zaitseva et al., 2013; Кузнецов и др., 2014]. Датировка (638±13 млн лет) согласуется с возрастом нижних горизонтов венда других регионов, что позволило [Семихатов и др., 2015] оценить нижнюю границу венда в 640±5 млн лет. Неопределенность нижней границы венда на Южном Урале, по мнению В.Н. Пучкова [2010], связана также с наличием лакуны между вендом и рифеем. Лакуна эта может быть весьма значительной, если иметь в виду, что аршинская свита Тирлянской синклинали восточного крыла Башкирского мегантиклинория, считавшаяся нижневендской, переведена в верхи рифея [Козлов и др., 2011], и это значит, что на западном крыле Башкирского мегантиклинория она тоже попадает в размыв.

К пересмотру возраста и стратиграфической приуроченности аршинской свиты Тирлянской синклинали привели новые SHRIMP-датировки (707.0±2.3 млн лет и 732.1±1.7 млн лет), полученные по цирконам из аршинских вулканитов [Козлов и др., 2011; Краснобаев и др., 2012; Пучков и др., 2014], в результате чего в возрастном интервале 600-770 млн лет был выделен новый стратон: завершающий (терминальный) рифей — аршиний (аршинская серия [Козлов и др., 2011]). Выделение нового стратиграфического подразделения позволило уточнить границы и площадь развития вендской молассы и исключить комплекс фаций, которые были в нее ранее включены: вулканогенные (аршинский базитовый комплекс) и ледниковые (тиллиты махмутовской свиты завершающего рифея). Учитывая, что породы молассы по вещественному и гранулометрическому составу неоднородны и часто относятся к субграуваккам и лититовым аренитам, типично молассовыми образованиям могут считаться лишь отложения басинской, куккараукской и зиганской свит верхнего венда, породы которых имеют полимиктовый состав и разнообразную гранулометрию обломков.

# Ашинская моласса в опорных и стратотипических разрезах венда

Ашинская серия венда в типовых разрезах Алатауского антиклинория на западном крыле Башкирского мегантиклинория (Южный Урал) расчленена на бакеевскую, урюкскую, басинскую, куккараукскую и зиганскую свиты [Стратиграфические..., 1993]. Отложения ашинской серии в Алатауском антиклинории и в Сулеймановской антиклинали Каратауского структурного комплекса (рис. 1) распространены в бассейнах рек Аша,



Рис. 1. Схематическая геологическая карта и литолого-стратиграфическая колонка образований рифея и венда Башкирского мегантиклинория (Южный Урал) с расположением изученных разрезов. Составлена с использованием [Геологическая..., 2002; Козлов и др., 2011; Puchkov et al., 2014]

Условные обозначения. К карте: 1-5 — нерасчлененные отложения: 1 — палеозоя (PZ), 2 — венда (V), 3 — завершающего (RF<sub>4</sub>), 4 — верхнего (RF<sub>3</sub>) и 5 — нижнего – среднего (RF<sub>1-2</sub>) рифея; 6 — Уралтауский и Уфалейский метаморфические комплексы; 7 — магматические породы: габбро (a) и граниты (б); 8 — геологические границы; 9 — основные тектонические нарушения; 10 — местоположение разрезов (1 — р. Юрюзань в районе г. Усть-Катав, 2 — р. Инзер и руч. Агарды в районе д. Габдюк, 3 — р. Басу и дорожные выемки по автотрассе Уфа — Белорецк северо-западнее хут. Кулмас, 4 — вдоль а/д Уфа — Белорецк в 6 км западнее моста через р. Зуячку, 5 — по р. Мендым, 6 — по руч. Кук-Караук, 7 — по р. Зиган, 8 — Мазаринский и Барангуловский гранитные массивы); 11 — автодороги; 12 — железные дороги. *К колонке*: 1 — конгломераты полимиктовые (a) и иллиты (б); 2, 3 — песчаники: 2 — кварцевые (a) и полевошпат-кварцевые (б), 3 — аркозовые (a) и полимиктовые (б); 4 — алевролиты; 5 — аргилиты; 6 — известняки с микрофитолитами (a) и со строматолитами (b); 7 — доломиты с микрофитолитами (a) и со строматолитами (b); 12 — ашинская моласса.

# Fig. 1. The schematic geological map and lithologic-stratigraphic column of the Riphean and Vendian of the Bashkirian meganticlinorium (Southern Urals) with the positions of the studied sections. Compiled after [Geologicheskaya..., 2002; Kozlov et al., 2011; Puchkov et al., 2014]

Legend. For the map: 1-5 — unsubdivided deposits: 1 — Paleozoic (PZ), 2 — Vendian (V), 3 — Terminal (RF<sub>4</sub>), 4 — Upper (RF<sub>3</sub>)  $\mu$  5 — Lower-Middle (RF<sub>1-2</sub>) Riphean; 6 — Uraltau and Ufaley metamorphic complexes; 7 — magmatic rocks: gabbro (a) and granites (b); 8 — geological boundaries; 9 — main faults; 10 — positions of sections (1 — Yuryuzan river near Ust-Katav, 2 — Inzer river and Agardy stream near Gabdyuk village, 3 — Basu river and roadcuts along the Ufa – Beloretsk highway northwest of Kulmas settlement, 4 — along the Ufa – Beloretsk road 6 km to the west of the bridge over Zuyachka river, 5 — along the Mendym river, 6 — flong the Kukkarauk stream, 7 — along Zigan river, 8 — Mazara and Barangulovo granite massifs); 11 — automobile roads; 12 — railroads. For the column: 1 — conglomerates polymictic (a) and tillites (b); 2, 3 — sandstones: 2 — quartz (a) and feldspar-quartz (b), 3 — arkosic (a) and polymictic (b); 4 — siltstones; 5 — shales; 6 — limestones with microphytolites (a) and with stromatolites (b); 7 — dolomite with microphytolites (a) and with stromatolites (b); 8 — sericite-chlorite-quartz schists; 9 — quartzites; 10 — volcanogenic rocks; 11 — glauconite (a) and cherts (b); 12 — Asha molasse.

Юрюзань, Инзер, Басу, Зилим, Нугуш, Урюк, Кук-Караук, Зиган и др., где с размывом и угловым несогласием залегают на карбонатных породах укской, миньярской и редко инзерской свит верхнего рифея и перекрываются с размывом и угловым несогласием песчаниками такатинской свиты эмсского яруса нижнего девона. К долинам этих рек приурочены стратотипические и опорные разрезы; описания некоторых из них приведены в работах [Беккер, 1968, 1988; Козлов, 1982] и используются в нашей статье с учетом новых материалов, полученных авторами.

Как отмечено выше, ашинской молассе отвечают отложения басинской, куккараукской и зиганской свит ашинской серии верхнего венда (см. рис. 1), детальное описание разрезов которых приводятся ниже.

1. Разрез в правобережье р. Юрюзань в районе города Усть-Катав (см. рис. 1, точка 1) приведен по В.И. Козлову [Козлов и др., 1995]. В ашинской серии этого разреза не выделяется куккараукская свита и, по данным М.И. Гараня и А.П. Тяжевой [1967], в Сулеймановской антиклинали куккараукская свита вообще отсутствует.

Отложения басинской свиты описаны здесь в двух фрагментах.

 $V_2$ bs 1) На восточной окраине пригорода Шубино по левому берегу безымянного ручья в 1 км выше его устья в промоине дороги вскрыты песчаники полимиктовые, мелкозернистые, зеленовато-серые, с прослоями (от 1—2 до 5—7 см) алевролитов того же облика и состава, с мелкими знаками волновой ряби на поверхности напластования пород.

2) В придорожном карьере в 0.5 км к северу от последних домов на северной окраине города, вскрыты песчаники полимиктовые, мелкозернистые, зеленовато-серые, с прослоями (3–5 см) алевролитов того же состава, в свою очередь содержащих тонкие (1–3 мм) слойки аргиллитов зеленовато-серых, алевритистых. Падение слоистости СЗ 270–280° ∠10–15°. На верхней бровке карьера на песчаниках с видимым несогласием залегают аргиллиты зеленовато- и буровато-серые (зиганская свита?). Мощность басинской свиты в разрезе около 270 м (слой 22, рис. 2).

В придорожных выемках и в коренных выходах правого берега р. Юрюзань в городе Усть-Катав вдоль улицы, идущей на запад и к верхним постройкам северной окраины города, наблюдается следующий разрез зиганской свиты (см. рис. 2).

 $V_2$ zn 1. Неравномерное чередование песчаников полимиктовых, мелкозернистых, глинистых и алевролитов полимиктовых, песчанистых, зеленовато- и буровато-серых с матрацевидной отдельностью, тонкоплитчатых, трещиноватых. Алевролиты содержат прослои (толщиной 1–2 см) зеленовато-серых аргиллитов. Нижняя граница слоя не обнажена. Мощность 2.7 м.

2. Аргиллиты и алевролиты, аналогичные описанным выше, в неравномерном чередовании, с прослоями песчаников полимиктовых, мелкозернистых, зеленовато-серых. Алевролиты и аргиллиты имеют постепенные взаимопереходы, толщина прослоев их 10–20 см, реже 30 см, а песчаников от 2–3 до 5–7 см, иногда до 1 м. Падение слоистости 3 260–280° ∠10–15°. Нижняя граница слоя проведена по кровле последнего прослоя подстилающих песчаников. Мощность 16.8 м.

3. Песчаники полимиктовые, мелкозернистые, зеленовато-серые, глинистые, прослоями известковистые, обычно тонкоплитчатые, с пластинками (размер от 1×3 до 2×3–4 см при толщине до 1 мм) буровато-зеленовато-серых аргиллитов Нижняя граница слоя резкая и проведена по его подошве. Мощность 2.5 м.

4. Аргиллиты зеленовато-серые, прослоями алевритистые и нередко переходящие в полимиктовые алевролиты, отмечаются редкие и тонкие (2–5 см) прослои песчаников, аналогичных описанным в предыдущем слое. Нижняя граница слоя четкая и проведена по кровле подстилающих песчаников. Мощность 26 м.

5. Аргиллиты зеленовато-буровато-серые, иногда вишневые, с редкими прослоями (2–5 см) алевролитов полимиктовых, глинистых, по облику близких к аргиллитам. Нижняя граница слоя условная и проведена по кровле последнего прослоя подстилающего песчаника. Мощность 55 м.

6. Неравномерное чередование: алевролитов (преобладают) полимиктовых, зеленовато-серых, песчаников того же состава и близкого облика и аргиллитов зеленовато-серых, реже вишневокрасных, с мелкой обломочной слюдой по поверхностям напластования. В аргиллитах присутствуют маломощные туфовые прослои, возраст которых определен 548.2 млн лет по цирконам [Гражданкин и др., 2011]. Нижняя граница слоя не обнажена. Мощность 15 м.

Далее разрез продолжается по промоине вверх (в 15 м от подножья склона).

7. Аргиллиты зеленовато-серые, иногда с голубоватым оттенком, плотные, с неровным изломом, с прослоями полимиктовых песчаников (толщина прослоев от 3 до 5—6 см, очень редко 10 см)



# Рис. 2. Геологическая карта (А) с номерами обнажений и стратиграфическая колонка (Б) отложений венда по правому берегу р. Юрюзань в районе города Усть-Катав

Условные обозначения. К геологической карте (A): 1 — отложения: инзерской ( $R_3$ in), миньярской ( $R_3$ mn) и укской ( $R_3$ uk) свит верхнего рифея; бакеевской ( $V_1$ bk), урюкской ( $V_2$ ur), басинской ( $V_2$ bs) и зиганской ( $V_2$ zn) свит венда; такатинского горизонта ( $D_1$ etk) нижнего девона; эйфельского ( $D_2$ ef<sub>2</sub>) яруса среднего девона; франского ( $D_3$ f) и фаменского ( $D_3$ fm) ярусов верхнего девона; нижнего карбона ( $C_1$ ); башкирского ( $D_2$ b) и московского ( $C_2$ m) ярусов среднего карбона; верхнего карбона ( $C_3$ ); четвертичные (Q); 2 — песчаники; 3 — геологические границы: достоверные (а), предполагаемые (б); 4 — обнажение и его номер; 5 — автомагистраль Москва — Владивосток. К стратиграфической колонке (E): 1 — конгломераты; 2 — гравелиты; 3—6 — песчаники: 3 — кварцевые, 4 — полевошпат-кварцевые (а) и известковистые (б), 5 — аркозовые, 6 — полимиктовые; 7 — алевролиты; 8 — аргиллиты; 9 — туфы. \* — 548.2 млн лет [Гражданкин и др., 2011].

# Fig. 2. Geological map (A) with numbers of outrops and stratigraphic column (B) of Vendian deposits at the right bank of Yuryuzan river in Ust-Katav town

*Legend. For the geological map (A):* 1 – deposits: of the Inzer ( $R_3$ in), Minyar ( $R_3$ mn), and Uk ( $R_3$ uk) Formations of the Upper Riphean; Bakeevo ( $V_1$ bk), Uryuk ( $V_2$ ur), Basu ( $V_1$ bs) and Zigan ( $V_2$ zn) Formations of the Vendian; Takata Horizon ( $D_1$ etk) of the Lower Devonian; Eifelian ( $D_2$ ef<sub>2</sub>) Stage of the Middle Devonian; Frasnian ( $D_3$ f) and Famennian ( $D_3$ fm) Stages of the Upper Devonian; Lower Carboniferous ( $C_1$ ); Bashkirian ( $C_2$ b) and Moscovian ( $C_2$ m) Stages of the Middle Carboniferous; Upper Carboniferous (C3); Quarternary (Q); 2 – sandstones; 3 – geological boundaries: reliable (a), suggested (b); 4 – an outcrop and its number; 5 – Moscow–Vladivostok highway. *To stratigraphic column (B):* 1 – conglomerates; 2 – gravelstones; 3–6 – sandstones: 3 – quartz, 4 – feldspar-quartz (a), limy (b), 5 – arkose, 6 – polymictic; 7 – siltstone; 8 – shale, 9 – tuff. \* – 548.2 Ma [Grazhdankin et al., 2011].

и алевролитов также полимиктовых, зеленоватосерых со слабым буроватым оттенком. Нижняя граница слоя не обнажена. Мощность 15 м.

8. Алевролиты вишнево-красные, тонкими слойками и отдельными пятнами зеленовато-серые, в основании — песчаники полимиктовые, мелкозернистые, зеленовато-серые, плотные, слюдистые (толщина прослоя изменяется от 14 до 20 см). Нижняя граница слоя резкая и проведена по подошве песчаников. Мощность 4.8 м.

9. Вдоль контакта с перекрывающими такатинскими песчаниками на протяжении 12 м с юга на север обнажены:

9.1. Песчаники полимиктовые, мелко- и среднезернистые, зеленовато-серые, плотные, косослоистые, с мелкой обломочной слюдкой. На верхних 3–5 см слоя песчаники глинистые и даже переходят в алевролиты. Нижняя граница слоя четкая и проведена по его подошве. Мощность 0.16 м.

9.2. Алевролиты полимиктовые в переслаивании с аргиллитами; цвет пород зеленовато-серый, много обломочной слюдки. Нижняя граница слоя резкая и проведена по кровле подстилающих песчаников. Мощность 0.6 м.

9.3. Аргиллиты зеленовато-серые, местами (прямо под перекрывающими такатинскими песчаниками) темно-серые, плотные. Нижняя граница слоя условная и проведена по кровле подстилающих алевролитов. Падение слоистости C3 290–300° ∠14°. Мощность их на протяжении 10 м вдоль контакта с такатинскими песчаниками изменяется от 0–7 см до 25–40 см и 80–100 см.

**D**<sub>1</sub>*etk* 10. Песчаники кварцевые, кварцитовидные, разнозернистые (от мелко- до крупнозернистых и гравийных), светло-серые, желтовато-светлосерые, иногда серые, массивные, косослоистые, прослоями переходящие в гравелиты и в редкои мелкогалечные конгломераты. Мощность 3.4 м.

Суммарная мощность отложений басинской (270 м) и зиганской (150 м) свит в районе города Усть-Катав составляет 420 м и отвечает мощности молассовых образований южного замыкания Сулеймановской антиклинали.

2. Разрез по р. Инзер и руч. Агарды в районе д. Габдюк (см. рис. 1, точка 2), представлен двумя фрагментами, в которых вскрыты басинская, куккараукская и зиганская свиты. Обн. 3623 (N 54° 27.194' Е 057° 15.958') находится на левом берегу р. Инзер в районе д. Габдюк, где в береговых скалах вскрыты (рис. 3):

 $V_2$ bs 1. Неравномерное переслаивание алевролитов мезомиктовых, зеленовато-серых, тонко-

плитчатых, аргиллитов серых и зеленовато-серых, листоватых, алевритистых и песчаников полимиктовых, мелко- и среднезернистых, серых со слабым зеленоватым оттенком, слюдистых, плитчатых, крепких. В переслаивании преобладают алевролиты и аргиллиты, песчаники подчинены. Падение слоистости СВ 40° ∠18°. Нижняя граница слоя не вскрыта эрозией. Мощность 15 м.

2. Песчаники полимиктовые, разнозернистые (от мелко- до крупнозернистых), зеленовато-серые, массивные и грубоплитчатые, плотные, крепкие. В песчаниках отмечается ожелезнение по трещинам и в виде ореолов. В кровле слоя по напластованию в песчаниках наблюдаются плоские окатанные гальки (размером 7×3 мм, 4×5 мм, 12×14 мм) серых аргиллитов. Падение слоистости BCB 70–75° ∠25–30°.

Песчаники содержат редкие маломощные (5–10 см) прослои серых и зеленовато-серых алевролитов и аргиллитов и неровные линзовидные слойки, обогащенные глинистым материалом. Песчаники разбиты трещинами вкрест и по слоистости. Нижняя граница слоя четкая и проведена по подошве песчаника, перекрывающего пачку (мощностью 0.4 м) переслаивания алевролитов и аргиллитов подстилающего слоя. Мощность 10 м.

3. Неравномерное чередование песчаников полимиктовых, мелко- и среднезернистых, серых и зеленовато-серых, массивных, прослоями плитчатых, плотных, крепких, иногда трещиноватых и слюдистых, с алевролитами, аналогичными по составу и облику нижележащим песчаникам, и аргиллитами серыми с зеленоватым оттенком. Аргиллиты тонкими прослоями и пятнами имеют темно-вишневый цвет. В переслаивании преобладают песчаники. Падение слоистости ВСВ 70° ∠30°. Мощность 12 м.

4. Песчаники полимиктовые, мелко-, среднеи крупнозернистые, зеленовато-серые и серые, массивные и плитчатые (5–15 см) в кровле слоя. В песчаниках отмечаются не выдержанные по мощности слойки и тонкие «пластинки» вишневых аргиллитов, вокруг пластинок наблюдаются ореолы ожелезнения толщиной 0.5 см. Более мелкие пластинки аргиллитов имеют серую и темно-серую окраску. В основании и кровле слоя отмечаются тонкие (3–5 см) прослои алевролитов полимиктовых, зеленовато-серых, тонкоплитчатых. На плоскостях наслоения наблюдаются текстуры тонких мелких струй. Нижняя граница четкая и проведена по подошве песчаника (30 см), залегающего на аргиллитах (20 см). Мощность 15 м.



Условные обозначения см. рис. 1 и 2.

Fig. 3. The geological section (A) and lithologic-stratigraphic column (B) of the Basu Formation deposits along Inzer river in the Gabdyuk village (outcrop 3623) For legend see figs. 1 and 2.

5. Неравномерное переслаивание песчаников полимиктовых, разнозернистых (преимущественно среднезернистых), зеленовато-серых, массивных, аргиллитов темно-серых с зеленоватым оттенком и вишневых на верхних 80—90 см, тонкоплитчатых до листоватых и алевролитов полимиктовых, серых, слюдистых, тонкоплитчатых. В песчаниках на контакте с алевролитами отмечены округлые сферические охристые обособления. Нижняя граница слоя четкая и проведена по подошве прослоя (60 см) аргиллитов. В переслаивании преобладают песчаники и аргиллиты, алевролиты подчинены. Падение слоистости СВ 65–70° ∠25–30°. Мощность 10 м.

6. Песчаники полимиктовые, разнозернистые, зеленовато-серые, массивные. В песчаниках наблюдаются пластинки и галечки зеленых и вишневых аргиллитов, ориентированные и по слоистости, и перпендикулярно ей. Песчаники содержат редкие маломощные (10—30 см) прослои алевролитов аналогичного песчаникам состава и облика. Отмечаются прослои более глинистых серых алевролитов. Алевролиты находятся в тонком неравномерном чередовании с аргиллитами серыми, тонкоплитчатыми. По напластованию пород наблюдаются знаки ряби, волнений, течений, своеобразные текстуры взмучивания. Нижняя граница слоя проведена по подошве массивного песчаника. Мощность 16 м.

0

10

7. Грубое неравномерное чередование песчаников полимиктовых, разнозернистых (преимущественно среднезернистых), зеленовато-серых, известковистых, массивных и серых алевролитов аналогичного песчаникам состава. Алевролиты находятся в неравномерном переслаивании с серыми аргиллитами. Мощность прослоев песчаников колеблется от  $1-2 \,\mathrm{cm} \,\mathrm{дo} \, 0.5 \,\mathrm{m}$ , глинистых прослоев (аргиллит + алевролит) — от 10 см до 1 м. По напластованию пород наблюдаются знаки течений, текстуры взмучивания. Нижняя граница слоя проведена по кровле подстилающего песчаника. Падение слоистости ВСВ 70–75°  $\angle 20-25^\circ$ . Мощность 24 м.

8. Алевролиты глинисто-кварцевые, серые, слюдистые, известковистые, тонкоплитчатые в переслаивании с аргиллитом. Мощность 2 м.

3623

9. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, зеленовато-серые, известковистые, массивные, с прослоями алевролитов аналогичного песчаникам состава и облика и серых глинисто-кварцевых алевролитов с тонкими пластинками и слойками вишневых и серых аргиллитов. Мощность алевролитовых прослоев от 10 до 40 см. Падение слоистости BCB 60–70° ∠20°. Нижняя граница слоя четкая и проведена по кровле подстилающих алевролитов. Мощность 36 м.

Разрез басинской свиты наращивается по руч. Агарды, правому притоку р. Инзер, в 2 км севернее д. Габдюк, где по правому берегу ручья и его руслу (см. рис. 1, точка 2 и рис. 4) обнажены.

**V**<sub>2</sub>**bs** 1. Неравномерное переслаивание: алевролитов мезомиктовых, буровато-коричневатосерых, тонкоплитчатых; аргиллитов коричневатобуровато-серых и темно-вишневых, тонколистоватых; песчаников мезомиктовых, мелкозернистых, коричневато-серых и зеленовато-серых в кровле слоя, плитчатых (1–2–5 см), иногда известковистых. В переслаивании преобладают алевролиты и аргиллиты, песчаники подчинены. Падение слоистости CB 60–80° ∠10–15°. Нижняя граница слоя задернована. Мощность 5 м.

2. Тонкое неравномерное чередование: аргиллитов алевритистых, темно-вишневых и серых; алевролитов мезомиктовых, зеленовато-серых и серых с вишневым оттенком; песчаников мезомиктовых, мелкозернистых, зеленовато-серых, иногда известковистых, с тонкими аргиллитовыми слойками. Песчаники резко подчинены. Падение слоистости CB 50° ∠10°. Мощность 8 м.

3. Алевролиты полимиктовые, серые, тонкоплтитчатые, с прослоями (1–2 см) песчаников полимиктовых, зеленовато-серых и темно-вишневых в тонких слойках, алевритистых. Нижняя граница слоя проведена по кровле песчаника подстилающего слоя. Мощность 7 м.

4. Аргиллиты серые, прослоями алевритистые, тонкоплитчатые. Нижняя граница слоя нечеткая, отмечается постепенный переход к подстилающим алевролитам. Мощность 5 м.

5. Неравномерное чередование алевролитов полимиктовых, серых с зеленоватым и в тонких слойках вишневым оттенком, тонкоплитчатых с тонкими прослоями аргиллитов серых, редко вишнево-красных и песчаников полимиктовых, мелко- и среднезернистых, зеленовато-серых. Редкие прослои песчаников имеют мощность от 1–2 см до 25–80 см. Нижняя граница слоя проведена по подошве светло-серого известковистого песча-

ника мощностью 80 см. Падение слоистости СВ 50-70° ∠15-20°. Мощность 25 м.

6. Алевролиты полимиктовые, зеленоватосерые, разноплитчатые. Падение слоистости СВ 60° ∠10–15°. С подстилающими породами алевролиты связаны постепенным переходом, нижняя граница условная. Мощность 45 м.

**V**<sub>2</sub>**kk** 7. Задерновано по мощности 10 м. Обломки и глыбы полимиктовых песчаников и гравелитов.

8. Разрозненные выходы по склону песчаников полимиктовых, средне- и крупнозернистых, с гравием и мелкой галькой кварца, алевролита и др., коричневато-серых и темно-вишневых, плитчатых. Песчаники содержат прослои гравелитов (0.5 м). Породы слоисты за счет неравномерного распределения обломочного материала (градационная слоистость). Падение слоистости СВ 80° ∠15–20°. Нижняя граница слоя проведена условно. Мощность 10 м.

9. Конгломераты полимиктовые, разногалечные, преимущественно мелко- и среднегалечные. Галька преимущественно хорошо окатанная, эллипсоидальной, реже неправильной формы. Имеет размеры: 11×10×13 см, 2×2.5×2 см, 1.5×3×2 см, 4×6×6 см, 2.5×4×4 см, 6×8.5×5.5 см, 2×4.5×2.5 см. Преобладают гальки жильного молочно-белого кварца и песчаников кварцевых, мелко- и среднезернистых, темно-вишневых и светло-серых, иногда катаклазированных. Темно-вишневые разности песчаников слюдистые и содержат светлосерые пятна (размером 2×2 мм) с тонким черным ореолом. В меньшем количестве присутствуют розовато-красные кварцевые сиениты с порфировой структурой, плагиограниты, гранит-порфиры и крупнокристаллические граниты, кварцито-песчаники серые с зеленоватым или вишневым оттенком, кварциты. Заполнитель конгломератов гравелиты и песчаники, последние иногда обособляются в прослои толщиной 15-20 см. Нижняя граница слоя проведена по подошве конгломератов. Мощность 50 м.

V<sub>2</sub>zn 10. Песчаники полимиктовые, мелкозернистые, буровато- и зеленовато-серые, тонкоплитчатые и алевролиты полимиктовые, голубоватозеленовато-серые, тонкоплитчатые, с прослоями песчаников аналогичного алевролитам состава и облика. На поверхности напластования алевролитов отмечаются слабые валики (знаки ряби течения). Падение слоистости В 90° ∠20°. Контакт куккараукской и зиганской свит задернован и нижняя граница слоя проведена условно. Мощность более 20 м.



 $\triangleleft$ 



Геологический вестник. 2019. №1

Суммарная мощность басинской (240 м), куккараукской (70 м) и зиганской (более 20 м) свит в описанных фрагментах более 330 м.

В замыкании Алатауского антиклинория, по [Беккер, 1988], суммарная мощность басинской (800 м), куккараукской (230 м) и зиганской (325 м) свит в разрезе по р. Инзер и руч. Агарды составляет 1355 м.

Нам представляется несколько завышенной мощность басинской и куккараукской свит, но решение этого вопроса требует дополнительного изучения отложений в северном периклинальном замыкании Алатауского антиклинория.

3. Разрез в дорожных выемках по автотрассе Уфа – Белорецк (правобережье р. Басу у хут. Кулмас. Обнажение 18) находится на западном крыле Алатауского антиклинория (см. рис. 1, точка 3). Здесь в разрозненных гривках и дорожных выемках вскрыты (рис. 5, описание разреза по В.И. Козлову [Козлов и др., 2008ф]):

V<sub>2</sub>bs 3. Алевролиты слюдисто-полевошпаткварцевые, крупнозернистые, зеленовато-серые, плотные, крепкие, с мелкой обломочной слюдкой и с редкими прослоями (от 2-5 до 8-14 мм) аргиллитов темно- и зеленовато-серых, реже желтоватокоричневых, слюдистых и (от 0.5 до 25 см, редко 40 см) песчаников субаркозовых, мелкозернистых, зеленовато-серых. Границы слойков алевролитов и песчаников четкие, но постепенные, за счет примеси пелитового и алевропсаммитового материала, соответственно в кровле и подошве отмеченных разностей. В верхней части слоя видны зеркала скольжения, как правило, совпадающие с границами прослоев алевролитов. Вероятно, к ним приурочены небольшие разрывные нарушения. Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости C3 290-300° ∠60-65°. Мощность 34 м.

4. Неравномерное чередование алевролитов и песчаников, аналогичных описанным в предыдущем слое. Нижняя граница слоя четкая и проведена по подошве алевролита в основании данной пачки. Падение слоистости СЗ 290° ∠58°. Мощность 4.5 м.

5. Песчаники полимиктовые, мелкозернистые, зеленовато-серые, плотные, крепкие, массивные, с обильной мелкой обломочной слюдкой. В верхней половине слоя (в 20, 65, 40 и 110 см от кровли) отмечаются редкие (3–4 см) прослои алевролитов полимиктовых, зеленовато-серых, тонкоплитчатых, слюдистых. Нижняя граница слоя резкая и проведена по подошве песчаника. Падение слоистости C3 280–290° ∠57°. Мощность 4 м. 6. Неравномерное чередование полимиктовых алевролитов и песчаников. Алевролиты зеленовато-серые, разноплитчатые, с тонкими (2–4 мм) слойками аргиллитов; песчаники зеленовато-серые, алевритистые, кварцитовидные, неравномернозернистые, разноплитчатые (от 3–5 до 20–30 см) на всю толщину слойков. Переход между песчаниками и алевролитами постепенный, что подчеркивает наличие слойков (от 1 до 4 см), обогащенных псаммитовым материалом. В переслаивании преобладают алевролиты (55% мощности слоя), толщина прослоев которых от 2 до 30 см. Нижняя граница слоя четкая и проведена по кровле подстилающих песчаников. Мощность 4.5 м.

7. Песчаники полимиктовые, мелко- и среднезернистые, зеленовато-серые, массивные, плотные, крепкие, с мелкой обломочной слюдкой. На первых 8 м песчаники содержат редкие прослои толщиной 2–5 см алевролитов того же состава, зеленовато-серых, разноплитчатых. Такие прослои отмечаются примерно через 65–100 см. На последующих 3 м толщина прослоев алевролитов увеличивается до 10 см и они отмечаются через каждые 20–40 см. Нижняя граница слоя четкая, резкая и проведена по подошве первого мощного пласта песчаника. Падение слоистости СЗ 290° ∠58°. Мощность 29 м.

8. Неравномерное чередование полимиктовых песчаников среднезернистых и алевролитов зеленовато-серых, разноплитчатых, с мелкой обломочной слюдкой. Среди алевролитов отмечаются редкие прослои (толщина 3–5 см) голубовато-серых разностей. В переслаивании преобладают песчаники (около 80%). Нижняя граница слоя четкая, резкая и проведена по кровле последнего сравнительно мощного прослоя подстилающего песчаника. Падение слоистости СЗ 285° ∠70°. Мощность 17 м.

9. Аргиллиты вишнево-красные, слюдистые, участками кальцитизированные, большей частью тонкоплитчатые, отдельными прослоями (2–5 см) они алевритистые, более плотные. Нижняя граница слоя четкая и проведена по кровле подстилающих песчаников. Мощность 3 м.

10. Песчаники полимиктовые, мелко- и среднезернистые, зеленовато-серые, разноплитчатые, слюдистые, с прослоями (от 0.5–5 см до 0.4–0.8 м) алевролитов, аналогичных описанным в слое 8. В 28 м от основания слоя встречена пачка (0.8 м) переслаивания разноплитчатых зеленовато-серых алевролитов и аргиллитов. Переход между слоями 9 и 10 постепенный через переслаивание, а нижняя граница



Рис. 5. Стратиграфическая колонка (А) отложений басинской и куккараукской свит по автотрассе Уфа – Белорецк на правобережье р. Басу у хут. Кулмас. Обн. 18. Скальные выходы (Б) конгломератов куккараукской свиты. Фото Н.Д. Сергеевой Условные обозначения см. рис. 1 и 2.

Fig. 5. Lithologic-stratigraphic column (A) of Basu and Zigan Formations along the Ufa – Beloretsk highway at the right bank of Basu river near Kulmas settlement. Outcrop 18. Rock exposures (Б) of conglomerates of Kukkarauk Formation. Photo by N.D. Sergeeva *Legend* in the figs. 1 and 2.

слоя 10 проведена по подошве первого (17 см) прослоя песчаника. Преобладающее падение слоистости СЗ 280–290° ∠50–70°. Мощность 35 м.

11. Алевролиты полимиктовые, зеленоватосерые, разноплитчатые, прослоями переходящие в аргиллиты того же цвета, но с вишневым оттенком. В 75 см от основания в алевролитах отмечаются прослои песчаников толщиной от 4–6 до 10– 25 см, аналогичных описанным в слое 10. Нижняя граница слоя четкая и проведена по кровле подстилающего песчаника. Падение слоистости СЗ 290° ∠60–70°. Мощность 6 м.

12. Неравномерное чередование песчаников, алевролитов и аргиллитов, аналогичных описанным в слое 8. Песчаники мелкозернистые, зеленовато-серые, разноплитчатые. Нижняя граница слоя резкая и проведена по подошве песчаника. Мощность 4 м.

13. Песчаники полимиктовые, мелкозернистые, зеленовато-серые, неравномерно толстоплитчатые. Нижняя граница слоя четкая. Падение слоистости СЗ 290° ∠70°. Мощность 4 м.

14. Неравномерное чередование песчаников, алевролитов и аргиллитов, по облику и составу близких к таковым из слоя 12. Песчаники полимиктовые, мелкозернистые, зеленовато-серые, разноплитчатые (от 3-5 до 12 см). Они переполнены обычно мелкой обломочной слюдкой, по плоскостям наслоения в них часто видны пластинки округлой или удлиненной формы (размером от 1×1.5 до 5×8 см при толщине от 1 до 5 мм) зеленовато-серых аргиллитов. Причем отмечается определенная закономерность в распределении этих пластинок: на отдельных плоскостях видны только мелкие, а в других — только крупные. В щебенке видна волновая рябь. Алевролиты также полимиктовые, зеленовато-серые, прослоями вишневокрасные, тонкоплитчатые, крупно- и мелкозернистые. Аргиллиты вишнево-красные, тонкоплитчатые. Нижняя граница слоя резкая и проведена по кровле подстилающих песчаников. Падение слоистости C3 290° ∠70°. Мощность 95 м.

15. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, зеленовато-серые, толсто- и неравномерноплитчатые, с мелкой обломочной слюдкой. Отмечаются редкие прослои (2–4 см) алевролитов зеленовато-серых и вишнево-красных. Нижняя граница слоя четкая и проведена по подошве толстослоистых песчаников. Падение слоистости СЗ 290° ∠62°. Мощность 70 м.

16. Песчаники полимиктовые, мелко- и среднезернистые, массивные, толсто- и разноплитча-

тые (от 20–40 до 80–100 см), преобладают зеленовато-серые разности, но есть и вишнево-красные. Спорадически отмечаются прослои (от 3–5 см до 0.8–1.2 м) зеленовато-серых полимиктовых алевролитов, в свою очередь содержащих слойки (1–2 мм) вишнево-красных (малиновых) аргиллитов. Более мощные прослои алевролитов появляются в 80 м от основания слоя, а до 30 м они отмечаются в маломощных и редких слойках. Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости C3 290° ∠75°. Мощность 165 м.

17. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, желтовато-коричневые и зеленовато-серые, есть прослои мелко- и среднезернистых, вишнево-красных разностей. Обнаженность слоя недостаточная, отмечаются разрозненные гривковые выходы. Нижняя граница слоя не обнажена. Мощность 65 м.

18. Аргиллиты зеленовато-серые, прослоями вишнево-красные, тонкоплитчатые и тонкослоистые. Слоистость обусловлена чередованием слойков (толщиной 1–2 мм) различной окраски, с прослоями (от 1–3 до 8 см) через каждые 10–15–20 см алевролитов полимиктовых, мелкозернистых, зеленовато-серых. Нижняя граница слоя не обнажена. Ориентировочное падение слоистости ЮЗ 240° ∠30–40°. Мощность 30 м.

**V**<sub>2</sub>**kk** 19. Песчаники полимиктовые, разнозернистые, зеленовато-серые с сиреневатым оттенком, отдельными прослоями вишнево-красные, с тонкими (1–2 см) прослоями, содержащими гравий и редкую мелкую гальку молочно-белого жильного кварца. Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости ЮЗ 245° ∠47°, к западу по ходу разреза — угол падения становится круче и достигает 70°. Мощность 120 м.

20. Конгломераты мелкогалечные, полимиктовые. Галька размером от 0.5–1×2 до 2×5 см округлой или слегка уплощенной формы, степень окатанности ее разная: наряду с хорошо окатанной галькой (она преобладает) присутствует полуокатанная и угловатая. Сортировка обломочного материала слабая, соотношение его с цементом меняется от 5:1 до 1:4. В составе гальки отмечены: жильный кварц (преобладает), кварцито-песчаники зеленовато-серые, светло-серые полимиктовые, кварцевые и полевошпат-кварцевые песчаники и алевролиты. Цемент конгломератов представлен светло- и желтовато-серыми гравийными полимиктовыми песчаниками, гравийный материал по составу аналогичен гальке конгломератов, но появляется розовый полевой шпат. Границы конгломератов с вмещающими породами не обнажены. Падение слоистости СЗ 280° ∠80°. Мощность около 30 м.

Суммарная мощность отложений басинской (600 м), куккараукской (150 м) в обнажении 18 и зиганской (200 м) [Беккер, 1988] свит в разрезе вдоль автотрассы Уфа – Белорецк в правобережье р. Басу у хут. Кулмас составляет 950 м.

4. Разрез вдоль автотрассы Уфа – Белорецк в 6 км западнее моста через р. Зуячку находится на восточном крыле Алатауского антиклинория в 7.9 км к СЗ 285° от высоты с отм. 780.3 м (тригопункт на западном склоне хр. Зильмердак), и в 3.5 км к СЗ 296° от устья р. Ниж. Сакашли (см. рис. 1, точка 4). Здесь в скалах и дорожных выемках (обнажения 101, 102 и 103, рис. 6) вскрыты (снизу) в обнажении 101 (N 54° 19.750' Е 057° 15.072'):

V<sub>2</sub>bs 1. Переслаивание алевролитов полимиктовых, серых и темно-серых, слюдистых по напластованию, тонко- и среднеплитчатых и аргиллитов зеленовато-серых, тонкоплитчатых. Переход аргиллитов в алевролиты постепенный. Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости ЮВ 110° ∠55–60°. Вскрытая мощность 2 м.

2. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, зеленовато-серые, массивные, с линзами (30×50 см) грубозернистых и гравийных разностей, зеленовато-серых, с зеркалами скольжения. Нижняя граница слоя проведена по подошве массивного песчаника. Падение слоистости ЮВ 115° ∠65°. Мощность 2.5 м.

3. Неравномерное переслаивание алевролитов полимиктовых, зеленовато-серых, тонкоплитчатых и аргиллитов темно-вишнево-красных и зеленовато-серых, тонкоплитчатых. Толщина аргиллитовых прослоев колеблется от 0.4 до 1.2 м, а алевролитовых — от 0.6 до 1.2 м. В алевролитах отмечаются редкие прослои (5–30 см) песчаников полимиктовых, мелкозернистых, зеленовато-серых, алевритистых, слоистых за счет наличия нитевидных слойков, обогащенных темно-зеленым глинистым материалом. Нижняя граница слоя проведена по кровле песчаников. Падение слоистости ЮВ 110° ∠65°. Мощность 25 м.

4. Переслаивание песчаников полимиктовых, мелко- и среднезернистых, зеленовато-серых, массивных; аргиллитов вишнево-красных и зеленых, алевритистых и алевролитов полимиктовых, зеленовато-серых, тонко- и среднеплитчатых. На контакте с аргиллитами в песчаниках отмечается обилие аргиллитовых галек (размером от 1 до 5 см) темновишневого цвета. Нижняя граница слоя резкая и проведена по подошве песчаника. Падение слоистости ЮВ 110–120° ∠40–45°. Мощность 12 м.

5. Песчаники полимиктовые, мелко- и среднезернистые, зеленовато-серые, массивные, иногда в них отмечается слоистость, обусловленная чередованием светлых и более темноокрашенных слойков в зависимости от содержания глинистого материала. Песчаники содержат прослои (0.1–0.7 м) алевролитов полимиктовых, зеленовато-серых, кварцитовидных, тонкоплитчатых, а в кровле слоя — аргиллитов (толщина прослоев 5–20 см) зеленовато-серых, с алевритовой примесью кварца, полевого шпата, гидрослюд и др. Нижняя граница слоя резкая и проведена по кровле подстилающих алевропелитов. Падение слоистости В 90–100° ∠30–45°. Мощность 45 м.

6. Переслаивание песчаников полимиктовых, среднезернистых, серых и зеленовато-серых, известковистых, массивных и алевролитов аналогичного песчаникам состава и облика, тонкоплитчатых, слюдистых по напластованию. Алевролиты содержат (до 1 см) прослои аргиллитов вишневокрасных и зеленовато-серых. На контакте с песчаниками в аргиллитах сохраняются своеобразные текстуры течения, а в самих песчаниках наблюдаются галечки и линзочки аргиллитов. В переслаивании преобладают песчаники, которые составляют около 60% мощности. Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости ВЮВ 90–105° ∠40–45°. Мощность 75 м.

7. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, зеленовато-серые, слюдистые, средне-, реже грубоплитчатые, с прослоями (20–35 см) алевролитов полимиктовых, зеленовато- или буроватосерых, которые в свою очередь переслаиваются с аргиллитами темно-вишневыми и зеленовато-серыми. Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости В 90–100° ∠40–65°. Мощность 45 м.

8. Песчаники полимиктовые средне- и крупнозернистые, зеленовато-серые, массивные, с градационной слоистостью, обусловленной послойным обогащением гравийным материалом. Отмечаются линзы гравийных песчаников и единичные прослои (3–5 см) алевролитов полимиктовых, серых с зеленоватым оттенком, а также тонкие (1–2 мм) слойки вишнево-красных аргиллитов. В песчаниках наблюдаются аргиллитовые галечки (размером от 1×1 до 3×15 см и 8×12 см). Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости В 90° ∠40–45°. Мощность 8 м.

9. Переслаивание песчаников полимиктовых, средне- и мелкозернистых, зеленовато-серых,



Геологический вестник. 2019. №1

массивных, известковистых, с гальками вишневых аргиллитов и алевролитов полимиктовых, зеленовато- и буровато-серых, с прослоями аргиллитов темно-вишневых. Алевролито-аргиллитовые пачки в переслаивании достигают толщины 1.5 м. Нижняя граница слоя резкая и проведена по подошве песчаников. Падение слоистости ВЮВ 90–100° ∠20–45°. Мощность 50 м.

10. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, прослоями мелкозернистые и гравийные, зеленовато-серые, массивные, слабо известковистые, с редкими маломощными прослоями (от 1–3 до 10 см) аргиллитов вишнево-красных и гравелитов полимиктовых. Гравийный материал (45–48%) представлен кварцитами, кварцитопесчаниками, песчаниками кварцевыми с серицитовым цементом, туфопесчаниками, кварцем, сланцами мусковит-кварцевыми, алевролитами и др. В кровле слоя появляются алевролиты полимиктовые, зеленовато-серые, слюдистые. Нижняя граница слоя резкая и проведена по подошве гравийного песчаника. Падение слоистости В 90° ∠45°. Мощность 5 м.

11. Неравномерное переслаивание аргиллитов темно-вишневых и зеленовато-серых, тонкоплитчатых и алевролитов и песчаников полимиктовых, мелкозернистых, зеленовато-серых, плитчатых. Нижняя граница слоя проведена по подошве аргиллитовой пачки. Падение слоистости ЮВ 100– 105° ∠45°. Мощность 22 м.

12. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, зеленовато-серые, с рассеянными гравийными зернами, с маломощными прослоями алевролитов аналогичного песчаникам состава и облика. Нижняя граница слоя не обнажена. Мощность 40 м.

13. Неравномерное переслаивание песчаников полимиктовых, среднезернистых, зеленовато-серых, алевролитов полимиктовых, зеленовато-серых, тонко- и среднеплитчатых и аргиллитов темновишневых, тонкоплитчатых. В песчаниках отмечается галька (размером 1×3×3.5 см) песчаников полимиктового состава. Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости ВЮВ 100° ∠45–50°. Мощность 45 м.

14. Переслаивание песчаников, алевролитов и аргиллитов, аналогичное описанному в слое 13, но алевролиты имеют резко подчиненное значение. Толщина прослоев песчаника меняется от 0.5 до 3 м, а аргиллитов — от 0.6 до 2.7 м. Нижняя граница слоя резкая и проведена по подошве аргиллитовой пачки. Падение слоистости ЮВ 110° ∠45°. Мощность 15 м.

15. Песчаники полимиктовые, средне- и крупнозернистые, зеленовато-серые, массивные, с маломощными редкими прослоями аргиллитов темно-вишневых и алевролитов полимиктовых, зеленовато-серых. Вблизи контакта с аргиллитами в песчаниках наблюдается обилие аргиллитовых уплощенных галек, размер которых достигает 10×12 см. Нижняя граница слоя резкая и проведена по кровле подстилающей аргиллитовой пачки. Падение слоистости ВЮВ 90–100° ∠45–60°. Мощность 50 м.

16. Аргиллиты темно-вишневые и реже зеленые, тонкоплитчатые, с прослоями алевролитов полимиктовых, зеленовато- и буровато-серых, тонкоплитчатых. Отмечаются единичные прослои (от 5 до 20 см) песчаников полимиктовых, среднезернистых, буровато-зеленовато-серых. Нижняя граница слоя резкая и проведена по кровле подстилающих песчаников. Падение слоистости ЮВ 120° ∠40°. Мощность 12 м.

17. Песчаники полимиктовые, средне- и крупнозернистые, зеленовато-серые, массивные, с послойно неравномерным обогащением гравийным материалом, с тонкими слойками и галькой аргиллитов. Размер гальки колеблется от 1×1×3 до 5×8×2 см, окатанность ее слабая. Гравийный материал, обособленный в виде прерывистых слоев и линз, представлен кварцитами, кварцито-песчаниками, кремнями, кварцем, алевролитами, липаритами, базальтами и др. Преобладают в гравийных зернах осадочные породы. Нижняя граница слоя проведена по подошве массивного песчаника. Падение слоистости В 95° ∠60°. Мощность 25 м.

18. Неравномерное переслаивание алевролитов полимиктовых, зеленовато-серых, содержащих тонкие аргиллитовые прослои темно-вишневого или зеленовато-серого цвета, и песчаников полимиктовых, среднезернистых, зеленовато-серых, средне- и крупноплитчатых. Толщина песчаных прослоев достигает 3.8 м, а алевролитовых — меняется от 0.3 до 4.5 м. Нижняя граница слоя проведена по кровле массивных песчаников слоя 17. Падение слоистости В 95° ∠50°. Мощность 32 м.

19. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, прослоями крупнозернистые, зеленоватосерые, иногда темно-серые с вишневым оттенком (за счет гематита), кварцитовидные, массивные, с аргиллитовыми слойками и гальками (размером от 1×2–3 до 9×13 см). Нижняя граница слоя резкая и проведена по его подошве. Падение слоистости ВСВ 80° ∠40°. Мощность 34 м. 20. Тонкое неравномерное переслаивание аргиллитов темно-вишневых, отдельными слойками зеленых, тонкоплитчатых алевролитов полимиктовых, буровато-зеленых и зеленовато-серых, слюдистых. Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости ВЮВ 95° ∠43–50°. Мощность 20 м.

21. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, зеленовато-серые, массивные, вверху с прослоями (толщиной от 0.5 до 1.1 м) алевролитов полимиктовых, зеленовато-серых, послойно обогащенных темно-вишневым, глинистым материалом. Нижняя граница слоя проведена по его подошве. Падение слоистости В 90° ∠60°. Мощность 10 м.

22. Неравномерное переслаивание аргиллитов темно-вишневых, алевролитов и песчаников полимиктовых, мелкозернистых, зеленовато-серых. Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости В 90° ∠50°. Мощность 66 м.

23. Песчаники полимиктовые, мелко- и среднезернистые, буровато-серые, кварцитовидные, массивные, слоистые за счет наличия тонких (1– 2 мм) слойков, обогащенных темно-вишневым железистым материалом. Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости ЮВ 115° ∠65– 70°. Мощность 15 м.

24. Задерновано по мощности 8 м, отмечается обильная щебенка алевролитов, аргиллитов и песчаников, описанных выше.

Далее разрез наращивается в обнажении 102, которое находится в 1255 м к востоку от обн. 101 и в 7.2 км западнее (277°) от отм. 780.3 м (тригопункт) на западном склоне хр. Зильмердак, где обнажены (см. рис. 6):

25. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, темно-серые с вишневым оттенком, тонкими прослоями и пятнами зеленые. В песчаниках наблюдаются пластинки темно-вишневых аргиллитов. Нижняя граница слоя не обнажена. Мощность 5 м.

26. Алевролиты полимиктовые, зеленоватосерые и темно-вишневые, тонкоплитчатые, слюдистые по напластованию, с маломощными прослоями темно-вишневых аргиллитов и реже песчаников полимиктовых, среднезернистых, зеленовато-серых и серых. Нижняя граница слоя резкая и проведена по кровле подстилающих песчаников. Падение слоистости ЮВ 100° ∠50°. Мощность 8 м.

27. Алевролиты полимиктовые, желтоватозеленовато-серые и зеленовато-серые, кварцитовидные, слюдистые, слоистые за счет послойного неравномерного обогащения темно-вишневым глинистым материалом. В алевролитах отмечаются прослои (от 2–20 до 57 см) песчаников полимиктовых, среднезернистых, зеленовато-серых, массивных. Нижняя граница слоя постепенная, через переслаивание и проведена по подошве прослоя (мощностью 57 см) песчаника, перекрывающего алевролиты слоя 26. Падение слоистости ЮВ 100° ∠55°. Мощность 9 м.

28. Неравномерное тонкое переслаивание аргиллитов темно-вишневых и алевролитов полимиктовых, буровато-серых, песчанистых, тонкоплитчатых. Отмечаются прослои (мощностью до 25 см) песчаников полимиктовых, мелко- и среднезернистых, зеленовато-серых. Нижняя граница слоя постепенная через переслаивание и проведена по кровле зеленовато-серых песчаников мощностью 1.6 м. Падение слоистости ВЮВ 95° ∠50°. Мощность 10 м.

V<sub>2</sub>kk 29. Песчаники полимиктовые, крупнозернистые, буровато-серые с зеленоватым оттенком, содержат рассеянный галечный и гравийный материал, представленный молочно-белым кварцем, песчаниками и кварцито-песчаниками, аргиллитами, сростками полевого шпата, массивные. Песчаники переслаиваются с аргиллитами темновишнево-красными, алевритистыми, слюдистыми по напластованию, тонкослоистыми за счет темносерых миллиметровых железистых слойков. Соотношение пород в переслаивании неясное, выемка частично завалена осыпью. Падение слоистости ЮВ 100° ∠45°. Мощность 15 м.

30. Конгломераты разногалечные (от мелкодо крупногалечных), с грубой градационной слоистостью. Галька в конгломератах слабо сцементирована, отчего конгломерат легко разрушается. Размеры галек достигают от 3×5 до 10×15 см и гальки представлены: молочно-белым кварцем, песчаниками кварцевыми, средне- и крупнозернистыми, светло-серыми, кварцитовидными; кварцито-песчаниками светло-серыми с розовым оттенком, с угловатым обломком сланца (размером 0.8×1 см); песчаником кварцитовидным, среднезернистым, светло-серым; песчаником кварцевым, среднезернистым, розовато-серым; гранито-гнейсом красновато-коричневым; отмечаются галечки зеленых алевролитов размером 3×5 см. В основании конгломератов отмечаются прослои (около 10 см) песчаников полимиктовых, крупнозернистых, слоистых, с фрагментами косой слоистости. Цементом конгломератов являются разнозернистые полимиктовые песчаники (часто гравийные) темносерые с вишневым оттенком. Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости СВ 80°  $\angle$ 70°. Мощность 6.5 м.

31. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, темно-серые с вишневым оттенком, слюдистые, грубо-плитчатые, слоистые за счет наличия более темных железистых разностей. Подошва песчаников, перекрывающих конгломераты, неровная. В песчаниках отмечаются гальки темно-вишневых аргиллитов и молочно-белого кварца. Нижняя граница слоя не обнажена. Мощность 51 м.

32. Песчаники полимиктовые, грубозернистые до гравийных, желтовато-зеленовато-серые. Песчаники содержат гальку жильного кварца, светло-серых кварцевых песчаников и кварцитов. Размер галек от 1×1 до 6×6 см. Галька не ориентирована, большей частью угловато-окатанная. Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости СВ 80° ∠40°. Мощность 4 м.

33. Задерновано по мощности 52 м.

 $V_2$ zn 34. Алевролиты глинисто-кварцевые, зеленовато-серые с прослоями песчаников полимиктовых, средне- и крупнозернистых, плитчатых. В алевролитах отмечен прослой (15 см) аргиллитов бурых от выветривания, тонкоплитчатых. Падение слоистости ЮВ 100° ∠55-60°. Мощность 12 м.

Верхняя часть зиганской свиты вскрыта в обнажении 103 по автотрассе Уфа – Белорецк в 2.5 км западнее моста через р. Зуячку, в 3.5 км от обн. 101, в 6.3 км ЮЗ 262° от отм. 780.3 м (тригопункт) (см. рис. 6). Здесь обнажены (снизу):

1. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, зеленовато-серые, грубоплитчатые, с прослоями аргиллитов темно-вишневых и зеленовато-серых и алевролитов полимиктовых, зеленовато-серых. Толщина аргиллитовых прослоев в верхней части слоя достигает 1 м. На контакте с аргиллитами песчаники содержат гравийный материал и невыдержанные прослойки вишневых аргиллитов. Песчаники подстилаются аргиллитами с туфовым прослоем (мощностью около 20 см). Падение слоистости ЮВ 110° ∠45–50°. Мощность 23 м.

2. Задерновано по мощности 6 м, отмечается щебенка описанных выше алевролитов, аргиллитов и песчаников.

3. Аргиллиты темно-вишневые, прослоями и пятнами зеленовато-серые, тонкоплитчатые, с тонкими невыдержанными слойками (от 2–3 мм до 1.5 см) алевролитов кварцевых, зеленовато-серых, слюдистых. Наблюдаются прослои (3–10 см) песчаников кварцевых, мелкозернистых, серых,

слюдистых, слоистых за счет наличия тонких (доли — 1–2 мм) слойков, обогащенных темным глинистым материалом. Нижняя граница слоя не обнажена. Падение слоистости ЮВ 105°  $\angle$ 35° и З 270°  $\angle$ 35°. Мощность 20 м.

4. Неравномерное переслаивание алевролитов кварцевых, зеленовато-серых, тонкоплитчатых, слоистых за счет наличия нитевидных до 0.5 см слойков, обогащенных темно-вишневым глинистым материалом, аргиллитов темно-вишневых, прослоями зеленых, тонкоплитчатых и песчаников кварцевых, мелкозернистых, серых, плитчатых, известковистых по трещинам, слюдистых. Породы в слое гофрированы. Падение слоистости ЮВ 100° ∠35–50°. Мощность 3 м.

5. Аргиллиты темно-вишневые, прослоями зеленовато-серые, тонкоплитчатые, с редкими слойками (1–2 см) песчаников кварцевых, мелкозернистых, зеленовато-серых. Нижняя граница слоя условная и проведена по подошве вишневокрасных аргиллитов. Падение слоистости ВЮВ 90–100° ∠45–50°. Мощность 42 м.

6. Задерновано по мощности 165 м, отмечается частая мелкая щебенка описанных в слое 5 пород.

Суммарная мощность отложений басинской (около 700 м), куккараукской (150 м) и зиганской (250–300 м) свит в разрезе по автотрассе Уфа – Белорецк западнее моста через р. Зуячка составляет 1100–1150 м.

5. Разрез по р. Мендым (см. рис. 1, точка 5) находится на западном крыле Алатауской структуры в 1 км ниже устья руч. Бол. Шикетар, в 2275 м к ЮВ 118° от горы Кырташ (отм. 523.3) и в 1440 м к ЮЗ 245° от горы Узункуртсырт (отм. 614.0). Здесь В.И. Козловым [Козлов и др., 2008ф] описан следующий разрез (рис. 7):

**V**<sub>2</sub>**bs** 1. Песчаники полимиктовые, мелкозернистые, серые с зеленоватым оттенком, известковистые, косослоистые, разноплитчатые (от 2–3 до 10–20 см), с мелкой обломочной слюдкой, с прослоями алевролитов, по составу и облику близких к песчаникам. Мощность прослоев алевролитов колеблется от 1–4 см до 5–7 и иногда 60 см. В последнем случае внутри них отмечаются 1–2 см слойки песчаников, а верхи этих прослоев, как правило, сложены аргиллитами (3–5 см) зеленовато-серого цвета. Падение слоистости C3 290–300° ∠5–10°. Нижняя граница слоя не обнажена. Вскрытая мощность слоя 20 м.

2. Песчаники, по составу и облику близкие к вышеописанным, мелко- и среднезернистые,

Свита	Толща	Индекс	Слой	Мощность, м	Литология					
			24	45	· · · · / · ·					
			23	32	<del>·····································</del>					
			25	52	···············					
К					- <b></b> - <b>-</b> - <b>-</b>					
a			22	60						
К					<i>i</i>					
					0 - 0					
9										
H			21	143						
а			20	35	• / • • • • •					
Г			$\frac{19}{18}$	<u>5</u> 17	- $    -$					
И			17	23						
3			10	<u>8</u> 17	• • • • / •					
		Vzn	14	30						
		V ZII	13	15						
сая			12	40	••••••••					
KCF			12	-+0	ం⊡∙⊇∙ఔంల					
ayı										
cap			11	100						
уĸ					<u>-&gt;_;;;;;;;</u> ;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;					
K.		Vkk	10	30	$\pm \pm \pm \pm \pm$					
					• / • • •					
	К									
	К									
	н		9	115						
	5				<u>- ⁄ =</u> =					
	×									
	d				<u></u>					
	e				<u> </u>					
	В			180	_@_ <i>@</i> _					
			8		<u>· / · · _ · _ · _</u>					
	В		7	20	0 • • • • / 0 • • • 0					
В	F				<u> </u>					
а	<u> </u>		6	60	• • • • / •					
K	щ			00	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					
с	Ц									
Н	e									
И	d		5	70	••••					
	C				• • • • / •					
			4	60	• / • • • • •					
а					$\dot{-}$					
Б					$\overline{}$					
	К				· · · · ·					
	Б									
	н				$\sim$					
	¥				$\oslash$					
	~									
	И		3	230	 /					
	Н		2	40	$\begin{array}{c} \cdot / \cdot \cdot \cdot = = = = \\ - \cdot - \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \end{array}$					
		Vbs	1	20	• / • • _ • _					

слоистые (10–15 см) и массивные (50–200 см). Они содержат через 0.5–1 м прослои (от 2–3 до 5–10 см, редко 15 см) алевролитов, сходных с таковыми слоя 1. В верхней части прослоев алевролиты также переходят в аргиллиты. Нижняя граница слоя условная и проведена по подошве первого мощного пласта песчаников. Мощность 40 м.

3. Неравномерное переслаивание: а) песчаников полимиктовых преимущественно среднезернистых и среднеслоистых (5-10, редко 15-20 см), известковых, серых с зеленоватым оттенком; б) тех же песчаников, но мелкозернистых и глинистых, тонкослоистых; в) алевролитов, по составу и облику близких к песчаникам, но более тонкослоистых и тонкоплитчатых; г) аргиллитов тонкослоистых, местами листоватых, по облику сходных с алевролитами. Преобладают песчаники (от 60 до 80%), хотя в основании слоя больше алевролитов (57% на первых 5 м). Мощность пачки алевролитов и аргиллитов иногда достигает 3 м (в обнажении в 430 м от устья ручья Бол. Шикетар). Породы часто косослоистые, нередко на плоскостях напластования видна волновая рябь. Породы слоя обнажены неравномерно, преобладающее падение слоистости C3 280-290° ∠18-20°, редко 40° и 52°. Нижняя граница слоя постепенная и проведена условно по подошве пачки переслаивания алевролитов и песчаников. Мощность 230 м.

4. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, серые с зеленоватым оттенком, слабо известковые, крупнослоистые и массивные, с прослоями алевролитов полимиктовых, зеленовато-серых, слюдистых (мощность прослоев колеблется от 1–2, 3–5 до 20 и 45 см). Нередко на нижних поверхностях плоскостей напластования в песчаниках видны пластинки зеленовато- и розовато-серых аргиллитов. Падение слоистости C3 280–290° ∠25–30° и 52°. Переход к нижележащему слою постепенный и граница проведена по подошве массивного пласта песчаника, перекрывающего пачку переслаивания подстилающего слоя. Мощность 60 м.

5. Пачка переслаивания, близкая к описанной в слое 3. В отдельных прослоях песчаники содержат редкие гравийные зерна (1–2 мм) молочно-белого и розового кварца, пластинки алевролитов и аргиллитов; наряду с параллельной слоистостью отмечается косая; часто наблюдается волновая рябь. Нижняя граница слоя условная и проведена по кровле подстилающего последнего мощного пласта массивного песчаника. Мощность 70 м.

6. Алевролиты кварцевые, зеленовато-серые со слабым розовым оттенком, тонкоплитчатые с прослоями (от 1 до 3

Legend in the figs 1 and 2.

Геологический вестник. 2019. №1

Рис. 7. Стратиграфическая колонка отложений басинской, куккараукской и зиганской свит по р. Мендым

Условные обозначения см. рис. 1 и 2.

Fig. 7. The stratigrahic column of deposits of Basu, Kukkarauk and Zigan Formations along Mendym river

и 10–20 см) песчаников полимиктовых, мелкозернистых, зеленовато-серых, глинистых. В основании некоторых прослоев песчаника отмечаются крупнозернистые и гравийные разности (толщина до 3–5 мм). Граница с подстилающим слоем условная и проведена по смене окраски: по подошве мощного (2.5 м) пласта алевролитов зеленовато-серого цвета с розоватым оттенком, которые не характерны для подстилающих пород. Преимущественное падение слоистости C3 285° ∠35°. Мощность 60 м.

7. Гравелиты полимиктовые, серые, массивные. В цементе их — полимиктовые песчаники разнозернистые. Обломочный материал (около 30% породы) хорошо окатанный, представлен кварцем, обломками алевролитов и аргиллитов, кремнями, слюдами. Размер зерен от 1 до 2 мм. Нижняя граница слоя не обнажена. Мощность 20 м.

8. Разрозненные выходы песчаников полимиктовых, среднезернистых, серых с зеленоватым оттенком, средне- и крупнослоистых, иногда массивных. Наблюдаются прослои алевролитов мощностью от 2–3 до 10–12 см через каждые 20– 30 см песчаников. Алевролиты большей частью темно-серые с вишневым оттенком, образуют постепенные переходы с песчаниками. Преобладающее падение слоистости C3 285–290° ∠20–25°. Нижняя граница слоя не обнажена. Мощность около 180 м.

9. Переслаивание песчаников полимиктовых, мелко- и среднезернистых, зеленовато-серых и алевролитов полимиктовых и кварцевых, зеленовато-серых, тонкоплитчатых. Нижняя граница слоя не обнажена. Мощность 115 м.

 $V_2$ kk слои 10-12. Конгломераты куккараукской свиты. Мощность 170 м (см. рис. 7).

 $V_2$ **гп** слои 13—24. Переслаивание песчаников и алевролитов полимиктового состава. Мощность 430 м (см. рис. 7).

Суммарная мощность басинской (800 м), куккараукской (170 м) и зиганской (430 м) свит в разрезе по р. Мендым составляет 1400 м.

6. Разрез по руч. Кук-Караук (см. рис. 1, точка 6). Подробное описание разреза дано в работах [Козлов, 1982; Стратотип..., 1983], тем не менее, авторы считают целесообразным привести краткую характеристику разреза в данной статье, а не отсылать читателя к указанным публикациям. В выемках дороги Стерлитамак – Белорецк (от моста через р. Красная у бывшего пос. Казармы) и в скальных выходах по ручью Кук-Караук обнажены (см. рис. 1, точка 6 и рис. 8). **V**<sub>2</sub>**bs** 1. Песчаники полимиктовые, разнозернистые, известковистые, плитчатые, с редкими прослоями алевролитов зеленовато-серых, часто известковистых, тонкоплитчатых, по составу близких к песчаникам. Нижняя граница слоя не вскрыта эрозией. Мощность 110 м.

2. Неравномерное переслаивание полимиктовых песчаников и алевролитов, зеленоватосерых, плотных, иногда известковистых. Мощность 180 м.

3. Алевролиты полимиктовые, тонкоплитчатые, зеленовато-серые, прослоями с буроватым и розоватым оттенком, с редкими тонкими (1–5 см) прослойками песчаников полимиктовых, мелкозернистых, зеленовато-серых. Мощность 60 м.

4. Песчаники полимиктовые, разнозернистые, разноплитчатые, зеленовато-серые с буроватым оттенком, содержат редкие «лепешки» и прослои зеленовато-бурых алевролитов. Мощность 190 м.

5. Алевролиты полимиктовые, мелкозернистые, тонкослоистые, зеленовато-серые, прослоями косослоистые, с тонкими прослоями мелкозернистых полимиктовых песчаников. Мощность 55 м.

6. Песчаники полимиктовые, известковистые, преимущественно среднезернистые, серые и зеленовато-серые, плитчатые, плотные. В основании слоя песчаники крупнозернистые, с гравийными зернами. Мощность 90 м.

7. Алевролиты полимиктовые, известковистые, серые и темно-серые, редко вишнево-красные, тонкослоистые, участками косослоистые, плитчатые, с единичными прослоями мелкозернистых песчаников близкого к алевролитам состава. Мощность 18 м.

8. Песчаники полимиктовые, разнозернистые, плитчатые, серые и розовато-серые, известковистые, с прослоями вишнево-красных алевролитов и гравелитов полимиктового состава. Мощность 122 м.

9. Тонкое неравномерное переслаивание полимиктовых алевролитов и песчаников, большей частью известковистых, вишнево-красных и серых. Мощность 75 м.

 $V_2 kk$  10. Песчаники полимиктовые, мелкозернистые, коричневато-красные, плотные, плитчатые, с фрагментами косой слоистости. Мощность 35 м.

11. Конгломераты, среди которых выделяются валунно-галечные и среднегалечные разности с песчано-гравийным цементом и мелкогалечные конгломераты с песчаным цементом. Границы между отмеченными разновидностями условны, а переходы — постепенные. В скалах и гривках





Рис. 8. Стратиграфическая колонка (А) отложений басинской, куккараукской и зиганской свит по руч. Кук-Караук. Конгломераты куккараукской свиты в русле ручья (Б)

Условные обозначения см. рис. 1 и 2.

Fig. 8. The stratigrahic column (A) of Basu, Kukkarauk and Zigan Formations along the Kukkarauk stream. Conglomerates of the Kukkarauk Formation in the stream bed (**b**)

Legend in the figs. 1 and 2.

вдоль автодороги Стерлитамак – Верхний Авзян описан следующий разрез данного слоя конгломератов (снизу).

11.1. Конгломераты полимиктовые, среднегалечные (размер обломков колеблется от 2–3 до 5 см). Сгруженность обломочного материала в них крайне неравномерная, сортировка слабая; степень окатанности различная. Соотношение обломочного материала и цемента колеблется от 1:10 до 1:4. Мощность 3 м.

11.2. Конгломераты полимиктовые, мелкогалечные, краснобурые. В отдельных прослоях конгломераты переходят в гравелиты и песчаники. Мощность около 60 м.

11.3. Конгломераты полимиктовые, крупно- и валунногалечные, в цементе их присутствуют красно-бурые крупнозернистые полимиктовые песчаники и гравелиты. Галька представлена кварцито-песчаниками, полимиктовыми и полевошпаткварцевыми песчаниками, кварцитами, микроклином, ортоклазом, гранитами, кварцевыми порфирами, микропегматитами и молочно-белым кварцем, черными железистыми кварцитами, красными кремнистыми породами. Мощность около 105 м.

11.4. Конгломераты полимиктовые, мелкогалечные, бордовые. Обломочный материал характеризуется неравномерным распределением и слабой окатанностью. Мощность около 20 м.

Нижняя граница описанного слоя 11 проведена по подошве светло-серых конгломератов слоя 11.1. Мощность 185 м.

12. Песчаники полимиктовые, средне- и мелкозернистые, коричневато-красные, толстоплитчатые, с единичной галькой и гравийными зернами. Мощность 130 м.

 $V_2$ zn 13. Песчаники полимиктовые, преимущественно мелкозернистые, зеленовато-серые с розоватым оттенком, известковистые, иногда косослоистые, в нижней части с прослоями тонкополосчатых алевролитов. Мощность 50 м.

14. Песчаники полимиктовые, большей частью мелкозернистые, зеленовато-серые, плотные, в верхней части известковистые, слоистые и косослоистые, со знаками волновой ряби по напластованию. Мощность 250 м.

15. Песчаники полимиктовые, среднезернистые, ярко-зеленовато-серые, плитчатые, с прослоями алевролитов. В песчаниках кое-где видны косая слоистость и плохо сохранившиеся знаки волновой ряби. Мощность 60 м.

Суммарная мощность отложений басинской (900 м), куккараукской (350 м) и зиганской (360 м) свит в разрезе по руч. Кук-Караук составляет 1610 м.

*7. Разрез по р. Зиган* (см. рис. 1, точка 7) находится на западном крыле Алатауского антиклинория в 1750 м ниже (по прямой) устья руч. Янаш. Описание разреза приводится по материалам [Козлов и др., 2008ф; Стратотип..., 1983] в обнажениях 36–38, где подробно описаны отложения лишь зиганской свиты (рис. 9).

 $V_2$ kk 1—3. Конгломераты и песчаники куккараукской свиты, мощность которой составляет 130 м [Беккер, 1988].

**V**<sub>2</sub>**zn** 4. Песчаники полимиктовые, серые с зеленоватым оттенком, среднезернистые, слабо известковистые, разноплитчатые, слюдистые, с редкими прослоями алевролитов кварцевых, зеленовато-серых, слюдистых, тонкоплитчатых, отдельными прослоями косослоистых. Переход между песчаниками и алевролитами постепенный. Преобладающее падение слоистости 3C3 275° ∠25°. Нижняя граница слоя не обнажена. Мощность 40 м.

5. Песчаники полимиктовые, мелкозернистые, розовато-серые, слюдистые, разноплитчатые. В основании содержатся редкие и не выдержанные по мощности прослои розовато-зеленовато-серых полимиктовых алевролитов. Породы нередко имеют косую слоистость. Нижняя граница слоя условна и проведена по смене окраски пород. Падение слоистости З 270° ∠23°. Мощность 45 м.

6. Задерновано по мощности 20 м. Разрез продолжается по правому берегу р. Зиган.

7. Песчаники полимиктовые, мелкозернистые, зеленовато-серые, слюдистые, прослоями известковистые, местами более кварцевые, среднезернистые, с желтоватым оттенком, с волновыми знаками ряби, с прослоями алевролитов того же состава и облика. Падение слоистости 3C3 280° ∠20°. Мощность 25 м.

8. Задерновано по мощности 45 м.

9. Алевролиты полимиктовые, серые и зеленовато-серые, отдельными прослоями извест-ковистые, тонкоплитчатые. В верхней половине слоя в алевролитах появляются прослои песчаников. Падение слоистости 3СЗ 275° ∠25°. Мощность 75 м.

10. Задерновано по мощности 100 м. Далее разрез продолжается по левому берегу р. Зиган.

11. Песчаники полимиктовые и кварцевые, мелкозернистые, зеленовато-серые, разноплитчатые, слюдистые, в различной степени известковистые, местами с редкими прослоями алевролитов того же состава и облика. Мощность 35 м.

12. Неравномерное переслаивание песчаников полимиктовых, средне- и мелкозернистых, серых, зеленовато-серых, известковистых, неравномерноплитчатых; алевролитов существенно кварцевых, зеленых и зеленовато-серых, тонкоплитчатых, слюдистых и аргиллитов зеленовато- и розоватосерых. Мощность 15 м.

13. Песчаники кварцевые, мелкозернистые, иногда среднезернистые, зеленовато-серые, плотные, слюдистые, прослоями известковистые (при выветривании буреют) или глинистые, участками постепенно переходящие в алевролиты того же состава и облика. Падение слоистости СЗ 290° ∠27°. Мощность 50 м.

**D**<sub>1</sub>*etk* 14. Гравелиты полимиктовые, светлосерые с желтоватым оттенком. Падение слоистости 3C3 275°  $\angle$ 27°. Мощность более 2 м.

Суммарная мощность отложений куккараукской (130 м [Беккер, 1988]) и зиганской (450 м) свит в разрезе по р. Зиган составляет 580 м.

#### Итоги описания разрезов

В приведенных выше разрезах молассовые образования характеризуются значительными колебаниями их мощности по площади распространения. Минимальные мощности осадков отмечаются для южного замыкания Сулеймановской антиклинали (см. рис. 1, точка 1), где в районе города Усть-Катав составляют 420 м (см. рис. 2), и в северном замыкании Алатауского антиклинория в разрезах по р. Инзер и руч. Агарды в районе д. Габдюк около 700 м (см. рис. 1, точка 2 и рис. 3, 4). Далее на юг по площади распространения молассовых



образований в Алатауском антиклинории их мощность увеличивается и составляет: 950 м — в разрезе по автотрассе Уфа – Белорецк в правобережье р. Басу у хут. Кулмас (см. рис. 1, точка 3 и рис. 5), 1150 м — по автотрассе Уфа – Белорецк западнее моста через р. Зуячка (см. рис. 1, точка 4 и рис. 6), 1400 м — разрез по р. Мендым (см. рис. 1, точка 5 и рис. 7) и максимальных значений (1610 м) достигает в разрезе по руч. Кук-Караук (см. рис. 1, точка 6 и рис. 8).

Колебания мощности отложений молассы могут быть обусловлены различными причинами, в частности за счет значительных колебаний амплитуды поднятия, когда в процессе орогении происходит образование прогибов и межгорных впадин различной глубины. Максимальные амплитуды поднятия, исходя из мощности отложений молассы, наблюдаются в Алатауском антиклинории в разрезах по рекам Мендым и Кук-Караук.

Важным фактором, влияющим на колебание мощности молассы, является также последующий (предпалеозойский) размыв толщ верхней зиганской свиты, максимальная мощность которой в стратотипическом разрезе по р. Зиган (см. рис. 1, точка 7 и рис. 9) составляет 450 м, а минимальная (100–150 м) отмечена в разрезах по рекам Ялмаш и Кашели [Беккер, 1988].

В строении разрезов басинской, куккараукской и зиганской свит сохраняется достаточно ритмичное чередование основных типов пород.

Басинская свита (V<sub>2</sub>bs) представлена неравномерным чередованием песчаников, алевролитов и аргиллитов. Преобладают песчаники преимущественно полимиктовые, мелкозернистые, серой и зеленовато-серой окраски, прослоями известковистые. Меньше распространены полевошпаткварцевые и аркозовые разности. В составе обломочного материала преобладает кварц (60-80%), в значительном количестве присутствуют полевые шпаты (от 5–10 до 25–30%) и обломки пород (5–15%), в числе которых отмечены алевролиты, глинистые серицит-кварцевые и серицитовые сланцы, эффузивные и кремнистые породы, кварциты; в единичных зернах присутствуют циркон, турмалин, глауконит, рутил, рудный минерал. Алевролиты в целом сохраняют состав, близкий песчаникам. Аргиллиты слюдисто-хлоритового, слюдистого и хлорито-гидрослюдистого состава, иногда ожелезненные и кальцитизированные, зеленовато-розовато-серого и вишневого цвета, алевритистые, тонкослоистые.

По особенностям строения и состава басинская свита расчленена на три толщи [Козлов, 1982]: нижнюю и верхнюю песчано-алевролитовые и среднюю существенно песчаниковую. Отчетливо выраженная в басинской свите цикличность является одним из характерных признаков для нижних горизонтов молассы [Беккер, 1988]. Суммарная мощность басинской свиты в Алатауском антиклинории колеблется от 650 до 900 м.

Куккараукская свита (V2kk) вверху и внизу сложена песчаниками полимиктовыми, разнозернистыми, с прослоями гравелитов, а в средней части — разногалечными полимиктовыми конгломератами [Козлов, 1982]. За счет неравномерного распределения обломочного материала в породах наблюдается градационная слоистость. Куккараукская свита с подстилающей басинской связана постепенным переходом [Беккер, 1968; Козлов, 1982]. Преобладающие в составе пород и в матриксе конгломератов песчаники крупно- и среднезернистые, плохо сортированные, с гравием и редкой галькой. Обломочный материал песчаников (70-85%) породы) состоит из кварца (40-50%), литокласт (от 18-20 до 30-35%) микрокварцитов, алевролитов, песчаников, кварцито-песчаников, кварцитов, глинистых сланцев и жильного кварца, кремнистых, серицит-кремнистых, серицитовых, хлоритовых, серицит-хлоритовых, железисто-кремнистых и полевошпатовых пород и обломков вулканитов; полевого шпата (от редких зерен до 5%). По составу песчаники близки к аналогичным породам из нижележащей басинской свиты и отличаются лишь преобладанием обломков метаморфических пород. Конгломераты полимиктовые, разногалечные, преимущественно мелко- и среднегалечные. Галька хорошо окатанная, эллипсоидальной, реже неправильной формы, представлена кварцем и кварцевыми песчаниками, иногда катаклазированными, кварцито-песчаниками, кварцитами, кварцевыми сиенитами с порфировой структурой, плагиогранитами, гранит-порфирами и крупнокристаллическими гранитами и др. В ряде мест обращает на себя внимание заметное присутствие гальки красных яшмоподобных кремней, отсутствующих в известных разрезах протерозоя мегантиклинория. Мощность отложений куккараукской свиты колеблется от 50 м до 350 м.

Зиганская свита (V<sub>2</sub>zn) сложена песчаниками и алевролитами полимиктовыми, реже кварцевыми, с прослоями и пачками аргиллитов. С подстилающей куккараукской свитой она связана постепенным переходом [Козлов, 1982]. Мощность отложений зиганской свиты колеблется от 100 до 450 м.

Рассматриваемые отложения по простиранию испытывают фациальные изменения и наиболее значительные наблюдаются в отложениях зиганской свиты. Так, в южной части Алатауского антиклинория (в разрезах по рекам Зиган и Кук-Караук) в свите преобладают песчаники (около 65% мощности свиты), в меньшем количестве (34%) присутствуют алевролиты и (чуть более 1%) — аргиллиты. В северной части Алатауского антиклинория (разрез по автодороге Уфа – Белорецк западнее моста через р. Зуячка) и в Сулеймановской антиклинали (в городе Усть-Катав) в отложениях зиганской свиты преобладают аргиллиты, составляющие соответственно 68 и 51% мощности свиты, алевролиты — 38% (в разрезе города Усть-Катав) и 18% (в разрезе по автодороге Уфа – Белорецк западнее моста через р. Зуячка) и песчаники составляют 11% и 14% соответственно. Хотя соотношение пород в переслаивании в разрезах зиганской свиты значительно меняется, но общий петрографический состав, структурно-текстурные особенности и внешний облик пород остаются практически неизменными и аналогичными одноименным разностям из нижележащих отложений басинской свиты.

#### Возраст и источники сноса обломочного материала молассы

Для выяснения источников сноса обломочного материала используются различные (петрографические, минералогические и др.) методы изучения обломочных пород, позволяющие реконструировать состав образований области сноса (петрофонд). Достаточно просто этот вопрос решается исходя из литолого-петрографического состава галек конгломератов, например, куккараукской свиты, где описаны: жильный молочно-белый кварц, песчаники и алевролиты преимущественно кварцевые, разнозернистые, светло- и розоватосерые, кварцитовидные; кварцито-песчаники светло-серые с розовым оттенком, гранито-гнейсы красновато-коричневые, граниты, кремнистые породы и др. Но эти материалы по литолого-петрографическому составу не дают уверенного ответа на вопрос о возрасте размываемых пород. Используемые для этого результаты датирования детритовых цирконов [Кузнецов и др., 2012; Романюк и др., 2013 и ссылки в этих работах] не решают проблемы из-за широкого спектра датировок, варьирующих по различным причинам. Это происходит вследствие часто встречающейся полихронности датируемых детритовых цирконов; результаты их LA-ICP-MS анализа дают не только возраст размывавшихся пород, но и весь спектр датировок: стадий изменения цирконов в исходной породе, а также датировки ксеногенных цирконов, что сильно осложняет общую картину. Впрочем, эти анализы все же позволяют поставить верхние пределы при датировке возрастов осадочных пород, из которых анализируемые детритовые цирконы извлечены.

Вопрос о возрасте ашинской свиты с привлечением большинства известных на тот момент материалов рассмотрен В.Н. Пучковым [2012]. Из более поздних публикаций важно отметить работы [Колесников и др., 2012; Kolesnikov et al., 2015], посвященные ревизии находок эдиакарских фоссилий из ашинской серии Южного Урала, описанных Ю.Р. Беккером, и описанию новых находок. Пересмотренный список таксонов состоит из фрондоморф (прикрепленная структура Aspidella terranovica), нескольких разновидностей ископаемых палеопасцихнид (требующих дальнейшей ревизии), арумбериаморфных структур, различных ихнофоссилий, сплющенных обугленных макрофоммилий и др. В целом комплекс ископаемых остатков характеризуется относительно обедненным составом, связанным с Котлинским кризисом. Пересмотр и пополнение коллекций не противоречит сделанному ранее выводу о том, что в сопоставлении с разрезами венда Восточно-Европейской платформы зиганская свита ашинской серии отвечает котлинскому горизонту, а нижележащие — редкинскому. Дополнительная информация по палеогеографии венда приведена в работе [Fedorova et al., 2013], где приводятся палеомагнитные данные по разрезам зиганской свиты, указывающие на положение точек отбора проб и континента Балтики в целом в близэкваториальных широтах южного полушария.

Если для датирования отложений ашинской молассы пока нет надежного геохронологического объекта (кроме одной датировки цирконов из туфов зиганской свиты — 548.2±7.6 млн лет) [Гражданкин и др., 2011], то о возрасте пород в области сноса наиболее достоверные представления можно получить, используя для этих целей гальки магматических пород из конгломератов куккараукской свиты.

Одна из таких датировок была получена для гранитной гальки из полимиктовых конгломератов куккараукской свиты ашинской серии, вскрытых дорожной выемкой в 5 км западнее моста через р. Зуячка по автотрассе Уфа – Белорецк (восточное крыло Алатауского антиклинория). Аг-Аг возраст (530–550 млн лет) был получен по микроклину из гальки конгломерата [Glasmacher et al., 1999]. Учитывая, что по полевым шпатам развиты вторичные процессы (пелитизация, хлоритизация и т.д.), эту датировку следует отнести к «омоложенной» и ориентировочной для источника цирконовой кластики конгломератов куккараукской свиты.

В настоящее время надежная SHRIMP-датировка 713.6±6.1 млн лет [Краснобаев и др., в печати] получена нами по циркону из гранитной гальки полимиктовых конгломератов куккараукской свиты в разрезе по ручью Агарды, правый приток р. Инзер в 2 км севернее д. Габдюк (см. рис. 1, точка 2 и рис. 4). Отобранные розовато-красные гранитоидного состава гальки (проба К2270) представлены плагиогранитом, риолитовым порфиром, гранит-порфиром и крупнокристаллическим гранитом. Выделенные из этих пород цирконы отличаются высоким идиоморфизмом, преимущественно призматическим обликом (удлинение до 5—5.5), прозрачностью, отсутствием окраски и по совокупности всех признаков представляют магматический тип, испытавший влияние тектонических факторов с образованием разнонаправленных трещин, часто заполненных флюидной фазой (рис. 10).



Рис. 10. Минералого-геохимические и возрастные особенности цирконов (проба К2270) из гранитоидных галек куккараукских конгломератов ашинской серии венда в разрезе по руч. Агарды, правому притоку р. Инзер в 2 км севернее д. Габдюк Цифры — номера кристаллов, содержания U и Th (г/т), T — возраст, млн лет (по <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U) (табл.); а, б, в — снимки CL, BSE, оптические (проходящий свет).

Fig. 10. Mineralogic-geochemical and chronological features of zircons (sample K2270) from granitoid pebbles of kukkarauk conglomerates of Asha series of Vendian in the section of Agardy stream — the right tribute of Inzer river, 2 km to the north of Gabdyuk village

Numbers designate crystals, contents of U and Th (ppm), T – age Ma (after  $^{206}$ Pb/ $^{238}$ U) (table); a, 6, B – CL, BSE, optic (transmitted light) images.

Таблица U-Pb возраст цирконов из гранитной гальки полимиктовых конгломератов куккараукской свиты ашинской серии венда (проба К 2270)

# Table U-Pb age of zircons from granite pebble of polymictic conglomerates of Kukkarauk Formation of Vendian Asha series

Геологический вестник. 2019. №1

)	
)	
2	
5	$\widehat{}$
	2
2	h.
	Ň.
)	$\mathbf{\tilde{\mathbf{Z}}}$
ົກ	
	<u>_</u>
)	<u>o</u>
)	Ξ
)	ສ
5	S.

Rho		0.437	0.731	0.525	0.644	0.543	0.504	0.670	0.515	0.485	0.440	0.786	0.812	0.723
Изотопные отношения (1)	千%	1.9	1.6	1.7	1.6	1.8	1.7	1.6	1.8	1.8	1.9	1.5	1.5	1.6
	<sup>206</sup> Pb* <sup>238</sup> U	0.1209	0.116	0.1169	0.1194	0.1141	0.1169	0.1181	0.1138	0.1185	0.1162	0.116	0.1166	0.1163
	±%	4.3	2.1	3.2	2.5	3.2	3.4	2.4	3.4	3.8	4.4	2	1.9	2.2
	<sup>207</sup> Pb* <sup>235</sup> U	966.0	0.988	0 .984	1.008	0.959	0.992	1.005	0.975	0.99	0.984	1.009	0.996	0.994
	÷	3.9	1.5	2.7	1.9	2.7	3	1.8	2.9	3.3	3.9	1.2	1.1	1.5
	$\frac{^{207}\text{Pb*}}{^{206}\text{Pb*}}$	0.0598	0.06179	0.061	0.0612	0.061	0.0616	0.0617	0.0622	0.0606	0.0614	0.06305	0.062	0.06196
Возраст, млн. лет (1)	<sup>206</sup> Pb <sup>238</sup> U	736±13	707±10	713土11	727±11	696土12	712±12	720±11	695±12	722±12	709±13	708±10	711±10	709±11
232Th	<sup>232</sup> Th		0.49	0.65	0.57	0.70	0.82	0.68	0.75	0.55	0.60	0.59	0.68	0.64
mq	<sup>206</sup> Pb*	11.9	51.7	19.8	35.2	12.9	20.5	31.5	12.2	11	7.89	54.5	71.9	37.8
Содержание, р	Th	63	247	123	189	89	161	204	06	57	46	310	471	234
	Ŋ	114	518	197	342	131	204	310	124	107	62	546	717	378
<sup>206</sup> Pb <sub>6</sub> ,		0.50	0.14	0.30	0.17	0.16	0.18	0.14	0.24	0.33	0.31	0.06	0.0	0.09
Анализ кратер		1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	4.1	4.2	5.1	5.2	6.1	6.2	7.1	8.1

 $Примечание: Pb_c$  и Pb\* — общий и радиогенный свинец. (1) — коррекция по <sup>204</sup>Pb. Rho — коэффициент корреляции. Погрешность калибровки стандартов 0.60%. *Note:* Pb<sub>c</sub> and Pb\* is general and radiogenic lead. (1) — it is a correction for <sup>204</sup>Pb. Rho is a coefficient of correlation. Error of calibration of standards of 0.60%.

Н.Д. СЕРГЕЕВА, В.Н. ПУЧКОВ, А.А. КРАСНОБАЕВ, О.В. КОЗЛОВА, А.А. РАТОВ

Вариации U и Th (см. табл.) также отражают единую геохимическую общность кристаллов. Минералогическая и геохимическая близость кристаллов подтверждается возрастной характеристикой. Все зерна образуют компактный кластер с конкордантным возрастом  $T = 713.6 \pm 6.1$  млн лет (рис. 11, см. табл. 1), что соответствует среднему неопротерозою (NP<sub>2</sub>) [Gradstein et al., 2012] или раннему аршинию по предложенной нами уральской шкале.

Высокое качество датировки позволяет использовать ее в качестве реперной. Эта пока единственная надежная датировка для пород в питающей провинции свидетельствует о том, что в вендское время в области сноса происходил размыв магматических (гранитоидных) пород, близких по возрасту к гранитам Мазаринского массива 710-740 млн лет [Краснобаев и др., 2012] и Барангуловского габбро-гранитного комплекса 725±5 млн лет [Краснобаев и др., 2007], расположенных в северной части зоны Уралтау на Южном Урале (см. рис. 1, точка 8) к востоку от точки взятия пробы на циркон (см. рис. 1 точка 2). Тем самым намечаются как область осадконакопления, так и область размыва. Последняя принадлежала восточному (в современных координатах) краю обнаженной части орогена тиманид. Новая датировка позволила оценить возраст размываемых пород в питающей провинции и сделать заключение о длительности перерыва между рифеем и вендом на Южном Урале. Предашинский размыв и перерыв в осадконакоплении на рубеже рифея и венда признается всеми исследователями, но продолжительность этого перерыва [Козлов, 1982; Беккер, 1988, Пучков, 2010] оценивается по-разному, в основном как наиболее существенного в разрезе верхнего докембрия Урала.

При формировании куккараукских конгломератов в вендское время (возрастной интервал 535-640 млн лет) происходит размыв в области сноса пород с возрастом 713 млн лет, что отвечает возрастному интервалу (640-770 млн лет) завершающего рифея (аршиния). Формирование осадков вендской молассы за счет образований пограничного рифейско-вендского стратона (аршиния) свидетельствует, что на рубеже рифея и венда на Южном Урале не было длительного перерыва в осадконакоплении. Размыв, при котором была глубоко врезана в отложения верхнего рифея эрозионная впадина, зафиксированная по р. Зилим в районе д. Толпарово [Пучков, 2010], вероятно связан со значительной амплитудой подъема данной территории, вследствие чего на эрозионную поверхность были выведены стратиграфически более древние толщи рифея.



Рис. 11. U-Pb возраст цирконов (проба К2270) из гранитоидных галек куккараукских конгломератов ашинской серии венда в разрезе по руч. Агарды, правому притоку р. Инзер в 2 км севернее д. Габдюк

Fig. 11. U-Pb age of zircons (sample K2270) from granitoid pebbles of kukkarauk conglomerates of Vendian Asha series in the section of Agardy stream, the right tribute of Inzer river, 2 km to the north of Gabdyuk village

Геологический вестник. 2019. №1

По нашему мнению, несмотря на вышеуказанное смещение депоцентра с востока на запад, длительного перерыва в осадконакоплении на рубеже рифея и венда на Южном Урале в целом не было, а значит — сохранилась достаточно полная геологическая информация эволюционного развития региона на орогеническом этапе в завершающую стадию крупного тектонического цикла.

#### Заключение

Детальное послойное описание орогенных комплексов тиманид в типовых разрезах басинской, куккараукской и зиганской свит ашинской серии венда в Алатауском антиклинории и Сулеймановской антиклинали Каратауского структурного комплекса базируется на значительном объеме исследований геологического материала. На основе микроописания пород по изученным разрезам уточнен их литолого-петрографический состав, выделены основные типы пород и показано их соотношение в разрезах молассовой формации, учтены новые данные U-Pb датировок цирконов из туфов зиганской свиты [Гражданкин и др., 2011] и Ar-Ar возраст гальки конгломерата куккараукской свиты [Glasmacher et al., 1999], а также результаты ревизии [Гражданкин и др., 2011] находок эдиакарских фоссилий из ашинской серии, описанных ранее Ю.Р. Беккером.

В связи пересмотром возраста и стратиграфической приуроченности аршинской свиты (ныне серии), ранее относимой к вендской молассе [Беккер,1988], уточнен стратиграфический объем молассовой формации и площадь ее развития. Это позволило более полно отразить особенности состава и строения ашинской молассы и уточнить вещественный состав пород в области сноса, послуживших источниками обломочного материала для орогенных комплексов тиманид на Южном Урале.

Впервые для пород области размыва получена реперная SHRIMP-датировка (713.6±6.1 млн лет, U-Pb метод) по циркону из гранитной гальки полимиктовых конгломератов куккараукской свиты в северном замыкании Алатауского антиклинория (разрез по ручью Агарды, правому притоку р. Инзер). Эта датировка позволяет предполагать, что в куккараукское время в размыв уже попали Барангуловский (725 млн лет) и Мазаринский (710– 740 млн лет) гранитные массивы, расположенные восточнее бассейна накопления куккараукских конгломератов, вероятнее всего эта область размыва принадлежала восточному краю орогена тиманид.

Новая датировка позволила не только оценить возраст пород в области сноса, но и сделать заключение о длительности перерыва между рифеем и вендом на Южном Урале. В вендское время (возрастной интервал 535-640 млн лет) при формировании куккараукских конгломератов происходит размыв в области сноса пород с возрастом 713 млн лет, что отвечает возрастному интервалу (640-770 млн лет) завершающего рифея (аршиния). Формирование осадков венда за счет образований пограничного с вендом рифейского стратона аршиния свидетельствует, что в пределах Башкирского мегантиклинория в целом не было длительного перерыва в осадконакоплении на рубеже рифея и венда, а значит, сохранилась достаточно полная геологическая информация эволюционного развитии региона.

В то же время, на западном крыле Башкирского мегантиклинория известны данные о локальном глубоком размыве в погребенной эрозионной долине по р. Зилим в районе д. Толпарово, где вендские отложения ложатся на карбонатные породы катавской свиты верхнего рифея, и по р. Юрюзань в районе города Усть-Катав, где эрозионный контакт венда и верхнего рифея обнажен и охарактеризован наличием базальных конгломератов бакеевской свиты венда, залегающих на неровной поверхности размыва известняков укской свиты верхнего рифея. Здесь полностью выпадает из разреза значительная часть рифея, а именно аршинская серия, отложения которой развиты лишь на восточном крыле Башкирского мегантиклинория.

Для решения вопроса о длительности перерыва между рифеем и вендом, масштабах и особенностях его проявления на Южном Урале необходимы дополнительные исследования молассовых формаций венда тиманид на Южном Урале и их возрастных аналогов в сопредельной части Восточно-Европейской платформы.

Исследование выполнено в соответствии с планами научно-исследовательских работ ИГ УФИЦ РАН (тема гос. задания № 0246-2019-0087).

#### Список литературы:

*Беккер Ю.Р.* Позднедокембрийская моласса Южного Урала. – Л.: Недра, 1968. – 160 с.

*Беккер Ю.Р.* Молассы докембрия. – Л.: Недра, 1988. – 288 с.

*Гарань М.И.* Возраст и условия образования древних свит западного склона Южного Урала. – М.: Госгеолиздат, 1946. – 51 с.

*Гарань М.И., Тяжева А.П.* Геологическая карта Урала. М 1:200 000. Лист N 40-XI. — М.: Недра, 1967.

Геологическая карта Российской Федерации и сопредельной территории республики Казахстан. М 1:1000000 (нов. сер.). Лист N-40 (41) — Уфа / *Под ред. В.И. Козлова.* — СПб: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2002.

Гражданкин Д.В., Марусин В.В., Меерт Дж., Крупенин М.Т., Маслов А.В. Котлинский горизонт на Южном Урале // Докл. РАН. – 2011. – Т. 440, № 2. – С. 201–206.

Дополнения к Стратиграфическому кодексу России. – СПБ.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. – 112 с.

*Келлер Б.М.* Тектоническая история и формации верхнего докембрия. – М.: ВИНИТИ, 1973. – 119 с. (Итоги науки. Сер. Общая геология; Т. 5).

*Козлов В.И.* Верхний рифей и венд Южного Урала. – М.: Наука, 1982. – 128 с.

Козлов В.И., Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Нехорошева А.Г., Бушарина С.В. Аршиний — новый стратон рифея в стратотипических разрезах Южного Урала // Геологический сборник № 9 / ИГ УНЦ РАН. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2011. – С. 52–56.

Козлов В.И., Синицына З.А., Кулагина Е.И., Пазухин В.Н., Пучков В.Н., Кочеткова Н.М., Абрамова А.Н., Клименко Т.В., Сергеева Н.Д. Путеводитель геологической экскурсии по разрезам палеозоя и верхнего докембрия западного склона Южного Урала и Приуралья. – Уфа, 1995. – 177 с.

Колесников А.В., Гражданкин Д.В., Маслов А.В. Арумбериеморфные текстуры в верхнем венде Урала // Докл. РАН. – 2012. – Т. 447, № 1. – С. 66–72.

Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Ларионов А.Н., Нехорошева А.Г., Бережная Н.Г. Полигенно-полихронная цирконология и проблема возраста Барангуловского габбро-гранитного комплекса // Докл. РАН. – 2007. – Т. 416, № 2. – С. 241–246.

Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Бушарина С.В. Новые данные по цирконовой геохронологии аршинских вулканитов (Южный Урал) // Литосфера. — 2012. – № 4. – С. 127–140.

Краснобаев А.А., Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Бушарина С.В. U-Pb (SHRIMP) возраст цирконов из гранитоидной гальки конгломератов куккараукской свиты ашинской серии венда Алатауского антиклинория (Южный Урал) (в печати).

Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М. Возможности стронциевой изотопной хемостратиграфии в решении проблем стратиграфии верхнего протерозоя (рифея и венда) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2014. – Т. 22, № 6. – С. 3–26.

Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В., Шацилло С.Ю. Орлов И.В., Голованова И.В., Данукалов К.Н., Ипатьева И.С. Первые результаты массового U-Pb изотопного датирования (La-ISP-MS) детритных цирконов из ашинской серии Южного Урала: палеогеографический и палеотектонический аспекты // Докл. РАН. – 2012. – Т. 447, № 1. – С. 73–79

*Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. – 280 с.

Пучков В.Н. О возрасте ашинской серии Южного Урала // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Матер. 9-й Межрег. научно-практич. конф. – Уфа: ДизайнПресс, 2012. – С. 47–51.

Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Краснобаев А.А. Пограничные стратоны рифея и венда на Южном Урале. Дополнения и изменения в региональную стратиграфическую схему // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Матер. 10-й Межрег. науч.-практ. конф. – Уфа: ДизайнПресс, 2014. – С. 77–87.

Романюк Т.В., Маслов А.В., Кузнецов Н.Б., Белоусова Е.А., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н., Серегина Е.С. Первые результаты U-Pb La-ICP-MS датирования детритных цирконов из верхнерифейских песчаников Башкирского антиклинория (Южный Урал) // Докл. РАН. – 2013. – Т. 452, № 6. – С. 642– 645. – doi.org/10.7868/S0869565213310174.

Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Чумаков Н.М. Изотопный возраст границ общих стратиграфических подразделений верхнего протерозоя (рифея и венда) России: эволюция взглядов и современная оценка // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2015. – Т. 23, № 6. – С. 16–27.

Семихатов М.А., Шуркин К.А., Аксенов Е.М., Беккер Ю.Р., Бибикова Е.В., Дук В.Л., Есипчук К.Е., Карсаков Л.П., Киселев В.В., Козлов В.И., Лобач-Жученко С.Б., Негруца В.З., Робонен В.И., Сезько А.И., Филатова Л.И., Хоментовский В.В., Шемякин В.М., Шульдинер В.И. Новая стратиграфическая шкала докембрия СССР // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1991. – № 4. – С. 3–13.

Стратиграфические схемы Урала (Докембрий, палеозой), 1993 / Межведомственный Стратиграфический Комитет России. — Екатеринбург, 1993. — 151 схема, 152 с.

Стратотип рифея. Стратиграфия. Геохронология. – М.: Наука, 1983. – 183 с. – (Тр. ГИН АН СССР; Вып. 377).

*Чумаков Н.М.* Африканская ледниковая эра позднего протерозоя // Стратиграфия. Геологическая корреляция. — 2011. — Т. 19, № 1. — С. 3–33.

Шатский Н.С. Принципы стратиграфии позднего докембрия и объем рифейской группы // Стратиграфия позднего рифея и кембрия. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – С. 5–15. – (Междунар. геол. конгресс; 21-я сессия; Докл. сов. геол).

Fedorova N.M., Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Sergeeva N.D., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Kuznetsov N.B., Kadyrov A.F., Khidiyatov M.M. The East European Platform in the late Ediacaran: new paleomagnetic and geochronological data // Russian Geology and Geophysics. – 2013. – V. 54. – P. 1392–1401. – doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.003.

*Glasmacher U.A., Reynolds P., Alekseev A.A., Puchkov V.N., Taylor K., Gorozhanin V., Walter R.* <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar Thermochronology west of the Main Uralian Fault, southern Urals, Ruassia // Geol. Rdsch. – 1999. – V. 87. – P. 515–525. – doi.org/10.1007/ s005310050228.

*Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M., Ogg G. (eds.)* The Geologic Time Scale (2 Volume Set 1&2). – Elsevier, 2012. – 1176 p.

Геологический вестник. 2019. №1

Kolesnikov A.V., Marusin V.V., Nagovitsin K.E., Maslov A.V., Grazhdankin D.V. Ediacaran biota in the aftermath of the Kotlinian Crisis: Asha Group of the South Urals // Precam. Res. – 2015. – V. 263. – P. 59–78. – doi.org/10.1016/j.precamres. 2015.03.011.

*Puchkov V.N., Krasnobaev A.A., Sergeeva N.D.* The New Data on Stratigraphy of the Riphean Stratotype in the Southern Urals, Russia // Journal of Geoscience and Environment Protection. – 2014. – V. 2. – P. 108–116. – doi.org/10.4236/gep.2014.23015.

Zaitseva T.S., Kuznetsov A.B., Gorokhov I.M., Dankina K.N., Ivanovskaya T.A., Melnikov N.N., Konstantinova G.V. Globular phyllosilicates of the Vendian Bakeevo Formation, the South Urals — crystallochemical and Rb-Sr isotopic data // Глины и глинистые минералы и слоистые материалы. CMLV2013: Матер. 2-й Международн. конф. — Спб.: ФальконПринт, 2013. — С. 79–80.

#### **References:**

*Becker Ju.R.* Pozdnedokembrijskaja molassa Juzhnogo Urala [Late Precambrian molasse of the Southern Ural]. L.: Nedra, 1968. 160 p. (in Russian).

*Becker Ju.R.* Molassy dokembrija [Molasses of the Precambrian]. L.: Nedra, 1988. 288 p. (in Russian).

*Chumakov N.M.* Afrikanskaja lednikovaja jera pozdnego proterozoja [African glacial age of the late Proterozoic]. // Stratigraphy. Geological correlation. 2011. T 19, No. 1. P. 3–33 (in Russian).

Dopolnenija k Stratigraficheskomu kodeksu Rossii [Additions to the stratigraphic code of Russia]. SPB.: Izd-vo VSEGEI. 2000. 112 p. (in Russian).

*Garan' M.I.* Vozrast i uslovija obrazovanija drevnih svit zapadnogo sklona Juzhnogo Urala. [Age and conditions of origin of ancient formations of the western slope of the Southern Ural]. M.: Gosgeolizdat, 1946. 51 p. (in Russian).

*Garan' M.I., Tjazheva A.P.* Geologicheskaja karta Urala. M 1:200000. List N-40-XI. [Geological map of the Urals of Scale 1:200000. Sheet N-40-XI]. M.: Nedra. 1967 (in Russian).

Geologicheskaja karta Rossijskoi Federacii i sopredel'noi territorii respubliki Kazahstan. Masshtab 1:1000000 (novaja serija). List N-40(41) [Geological map of the Russian Federation and adjacent territory of the Republic of Kazakhstan. Scale 1:1000000 (new series). The sheet N-40 (41) – Ufa] / *V.I. Kozlov* (*ed.*). SPb: Publishing house of SPb of VSEGEI kartfabrika VSEGEI, 2002 (in Russian).

*Glasmacher U.A., Reynolds P., Alekseev A.A., Puchkov V.N., Taylor K., Gorozhanin V., Walter R.* <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar Thermochronology west of the Main Uralian Fault, Southern Urals, Russia // Geol. Rdsch., 1999. V. 87. P. 515–525.

*Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz, M., Ogg G.* The Geologic Time Scale, 2012, 2-Volume Set. Elsevier, 2012. 1176 p.

*Grazhdankin D.V., Marusin V.V., Meert Dzh., Krupenin M.T., Maslov A.V.* Kotlinskij gorizont na Juzhnom Urale [The Kotlinsky horizon in the Southern Ural] // Dokl. Earth Sciences. 2011. V. 440, No. 2. P. 201–206 (in Russian).

Fedorova N.M., Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Sergeeva N.D., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Kuznetsov N.B., Kadyrov A.F., Khidiyatov M.M. The East European Platform in the late Ediacaran: new paleomagnetic and geochronological data// Russian Geology and Geophysics. 2013. V. 54. P. 1392–1401. http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.003

*Keller B.M.* Tektonicheskaja istorija i formacii verhnego dokembrija [Tectonic history and formations of the top Precambrian]. M.: VINITI, 1973. 120 p. (Itogi nauki i tehniki [Results of science and technology]. Ser. General Geology; V. 5) (in Russian).

*Kolesnikov A.V., Grazhdankin D.V., Maslov A.V.* Arumberiemorfnye tekstury v verkhnem vende Urala [Arumberia-type structures in the Upper Vendian of the Urals] // Dokladi RAS. 2012. V. 447, No. 1. P. 66–72 (in Russian).

Kolesnikov A.V., Marusin V.V., Nagovitsin K.E., Maslov A.V., Grazhdankin D.V. Ediacaran biota in the aftermath of the Kotlinian Crisis: Asha Group of the South Urals // Precam. Res. 2015. V. 263, P. 59–78. http://dx.doi.org/10.1016/j. precamres.2015.03.011

*Kozlov V.I.* Verkhniy rifey i vend Juzhnogo Urala [Upper Riphean and Vendian of the Southern Urals]. M.: Nauka, 1982. 128 p. (in Russian).

Kozlov V.I., Puchkov V.N., Krasnobaev A.A., Nehorosheva A.G., Busharina S.V. Arshinij — novyj straton rifeja v stratotipicheskih razrezah Juzhnogo Urala [Arshinii is a new Riphean straton in the stratotype cuts of the Southern Urals] // Geol. Sbornik No. 9 / IG UNC RAN. Ufa: DizajnPoligrafServis, 2011. P. 52–56 (in Russian).

Kozlov V.I., Sinicyna Z.A., Kulagina E.I., Pazuhin V.N., Puchkov V.N., Kochetkova N.M., Abramova A.N., Klimenko T.V., Sergeeva N.D. Putevoditel' geologicheskoj jekskursii po razrezam paleozoja i verhnego dokembrija zapadnogo sklona Juzhnogo Urala i Priural'ja [Guidebook of a geological excursion to sections of the Paleozoic and Upper Precambrian of the western slope of Southern Ural and Cisuralian area]. Ufa, 1995. 177 p. (in Russian).

*Krasnobaev A.A., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Larionov A.N., Nehorosheva A.G., Berezhnaja N.G.* Poligenno-polihronnaya cirkonologiya i problema vozrasta Barangulovskogo gabbrogranitnogo kompleksa [Polygenic-polychronic zirconology and the age problem of the Barangulov gabbro-granite complex] // Dokladi RAS. 2007. T. 416, No. 2. P. 241–246 (in Russian).

Krasnobaev A.A., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Sergeeva N.D., Busharina S.V. Novye dannye po cirkonovoj geohronologii arshinskih vulkanitov (Juzhnyj Ural) [New data on zircon geochronology of Arshin volcanic rocks (South Urals)] // Litosfera. 2012. No. 4. P. 127–140 (in Russian).

Krasnobaev A.A., Puchkov V.N., Sergeeva N.D., Busharina S.V. U-Pb (SHRIMP) vozrast zirkonov iz granitoidnoi gal'ki konglomeratov kukkaraukskoj svity ashinskoj serii venda Alatauskogo antiklinorija (Juzhnyj Ural) [U-Pb (SHRIMP) age of zircons from granitoid pebble of conglomerates of Kukkarauk Formation of Asha series of Vendian in the Alatau anticlinorium (Southern Ural)]. In print (in Russian).

*Kuznetsov A.B., Semikhatov M.A., Gorokhov I.M.* Vozmozhnosti strontsievoi izotopnoi khemostratigrafii v reshenii problem stratigrafii verkhnego proterozoya (rifeya i venda) [Possibilities of a Strontium isotope hemostratigraphy in the solution of problems of a stratigraphy of the Upper Proterozoic (Riphean and Vendian)] // Stratigraphy. Geological correlation. 2014. V. 22, No. 6. P. 3–26 (in Russian). Kuznetsov N.B., Romanyuk T.V., Shacillo A.V., Orlov S.Yu., Golovanova I.V., Danukalova K.N., Ipat'eva I.S. Pervye rezul'taty massovogo U-Pb izotopnogo datirovaniya (La-ISP-MS) detritnyh cirkonov iz ashinskoi serii Yuzhnogo Urala: paleogeograficheskii i paleotektonicheskii aspekty [The first results of mass U-Pb isotope dating (LA-ICP-MS) for detrital zircons from the Asha Group, South Urals: Paleogeography and paleotectonics] // Doklady RAS. 2012. V. 447, No. 1. P. 73–79 (in Russian).

*Puchkov V.N.* Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of Urals and Cisuralian area (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics, and metallongeny)]. Ufa: DesignPoligraphService, 2010. 280 p. (in Russian).

*Puchkov V.N.* O vozraste ashinskoi serii Yuzhnogo Urala [On the age of Asha series of the Southtern Urals] // Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredel'nykh territorii: Materialy 9-th Mezhregional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Geology, minerals and problems of geoecology of Bashkortostan, Urals and adjacent territories: Materials 9-th of the interregonal scientific-practical conference]. Ufa: DizainPress, 2012. P. 47–51 (in Russian).

*Puchkov V.N., Krasnobaev A.A., Sergeeva N.D.* The New Data on Stratigraphy of the Riphean Stratotype in the Southern Urals, Russia // J. of Geoscience and Environment Protection. 2014. V. 2. P. 108–116. doi.org/10.4236/gep.2014.23015.

Puchkov V.N., Sergeeva N.D., Krasnobaev A.A. Pogranichnye stratony rifeya i venda na Yuzhnom Urale. Dopolneniya i izmeneniya v regional'nuyu stratigraficheskuyu skhemu [The boundary stratons of the Riphean and Vendian in the Southern Urals. Supplements and changes in the regional stratigraphic scheme] // Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredel'nykh territorii: Materialy 10-th Mezhregional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Geology, minerals and problems of geoecology of Bashkortostan, Urals and adjacent territories: Materials 10-th of the interregonal scientific-practical conference]. Ufa: DizainPress, 2014. P. 77– 87 (in Russian).

Romanyuk T.V., Maslov A.V., Kuznetsov N.B., Belousova E.A., Ronkin Yu.L., Krupenin M.T., Gorozhanin V.M., Gorozhanina E.N., Seregina E.S. Pervye rezul'taty U-Pb La–ICP-MS datirovaniya detritnykh tsirkonov iz verkhnerifeiskikh peschanikov Bashkirskogo antiklinoriya (Yuzhnyi Ural) [The first results of U-Pb La–ICP-MS of dating of detrital zircons from the Upper Riphean sandstones of the Bashkirian anticlinorium (Southern Urals)] // Doklady RAS. 2013. V. 452. No. 6. P. 642–645. (in Russian). doi.org/10.7868/S0869565213310174.

Semihatov M.A., Kuznetsov A.B., Chumakov N.M. Izotopnyi vozrast granits obshchikh stratigraficheskikh podrazdelenii verkhnego proterozoya (rifeya i venda) Rossii: evolyutsiya vzglyadov i sovremennaya otsenka [Isotope age of borders of the common stratigraphic divisions of the Upper Proterozoic (Riphean and Vendian) of Russia: evolution of opinions and modern assessment] // Stratigraphy. Geological correlation. 2015. V. 23. No. 6. P. 16–27 (in Russian).

Semihatov M.A., Shurkin K.A., Aksenov E.M., Bekker Ju.R., Bibikova E.V., Duk V.L., Esipchuk K.E., Karsakov L.P., Kiselev V.V., Kozlov V.I., Lobach-Zhuchenko S.B., Negrutsa V.Z., Robonen V.I., Sez'ko A.I., Filatova L.I., Homentovskii V.V., Shemyakin V.M., Shul'diner V.I. Novaya stratigraficheskaya shkala dokembriya SSSR [New stratigraphie scale of the Precambrian of the USSR] // Izv. AN SSSR, Ser. geol. 1991. No. 4. P. 3–13 (in Russian).

*Shatskii N.S.* Printsipy stratigrafii pozdnego dokembriya i ob"em rifeiskoi gruppy. Stratigrafiya pozdnego rifeya i kembriya [Principles of a stratigraphy of the late Precambrian and volume of Riphean Group. Stratigraphy of the Late Riphean and Cambrian]. M.: Izd-vo AN USSR, 1960. P. 5–15 (in Russian).

Stratigraficheskie shemy Urala (Dokembrii, paleozoi), 1993. Mezhvedomstvennyi Stratigraficheskii Komitet Rossii [Stratigraphic schemes of the Urals (Precambrian, Paleozoic]. Ekaterinburg, 1993. 151 scheme, 152 p. (in Russian).

Stratotip rifeya. Stratigrafiya. Geokhronologiya [Stratotype of the Riphean. Stratigraphy. Geochronology]. M.: Nauka, 1983. 183 p. (Trudy GIN AN USSR; Is. 377) (in Russian).

Zaitseva T.S., Kuznetsov A.B., Gorokhov I.M., Dankina K.N., Ivanovskaya T.A., Melnikov N.N., Konstantinova G.V. Globular phyllosilicates of the Vendian Bakeevo Formation, the South Urals — crystallochemical and Rb-Sr isotopic data // Gliny i glinistye mineraly i sloistye materialy. CMLV2013: Materialy 2 Mezhdunarodnoi konferentsii [Materials of the second international conference "Clay and clay minerals and layered materials. CMLV2013"] Spb.: Fal'konPrint, 2013. P. 79–80.

#### Сведения об авторах:

Сергеева Нина Дмитриевна, кандидат геол.-минер. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: riphey@ufaras.ru

Пучков Виктор Николаевич, доктор геол.-минер. наук, чл.-кор. РАН, Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН (ИГГ УрО РАН), г. Екатеринбург. E-mail: puchkv2@mail.ru Краснобаев Артур Антонинович, доктор геол.-минер. наук, Институт геологии и геохимии имени А.Н. Заварицкого УрО РАН (ИГГ УрО РАН), г. Екатеринбург. E-mail: krasnobaev@igg.uran.ru Козлова Ольга Вячеславовна, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: riphey@ ufaras.ru Ратов Александр Александрович, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: ratov1990@ icloud.com

#### About the autors:

**Sergeeva Nina Dmitrievna**, candidate of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: riphey@ufaras.ru

**Puchkov Viktor Nikolaevich**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Institute of Geology and Geochemistry, Uralian Branch of the Russian Academy of Sciences (IGG UrB RAS), Ekaterinburg. E-mail: puchkv2@mail.ru

**Krasnobaev Artur Antoninovich,** Institute of Geology and Geochemistry, Uralian Branch of the Russian Academy of Sciences (IGG UrB RAS), Ekaterinburg. E-mail: krasnobaev@igg.uran.ru

Kozlova Olga Vyacheslavovna, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: riphey@ufaras.ru

**Ratov Alexander Alexandrovich,** Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: ratov1990@icloud.com

*УДК 561+551.797, 551.799+902.01* DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-2

# РЕКОНСТРУКЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И КЛИМАТА ЮЖНОГО ПРЕДУРАЛЬЯ В СУББОРЕАЛЕ И СУБАТЛАНТИКЕ (ПО МАТЕРИАЛАМ ПАМЯТНИКОВ КАРА-АБЫЗСКОЙ КУЛЬТУРЫ)

© 2019 г. Р.Г. Курманов, В.В. Овсянников, Н.С. Савельев, Р.И. Галеев

Реферат. В статье приведены новые данные о динамике растительности Южного Предуралья со второй половины суббореального до конца субатлантического периодов. Результаты анализа спорово-пыльцевого состава отложений археологических памятников кара-абызской культуры позволили выделить 7 климатических обстановок. Климат в промежутке от конца суббореала до начала субатлантика периодически менялся по направлению от влажного и теплого к сухому. В середине и конце субатлантика условия становятся сначала более влажными и прохладными, позже — влажными и теплым, а затем — сухими и прохладным.

Ключевые слова: палинология, суббореал, субатлантик, археология, кара-абызская культура, ранний железный век, Южное Предуралье

# RECONSTRUCTION OF VEGETATION AND CLIMATE OF THE SOUTHERN FORE-URALS IN SUBBOREAL AND SUBATLANTIC (ON THE MATERIALS OF THE SITES OF KARA-ABYZ CULTURE)

R. G. Kurmanov, V. V. Ovsyannikov, N. S. Saveliev, R. I. Galeev

**Abstract.** The paper presents the new data on the dynamic of vegetation and climate of the Southern Fore-Urals from the second half of the Subboreal to the end the Subatlantic time. The palynological materials from archeological sites of the Kara-Abyz culture allowed us to characterize 7 climatic conditions. The climate in the interval from the end of the Subboreal to the beginning of the Subatlantic periodically changed from wet and warm to dry. In the middle and at the end of the Subatlantic the conditions become first wetter and cooler, later wet and warm, and then dry and cool.

**Keywords:** palynology, Subboreal, Subatlantic, archeology, Kara-abyz culture, early Iron Age, the Southern Fore-Urals

#### Введение

Первые работы по изучению спорово-пыльцевого состава голоценовых отложений Южного Предуралья были проведены сотрудниками лаборатории стратиграфии кайнозоя ИГ БФАН СССР в 70-х годах прошлого столетия. В последующие десятилетия исследования были направлены на накопление нового материала и детальное биостратиграфическое изучение опорных разрезов (табл. 1) [Данукалова, 2009].

К стратотипам и парастратотипам среднего и позднего голоцена отнесены разрезы торфяника

Ишкарово, обнажений Зоренька и Утеймуллино I [Danukalova et al., 2014]. Среди опорных разрезов, имеющих радиоуглеродные датировки, следует отметить шурфы на торфяниках Курятмасово и Таллы-Кулево. Анализ палиноспектров вышеуказанных разрезов показал, что наиболее полную и непрерывную летопись изменения растительности Южного Предуралья отражает диаграмма Ишкаровского торфяника (рис. 1).

Изучение разрезов с остатками культур древних людей позволило использовать при геохроно-

Для цитирования: Курманов Р.Г., Овсянников В.В., Савельев Н.С., Галеев Р.И. Реконструкция растительности и климата Южного Предуралья в суббореале и субатлантике (по материалам памятников кара-абызской культуры) // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 35–44. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-2.

**For citation:** Kurmanov R.G., Ovsyannikov V.V., Saveliev N.S., Galeev R.I. Reconstruction of vegetation and climate of the Southern Fore-Urals in Subboreal and Subatlantic (on the materials of the sites of Kara-Abyz culture) // Geologicheskii vestnik. 2019. No. 1. P. 35–44. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-2.




Условные обозначения к рис. 1, 3-5: + — единичные находки спор и пыльцы. Общий состав: 1 — древесные, 2 — травянистые, 3 — споровые. Ботанические термины: Abies — Abies sp., Alnus — Alnus sp., Eph. — Ephedra sp., Picea — Picea sp., Q. — Quercus sp., Ros. — Rosaceae, Salix — Salix sp., Arctium — Arctium sp., Cham. — Chamerion sp., Cich. — Cichorioideae, Cirsium — Cirsium sp., Nymph. — Nymphaeaceae, Onagrac. — Onagraceae, Pol.a. — Polygonum aviculare, Plan. — Plantago sp., B.I. — Botrychium lunaria, Br. — Bryales, Lyc. — Lycopodium sp., L.p. — Lycopodium pungens. Генетические символы фаций: b — биогенный, е — элювиальный, d — делювиальный, 1 — озерный, pd — почва. Стратиграфические индексы:  $Q_4^3$  — голоцен, верхний подгоризонт. Литологический состав пород: 4 — торф, 5 — суглинок болотный, 6 — глинистый песок, 7 — почва, 8 — супесь, 9 — суглинок, 10 — галечник, крупным значком — валуны. Радиоуглеродные даты: \*1 — 1920±170 лет БашГИ-71, \*2 — 2630±110 лет БашГИ-102, \*3 — 2760±60 лет БашГИ-103, \*4 — 3110±90 лет БашГИ-104, \*5 — 3130±150 лет БашГИ-70, \*6 — 7620±90 лет БашГИ-105.

Legend for fig. 1, 3-5: + — places of single spore and pollen finds. General composition: 1 — trees and bushes, 2 — grass, 3 — sporophytes. Botanical data: Abies — Abies sp., Alnus — Alnus sp., Eph. — Ephedra sp., Picea — Picea sp., Q. — Quercus sp., Ros. — Rosaceae, Salix — Salix sp., Arctium — Arctium sp., Cham. — Chamerion sp., Cich. — Cichorioideae, Cirsium — Cirsium sp., Nymph. — Nymphaeaceae, Onagrac. — Onagraceae, Pol.a. — Polygonum aviculare, Plan. — Plantago sp., B.I. — Botrychium lunaria, Br. — Bryales, Lyc. — Lycopodium sp., L.p. — Lycopodium pungens. Deposit genesis indexes: b — biogenic deposits (peat with loam), e — eluvial deposits (loam with rock fragments), d — diluvium slope deposits (loam), 1 — lacustrine deposits (clay), pd — soil. Stratigraphy:  $Q_4^3$  — Holocene, upper subhorizon. Lithology: 4 — peat with loam, 5 — silty loam, 6 — sandy clay, 7 — soil, 8 — sandy loam, 9 — loam, 10 — pebble. <sup>14</sup>C dates: \*1 — 1920±170 BashGI-71, \*2 — 2630±110 BashGI-102, \*3 — 2760±60 BashGI-103, \*4 — 3110±90 BashGI-104, \*5 — 3130±150 BashGI-70, \*6 — 7620±90 BashGI-105.

Таблица 1

## Стратиграфическая схема голоцена Южного Предуралья и археологическая периодизация Table 1

Stratigraphic scheme of the Holocene of the Southern Urals and archaeological periodization

Общая стратиграфическая шкала	Региональни подразделен	ые стратиграфические ия [Данукалова, 2010]	Шкала Блитта-Сернандера	Археологическая периодизация [Бадер, 1974]
Раздел	Горизонт	Подгоризонт	Климатические периоды	Периоды
		верхний (2.6 тыс. лет – ныне)	субатлантик	эпоха железа
Голоцен	агидельский	средний (8-2.6 тыс. дет)	суббореал	эпоха бронзы
Толоцен		epedium (6 2.6 fbie. her)	атлантик	неолит
		иихиий (10, 8 тис. тет)	бореал	мезолит
		пижпии (10-6 тыс. лет)	предбореал	поздний палеолит

логическом датировании дополнительно и материалы археологических исследований. Первые работы по сопоставлению истории развития древних культур на территории Предуралья с этапами смены растительности региона были проведены В.К. Немковой [1978]. При этом результаты палинологических исследований позволили скоррелировать археологические эпохи с соответствующими климатическими периодами схемы Блитта-Сернандера (эпоха бронзы соответствовала большей части суббореала, начало эпохи железа было датировано самым концом суббореального периода). Однако полученные данные основывались преимущественно на материалах археологических памятников Нижнего Прикамья. Территория Башкирского Предуралья осталась практически неизученной. Среди более поздних исследований можно отметить лишь комплексное изучение отложений Биктимировского городища (эпоха раннего железа) [Данукалова и др., 2004; Савельев, 2011].

Целью данной работы является реконструкция растительности и климата суббореала и субатлантика Южного Предуралья в пределах локализации памятников кара-абызской культуры. Данная культура сформировалась в лесостепных районах правобережья среднего течения р. Белой. Несмотря на довольно узкую географическую локализацию, кара-абызские памятники необычайно велики по размерам и мощности культурного слоя для своего времени, что говорит о большой плотности населения. Население городищ и поселений сложилось на основе племен ананьинской культуры при участии пришлых зауральских племен. Культура датируется IV в. до н. э. — IV в. н. э. (ранний железный век) [Пшеничнюк, 1993; Овсянников, 2014].

### Методы исследования

Для изучения палинологического состава отложений кара-абызских памятников за периоды полевых исследований 2017—2018 гг. было заложено 18 шурфов. Всего отобрано 160 проб из 10 местонахождений: городища Акбердино-II, Кара-Абыз, Шиповское, Охлебининское II, Курмантаевское, Мончазы I, поселения Бирское и Акбердино I, Ново-Александровское селище и Касьяновская стоянка (рис. 2). На ряде разрезов произведен отбор поверхностных проб для выделения фактов присутствия в спектрах заносной пыльцы.





*Условные обозначения:* Зоны: А — Южное Предуралье, Б — горный Урал, В — Зауралье. Современное ботанико-географическое деление: I — районы широколиственно-темнохвойных лесов, II — районы смешанных широколиственных лесов, III — Месягутовская лесостепь, IV — Предбельская лесостепь, V — лесостепной район юго-восточной части Бугульминско-Белебеевской возвышенности, VI — лесостепной район башкирской части Общего Сырта, VII — Давлекановский степной район [Алексеев и др., 1988]. Разрезы: треугольники — торфяники: 1 — Ишкарово, 2 — Таллы-Кулево, 3 — Курятмасово; ромбы — высокие поймы рек: 4 — Зоренька, 5 — Утеймуллино-I; кружки — археологические стоянки: 6 — Бирское поселение, 7 — городище Кара-Абыз, 8 — Ново-Александровское селище, 9 — городище Акбердино-II, 10 — Акбердино I поселение, 11 — Шиповское городище, 12 — городище Мончазы I, 13 — Охлебининское II городище, 14 — Курмантаевское городище, 15 — Касьяновская стоянка.

### Fig. 2. Map showing the sites of the Kara-Abyz culture and the key sites location

*Legend*: Zones: A — the Southern Fore-Urals, B — The Ural Mountains, B — Trans-Urals. Modern botanical-geographical division: I — regions of broad leaved-coniferous forests, II — regions of mixed deciduous forests, III — Mesyagutovo forest-steppe region, IV — Fore-Belaya forest-steppe region, V — forest-steppe region of the southeastern part of the Bugulminsko-Belebei Hills, VI — forest-steppe region of the Bashkir part of the Obshyi Syrt Hills, VII — Davlekanovo steppe region [Alekseev et al., 1988]. Sites: triangles — peatbogs: 1 — Ishkarovo, 2 — Tally-Kulevo, 3 — Kuryatmasovo; rhombuses — high flood plain: 4 — Zorenka, 5 — Uteimullino-I; circles — archeological sites: 6 — Birsk, 7 — Kara-Abyz, 8 — Novo-Aleksandrovskoe, 9 — Akberdino-II, 10 — Akberdino I, 11 — Shipovskoe, 12 — Monchazy I, 13 — Okhlebininskoe II, 14 — Kurmantaevskoe settlements, 15 — Kasyanovskaya site.

Глубина шурфов варьировала от 0.37 до 1.40 м. В литологическом отношении изученные рыхлые породы были представлены глинами, суглинками, супесями и почвами.

В работе применялась стандартная методика мацерации осадочных пород [Гричук, Заклинская, 1948, С. 127–129] с рядом дополнений. Расчет результатов анализа проводился по группам: пыльца древесных и кустарниковых (NAP), травянистых и кустарничков (AP), споровых растений (SP). Минимальное количество пыльцы и спор, необходимое для расчета процентного соотношения, составляло 50 шт.

### Результаты исследования

В составе 160 отобранных проб идентифицированы пыльцевые зерна и споры 88 таксонов. Среди них преобладают представители лесной, лугово-степной и синантропной флоры. Полученные спектры характеризуют преимущественно мозаичные лесные и лесостепные ландшафты. Все поверхностные пробы адекватно отражают современные растительные сообщества.

Из 18 разрезов малоинформативными оказались лишь два: первые шурфы на Шиповском и Охлебининском II городищах. Наиболее полно динамику смены растительности на изучаемой территории отражают спорово-пыльцевые диаграммы разрезов Бирского поселения, городищ Кара-Абыз (рис. 3), Акбердино-II (рис. 4), Шиповское (рис. 5), Курмантаевское и Мончазы I. Хотя следует отметить, что перерывы в отложении палинологического материала обнаружены на всех шурфах, кроме одного (Акбердино-II, шурф 2).

Динамика растительных сообществ на памятниках в целом схожа. Небольшие отличия обусловлены зональными особенностями формирования палиноспектров северных и южных местонахождений (табл. 2, 3, 4). К примеру, пыльца

Таблица 2

Этапы смены растительных сообществ на «северных» археологических памятниках Table 2

Этапы	Бирское поселение, шурф 1	Кара-Абызское городище, (раскоп В.А. Иванова)	Кара-Абызское городище, шурф 2	Стратигра- фическая шкала	Шкала Блитта- Сернандера
8	сосновые леса, небольшие си- нантропизированные откры- тые пространства (СП 13)	_	сосновые леса, небольшие си- нантропизированные откры- тые пространства (СП 8)		конец субатлантика
7	сосновые и липовые леса, не- большие синантропизирован- ные открытые пространства (СП 12)	_	липовые и березовые леса, не- большие синантропизирован- ные открытые пространства (СП 7)		середина
6	сосновые леса, небольшие си- нантропизированные откры- тые пространства (СП 11)	_	_	верхний голоцен	субатлантика
5	_	лесостепные ландшафты: бере- зовые леса, синантропизиро- ванные открытые пространства (СП 10)	березовые леса, небольшие си- нантропизированные откры- тые пространства (СП 3-5)		начало
4	_	лесостепи: липовые и березо- вые леса, синантропизирован- ные открытые пространства (СП 8-9)	липовые и березовые леса, не- большие синантропизирован- ные открытые пространства (СП 1)		субатлантика
3	липово-вязовые леса, неболь- шие синантропизированные от- крытые пространства (СП 8)	лесостепи: липовые леса, си- нантропизированные откры- тые пространства (СП 7)	_	средний — верхний голоцен	конец субборе- ала— начало субатлантика
2	липово-вязовые и сосновые ле- са, небольшие синантропизи- рованные открытые простран- ства (СП 6, 7)	синантропизированные откры- тые пространства, небольшие участки липово-вязовых лесов (СП 1-6)	_	средний голоцен	вторая половина суббореала
1	липово-вязовые леса (СП 5)	-	-		

### The vegetation succession phases on the "northern" archaeological sites

Примечание: СП — номер образца. Note: СП — sample number.



Рис. 4. Спорово-пыльцевая диаграмма голоценовых отложений городища Акбердино-II (шурф 2)

Fig. 4. The percentage diagrams for the main spore and pollen taxa of the Akberdino-II settlement

5. The percentage diagrams for the main spore and pollen taxa of the Shipovo ancient settlement

Eig.



темнохвойных пород (ель и пихта) отмечена лишь в отложениях самых северных памятников. Среди особенностей южных местонахождений (Курмантаевское городище и Касьяновская стоянка) следует отметить более широкое распространение открытых пространств.

При корреляции полученных материалов выделено 8 основных этапов смены растительности на территории Южного Предуралья:

— широколиственные леса на севере (вторая половина суббореала);

 открытые пространства со злаками на севере (вторая половина суббореала);

— хвойно-широколиственные леса на севере и открытые пространства и лесостепи на юге (конец суббореала – начало субатлантика);

 мелколиственные леса и открытые пространства со злаками (начало субатлантика);

 — хвойные леса с примесью мелколиственных и широколиственных пород (середина субатлантика);

 — широколиственные леса на севере и лесостепные ландшафты на юге (середина субатлантика);

— хвойные леса с примесью широколиственных элементов на севере и открытые пространства на юге (конец субатлантика).

Климат во второй половине суббореального периода был сначала теплым и влажным, а затем стал более аридным. В конце суббореала – начале субатлантика обстановка вновь сменилась на гумидную и теплую. В начале субатлантика наблюдается постепенная аридизация климата. В середине этого периода условия становятся сначала более влажными и прохладными, а позже — влажными и теплыми. В конце субатлантика климат стал суше и прохладнее.

### Выводы

В результате проведенных исследований изучена растительность в период функционирования десяти городищ и поселений кара-абызской культуры. На ряде разрезов удалось охарактеризовать ландшафты более ранних и поздних периодов. Всего выделено 8 этапов смены растительных сообществ.

При реконструкции климата выделено 7 обстановок. Общая тенденция аридизации климата и возрастания лесостепных ландшафтов в начале субатлантика, соответствующего времени бытования кара-абызского населения, отмечена практи-

### Таблица 3

## Этапы смены растительных сообществ на некоторых археологических памятниках из «центральной части»

Table 3

The vegetation succession phases on some archaeological sites from the "central part"

Branы	Городище Акбердино-II, шурф 2	Шиповское городище, шурф 2	Городище Мончазы-I, шурф 1	Охлебининское II городище, шурф 2	Страти- графичес- кая шкала	Шкала Блитта- Сернандера
8	лесостепи: сосновые леса, синантропизи- рованные открытые пространства (СП 13)	сосново-березовые ле- са, небольшие синан- тропизированные от- крытые пространства (СП 9)	_	открытые простран- ства (СП 8)		конец субатлантика
7	лесостепи: сосновые и липовые леса, си- нантропизированные открытые простран- ства (СП 12)	_	_	лесостепи: сосновые леса синантропизиро- ванные открытые про- странства (СП 6, 7)		середина
6	лесостепи: сосновые леса, синантропизи- рованные открытые пространства (СП 11)	_	сосновые леса, неболь- шие синантропизиро- ванные открытые про- странства (СП 5–7)	_	верхнии голоцен	субаглантика
5	лесостепи: липовые и березовые леса, си- нантропизированные открытые простран- ства (СП 6–10)	березовые леса, неболь- шие синантропизиро- ванные открытые про- странства (СП 3, 4)	березовые леса (СП 4)	_		начало субатлантика
4	сосновые и липовые леса (СП 1–5)	сосновые и березовые леса (СП 2)	_	_		
3	_	_	_	_	средний — верхний голоцен	конец суббореала — начало субатлантика
2	_	_	_	_	средний	вторая
1	_	_	_	_	голоцен	суббореала

### Таблица 4

Этапы смены растительных сообществ на «южных» археологических памятниках Table 4

The vegetation succession phases on the "southern" archaeological sites

Этапы	Курмантаевское городище, шурф 1	Касьяновская стоянка, шурф 1	Стратиграфическая шкала	Шкала Блитта-Сернандера	
8	_	_	верхний голоцен	конец субатлантика	
7	лесостепи: сосновые и дубовые леса, синантропизированные луго- во-степные сообщества (СП 11)	_		середина	
6	синантропизированные открытые пространства (СП 10)	_		суоатлантика	
5	березовые леса (СП 6-8)	лесостепи и леса: липовые леса, синантропизированные открытые пространства (СП 3, 4)		начало	
4	синантропизированные открытые пространства (СП 5)	_		суоатлантика	
3	_	_	средний — верхний голоцен	конец суббореала – начало субатлантика	
2	_	_	средний годоцен	вторая половина	
1	_	_	средний толоцен	суббореала	

Геологический вестник. 2019. №1

42

чески на всех изученных памятниках. Полученные данные существенно дополняют картину развития растительности и климата среднего и позднего голоцена Южного Предуралья.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и ФФИ АН РБ «Культурно-исторические процессы и изменения природно-климатических условий в эпоху раннего железа в лесостепном Предуралье», проект № 17-11-02001; частично в рамках государственных бюджетных тем № 0252-2016-0006, 0246-2019-0118 (лабораторные исследования).

### Список литературы:

Алексеев Ю.Е., Алексеев Е.Б., Габбасов К.К., Горчаковский П.Л., Губанов И.А., Гуфранова И.Б., Кузяхметов Б.Б., Кулагин Ю.З., Кучеров Е.В., Минибаев Р.Г. Наумова Л.Г., Назирова З.М., Шурова Е.А., Хайретдинов С.С. Определитель высших растений Башкирской АССР. – М.: Наука, 1988. – С. 6–12.

Бадер О.Н. Проблема смещения ландшафтных зон в голоцене и археология // Первобытный человек, его материальная культура и природная среда в плейстоцене и голоцене. – М., 1974. – С. 225–230.

*Гричук В.П., Заклинская Е.Д.* Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. – М.: Географгиз, 1948. –224 с.

Данукалова Г.А. Стратиграфическое расчленение верхнечетвертичных отложений Южноуральского региона // Геологический сборник № 8 / ИГ УНЦ РАН. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2009. – С. 40–48.

Данукалова Г.А. Уточненная региональная стратиграфическая схема квартера Предуралья и основные события на территории Южно-Уральского региона // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2010. – Т. 18, № 3. – С. 1–18.

Данукалова Г.А., Яковлев А.Г., Алимбекова Л.И., Морозова (Осипова) Е.М. Биктимировское городище: характеристика природной среды времени формирования культурного слоя // Уфимский археологический вестник. — 2004. — Вып. 5. — С. 11–15.

*Немкова В.К.* Стратиграфия поздне- и послеледниковых отложений Предуралья // К истории позднего плейстоцена и голоцена Южного Урала и Предуралья. – Уфа: БФАН СССР, 1978. – С. 4–45.

*Овсянников В.В.* Культурно-исторические процессы в лесостепном Предуралье в середине I тыс. до н.э. – середине I тыс. н.э. // Труды 4-го (20-го) Всероссийского археологического съезда в Казани. – Казань: Отечество, 2014. – Т. 2. – С. 376–377.

Пшеничнюк А.Х. Хронология и периодизация погребальных комплексов Охлебининского могильника // Хронология памятников Южного Урала. – Уфа: УНЦ РАН, 1993. – С. 32–61.

Савельев Н.С. Гафурийский керамический комплекс Биктимировского городища в лесостепи Южного Приуралья // Российская археология. – 2011. – № 2. – С. 56–66. Danukalova G., Osipova E., Yakovlev A., Yakovleva T. Biostratigraphical characteristic of the Holocene deposits of the Southern Urals // Quaternary International. – 2014. – V. 328– 329. – P. 244–263. – doi.org/10.1016/j.quaint.2013.10.065.

### **References:**

Alekseev Yu.E., Alekseev E.B., Gabbasov K.K., Gorchakovskii P.L., Gubanov I.A., Gufranova I.B., Kuzyakhmetov B.B., Kulagin Yu.Z., Kucherov E.V., Minibaev R.G., Naumova L.G., Nazirova Z.M., Shurova E.A., Khairetdinov S.S. Opredelitel' vysshykh rastenii Bashkirskoi ASSR [The determinant of higher plants of the Bashkir ASSR]. M.: Nauka, 1988. P. 6–12 (in Russian).

*Bader O.N.* Problema smesheniya landshaftnych zon v golotsene i arkheologiya [The problem of displacement of landscape zones in the Holocene and archeology] // Pervobytnyi chelovek, ego material'naya kul'tura i prirodnaya sreda v pleistotsene i golotsene [Primitive man, his material culture and natural environment in the Pleistocene and Holocene]. M., 1974. P. 225–230 (in Russian).

*Danukalova G.A.* Stratigraficheskoe raschlenenie verkhnechetvertichnykh otlozhenii Yuzhnoural'skogo regiona [Stratigraphic subdivision of the Upper Quaternary sediments of the Southern Urals region] // Geologicheskii sbornik No. 8 / IG UNTS RAN [Geological collection No. 8 / IG USC RAS]. Ufa: DesignPolygraphServis, 2009. P. 40–48 (in Russian).

Danukalova G.A. Utochnennaya regional'naya stratigraficheskaya skhema kvartera Predural'ya i osnovnye sobytiya na territorii Yuzhno-Ural'skogo regiona [The refined Quaternary stratigraphic scale of the Fore-Urals and main events in Southern Urals region] // Stragraphiya i geologicheskaya korrelatsiya [Stratigraphy and Geological Correlation]. 2010. V. 18, No. 3. P. 1–18 (in Russian).

*Danukalova G., Osipova E., Yakovlev A., Yakovleva T.* Biostratigraphical characteristic of the Holocene deposits of the Southern Urals // Quaternary International. 2014. V. 328– 329. P. 244–263. doi.org/10.1016/j.quaint.2013.10.065.

Danukalova G.A., Yakovlev A.G., Alimbekova L.I., Osipova (Morozova) E.M. Biktimirovskoe gorodishche: kharakteristika prirodnoi sredy vremeni formirovaniya kul'turnogo sloya [Biktimirovskoye ancient settlement: characteristics of the natural environment of the time of formation of the cultural layer] // Ufimskii arkheologicheskii vestnik [Ufa Archaeological Herald]. 2004. V. 5. P. 11–15 (in Russian).

*Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D.* Analiz iskopaemych pyltsy I spor I ego primenenie v paleogeographii [The analysis of fossil pollen and spore and using these data in paleogeography]. GeographGIZ Press, Moscow, 1948. 224 p. (in Russian).

Nemkova V.K. Stratigrafiya pozdne- i poslelednikovykh otlozhenii Predural'ya [Stratigraphy of the late glacial and post-glacial deposits of the Fore-Urals] // K istorii pozdnego pleistotsena i golotsena Yuzhnogo Urala i Predural'ya [The Late Pleistocene and Holocene History of the Southern Urals and Fore-urals]. Ufa: BFAN USSR Press, 1978. P. 4–45 (in Russian).

*Ovsyannikov V.V.* Kul'turno-istoricheskie protsessy v lesostepnom Predural'e v seredine I tys. do n.e. – seredine I tys. n.e. [Cultural and historical processes in the forest steppe Fore-Urals in the middle of I millennium BC – mid I millennium AD] // Trudy 4-th (20-th) Vserossiiskogo arkheologicheskogo s"ezda v Kazani [Proceedings of the All-Russian Archaeological Congress in Kazan]. Kazan: Fatherland, 2014. V. 2. P. 376–377 (in Russian).

*Pshenichnuk A.Kh.* Khronologiya i periodizatsiya pogrebal'nykh kompleksov Okhlebininskogo mogil'nika [Chronology and periodization of the burial complexes of the Okhlebininsky burial ground] // Chronologiya pamyatnikov Yuzhnogo Urala [Chronology of the monuments of the Southern Urals]. Ufa: USC RAN, 1993. P. 32–61 (in Russian).

Saveliev N.S. Gafuriiskii keramicheskii kompleks Biktimirovskogo gorodishcha v lesostepi Yuzhnogo Priural'ya [Gafuriysky ceramic complex of the Biktimirovskoe ancient settlement in the forest-steppe of the Southern Urals] // Rossiiskaya arkheologiya [Russian archeology]. 2011. No. 2. P. 56–66 (in Russian).

### Сведения об авторах:

**Курманов Равиль Гадельевич,** канд. биол. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: ravil\_kurmanov@mail.ru

Овсянников Владимир Владиславович, канд. истор. наук, Ордена Знак Почета Институт истории, языка и литературы Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИИЯЛ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: atliural@yandex.ru

Савельев Никита Сергеевич, канд. истор. наук, Ордена Знак Почета Институт истории, языка и литературы Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИИЯЛ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: sns1971@mail.ru

Галеев Руслан Ильдарович, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Башкирский государственный университет (БашГУ), г. Уфа. E-mail: rusl.galeew2012@mail.ru

### About the authors:

**Kurmanov Ravil**, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: ravil kurmanov@mail.ru

**Ovsyannikov Vladimir,** Institute of History, Language and Literature, Ufimian Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences (IHLL UFRC RAS), Ufa. E-mail: atliural@yandex.ru

Saveliev Nikita, Institute of History, Language and Literature, Ufimian Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences (IHLL UFRC RAS), Ufa. E-mail: sns1971@mail.ru

**Galeev Ruslan**, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Bashkir State University (BSU), Ufa. E-mail: rusl.galeew2012@mail.ru

УДК 553.9+553.21

DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-3

### «ДРЕВНИЕ» ЦИРКОНЫ В МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОДАХ ШАТАКСКОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ): МОРФОЛОГИЯ И ГЕНЕЗИС

© 2019 г. С. Г. Ковалев, С. И. Высоцкий, С. С. Ковалев

Реферат. В работе приводятся новые данные о находках «древних» цирконов в магматических породах Шатакского комплекса. На основе изучения морфологии кристаллов показано, что цирконы из базальтоидов комплекса относятся к магматическим, измененным вторичными процессами. Делается вывод о том, что «древние» цирконы представляют собой ксеногенный материал архейско-палеопротерозойского гранито-гнейсового субстрата, попавший в расплав при контаминации в результате действия AFC (assimilation and fractional crystallization) процесса, который характеризовался фракционированием ликвидусных фаз (оливин ± клинопироксен), накоплением флюидной фазы в прикровельной части камеры/очага с одной стороны, и ассимиляцией вмещающих пород — с другой.

Ключевые слова: Южный Урал, базальты, цирконы, U-Pb датирование, магматический расплав, фракционирование, ассимиляция

### "ANCIENT" CIRCONS IN MAGMATIC ROCKS OF THE SHATAK COMPLEX (SOUTH URALS): MORPHOLOGY AND GENESIS

S.G. Kovalev, S.I. Vysotsky, S.S. Kovalev

Abstract. The paper presents new data on the discoveries of "ancient" zircons in igneous rocks of the Shatak complex. Based on the study of morphology of the crystals, it was shown that the zircons from the basaltoids of the complex belong to igneous type, modified by secondary processes. It is concluded that the "ancient" zircons are xenogenic material of the Archean-Paleoproterozoic granite-gneiss substrate, which melted during contamination as a result of the AFC process, which was characterized by a fractionation of liquidus phases (olivine  $\pm$  clinopyroxene) and accumulation of a fluid phase in the roofing section of the chamber on the one hand, and the assimilation of host rocks on the other.

Keywords: South Ural, basalts, zircons, U-Pb dating, magmatic melt, fractionation, assimilation

### Введение

Шатакский комплекс представляет собой вулканогенно-осадочную ассоциацию, относящуюся к машакской свите (RF<sub>2</sub>) и залегающую в основании среднерифейского разреза Башкирского мегантиклинория (рис. 1). Комплекс состоит из осадочных и магматических пород, первые из которых слагают около 75% его объема и представлены преимущественно грубозернистыми разностями: конгломератами и песчаниками. Тонкозернистые разновидности — алевролиты, алевросланцы и сланцы встречаются относительно редко. Конгломераты присутствуют на нескольких стратиграфических уровнях. Они сложены хорошо окатанными, часто шарообразными обломками кварцитопесчаников и кварцитов. В нижних горизонтах фиксируются галька и дресва подстилающих пород юшинской свиты нижнего рифея. Цемент конгломератов представлен кварцевым материалом и серицитхлоритовой массой. Песчаники имеют существенно кварцевый состав и на 80–90% состоят из обломков кварца с хлорит-серицитовым цементом. Алевролиты, алевросланцы и сланцы встречаются

Для цитирования: Ковалев С.Г., Высоцкий С.И., Ковалев С.С. «Древние» цирконы в магматических породах Шатакского комплекса (Южный Урал): морфология и генезис // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 45–54. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-3.

For citation: Kovalev S.G., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. "Ancient" circons in magmatic rocks of the Shatak complex (South Urals): morphology and genesis // Geologicheskii vestnik. 2019. No. 1. P. 45–54. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-3.



Рис. 1. Геологические схемы, разрез и стратиграфическая колонка Шатакского комплекса. По [Ковалев и др., 2018] Условные обозначения: 1–7 — геологические схемы (1 — архейско-палеопротерозойские породы (тараташский комплекс); 2–7 отложения: 2 — раннерифейские, 3 — среднерифейские, 4 — юшинской свиты RF<sub>1</sub>, 5 —машакской свиты RF<sub>2</sub>, 6 — зигальгинской свиты RF<sub>2</sub>, 7 — авзянской свиты RF<sub>2</sub>); 8–16 — разрез (8 — кора выветривания; 9 — сланцы, алевролиты; 10 — песчаники; 11 конгломераты; 12 — пикриты; 13 — базальты; 14 — риолиты; 15 — интрузивные долериты; 16 — известняки).

### Fig. 1. Geological schemes, section and stratigraphic column of the Shatak complex. By [Kovalev et al., 2018]

*Notes:* 1-7 – for geological schemes (1 – Archean-Paleoproterozoic rocks (taratash complex); 2-7 – deposits: 2 – Lower Riphean, 3 – Middle Riphean, 4 – Yusha Formation RF<sub>1</sub>, 5 – Mashak Formation RF<sub>2</sub>, 6 – Zigalga Formation RF<sub>2</sub>, 7 – Avzian Formation RF<sub>2</sub>); 8-16 – for the section (8 – weathering crust; 9 – shale, siltstone; 10 – sandstone; 11 – conglomerate; 12 – picritic; 13 – basalt; 14 – rhyolite; 15 – intrusive dolerite; 16 – limestone).

в тонком переслаивании друг с другом. Относительно редко они слагают самостоятельные маломощные горизонты и пачки.

Вулкано-интрузивные породы Шатакского комплекса представлены пикритами, базальтами и риолитами [Парначев и др., 1986; Ковалев, Высоцкий, 2006, 2008]. Пикриты в виде пластовой интрузии мощностью около 25-30 м приурочены к основанию комплекса, располагаясь непосредственно на границе с подстилающими отложениями юшинской свиты (RF<sub>1</sub>). С некоторой долей условности в теле можно выделить три зоны: нижнюю эндоконтактовую, центральную и верхнюю эндоконтактовую. Породы верхней эндоконтактовой зоны относятся к метадолеритам, имеющим микроофитовую и микродолеритовую структуру. Центральная часть сложена пикритами, которые практически полностью превращены в тальк-амфибол-серпентиновый агрегат. По псевдоморфозам в них устанавливаются оливин, клинопироксен, ортопироксен и роговая обманка. Нижний эндоконтакт представлен метаморфизованными пикродолеритами. Из первичных минералов устанавливаются клинопироксен и плагиоклаз. Вторичные минералы — амфибол, лейкоксен, хлорит, серпентин, альбит, карбонат, тальк и серицит.

Базальты Шатакского комплекса характеризуются микродолеритовой, микроофитовой, апоинтерсертальной и порфировидной структурой и массивной текстурой, часто со столбчатой отдельностью. Минеральный состав включает в себя клинопироксен, плагиоклаз, роговую обманку, титаномагнетит и магнетит. Ассоциация вторичных минералов состоит из амфибола актинолиттремолитового ряда, хлорита (пеннин – клинохлор), эпидота, серицита, титанита, лейкоксена и гематита.

Риолиты, залегающие в верхней части кузъелгинской подсвиты в виде самостоятельного горизонта, светло-серые с порфировидной флюидальной и шлирово-такситовой структурой. Их основная масса сложена мелкозернистым кварц-полевошпатовым агрегатом, а в порфировидных выделениях присутствует кислый – средний плагиоклаз (андезин – олигоклаз). Темноцветные минералы представлены биотитом и хлоритом (пеннин – клинохлор). В качестве акцессориев установлены апатит, алланит, монацит, титанит и эпидот.

Также в пределах комплекса встречаются силлы и штокообразные тела с рвущими стратифицированные толщи контактами, сложенные долеритами и габбро-долеритами. Практически все магматические породы претерпели интенсивный зеленокаменный метаморфизм с развитием локальных зон окварцевания и серицитизации.

Проведенное ранее датирование магматических пород Шатакского комплекса по единичным кристаллам цирконов на SHRIMP-II (ВСЕГЕИ) показало присутствие в пробах нескольких популяций минерала с возрастом от 1500-1550 до 1330-1350 млн лет [Пучков и др., 2009; Пучков, 2010]. Возрастные данные, полученные методом CA-TIMS (CA-ID-TIMS) по 4 зернам циркона из метабазальтов, дали средневзвешенную <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb датировку 1381.5±1.0 млн лет (MSWD=1.0) и <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U датировку 1380.3±0.4 млн лет (MSWD=1.1) [Пучков, 2010], что и было принято за возраст магматических пород комплекса. Вместе с тем в этих же пробах обнаружены цирконы с архейскими (3629±44; 3358±47; 3341±43; 2948±40 млн лет) и палеопротерозойскими (1707-1677±48 млн лет) возрастами [Пучков и др., 2009, 2011]. Нами получены новые материалы по U-Pb датированию цирконов из магматических пород комплекса [Kovalev et al., 2018], которые позволяют предложить непротиворечивую модель, объясняющую присутствие «древних» цирконов в породах комплекса.

### Методика исследований

U-Pb датирование цирконов осуществлялось на вторично-ионном микрозонде SIMS SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ФГБУ ВСЕГЕИ. Подробное изучение кристаллов циркона позволило осуществить выбор достаточного количества участков (точек) для анализа, в максимальной степени отвечающих гомогенным, свободным от включений, вторичных изменений и механических повреждений доменам зерен, соответствующих процессу магматической кристаллизации циркона. В целом по 30 кристаллам из двух проб проведено 40 локальных изотопных анализов. Все датированные цирконы однородны и характеризуются отсутствием воздействия вторичных процессов на U-Pb изотопную систему, практически все полученные значения возраста конкордантны, т.е. совпадают по независимым изотопным системам <sup>206</sup>Pb-<sup>238</sup>U и <sup>207</sup>Pb-<sup>235</sup>U.

### Результаты исследований

Для датирования пород Шатакского комплекса были отобраны 2 пробы базальтоидов из кузъелгинской и каранской подсвит. Как видно из рис. 2, большая часть выделенных цирконов представлена хорошо ограненными зональными кристаллами цирконового (призматического) и гиацинтового габитуса. Кроме того встречаются короткопризматические кристаллы (см. рис. 2: 7.2, 13.2) с развитыми гранями {111} и {311}, дипирамидальные с развитой гранью {101} (см. рис. 2: 4.2, 14.2), а также обломки копьевидной призматической формы (см. рис. 2: 6.1, 3.2, 12.2, 15.2). Если исходить из положений о том, что тонкая зональность характерна обычно для циркона, кристаллизующегося из расплава [Носырев и др., 1989], а в неизменен-



Рис. 2. Катодолюминесцентные микрофотографии цирконов из базальтоидов кузъелгинской и каранской подсвит Шатакского комплекса

Fig. 2. Cathodoluminescent micrographs of zircons from the basaltoids of the Kuz'elga and Karan districts of the Shatak complex

ных наложенными процессами гранитах цирконовый морфотип относится к раннемагматической генерации, гиацинтовый — к позднемагматической, копъевидный — к пегматитовой, торпедовидный — к пневматолитовой, циртолитовый к гидротермальной [Пыстина, Пыстин, 2018], то практически все цирконы из базальтоидов Шатакского комплекса следует отнести к магматическим, измененным вторичными процессами.

При анализе внутреннего строения кристаллов циркона из пород Шатакского комплекса обращает на себя внимание тот факт, что наряду с четко проявленной эвгедральной зональностью существует как минимум две разновидности ядер минералов. Первая — это ограненные ядра призматического габитуса (см. рис. 2: 5.1, 10.1, 17.1), и вторая — ядра изометричной, округлой формы (см. рис. 2: 1.1, 1.2, 8.2). В первом случае зарождение и, возможно, рост кристаллов происходил из магматического расплава, а во втором — ситуация не так очевидна, так как существует вероятность формирования «округлости» как за счет частичного растворения ребер и вершин кристаллов, так и образование первично изометричных форм («футбольный мяч») в результате метаморфических процессов [Каулина, 2010]. В отдельных кристаллах присутствует радиальная секториальная зональность (см. рис. 2: 7.2, 11.1, 18.2), что обусловлено, вероятнее всего, перекристаллизацией циркона предыдущей генерации (детритового или магматического циркона протолита).

В целом следует констатировать, что морфологической особенностью изученных цирконов является практически полное отсутствие кристаллов «гранулитового» типа, которые широко распространены в полиметаморфических комплексах Урала [Краснобаев, 1986; Пыстина, Пыстин, 2002].

Торий-урановое отношение считается значимым критерием для определения обстановок образования циркона в магматических, метаморфических и гидротермальных условиях [Бибикова, 1989; Belousova et al., 2002; Rubatto, 2002; Hoskin, Schaltegger, 2003]. Для магматических цирконов концентрации Th и U зависят от содержаний этих элементов в среде кристаллизации, что характеризует состав источника, из которого кристаллизуются минералы. Как видно из приведенной таблицы и рис. За,



Рис. 3. Диаграммы Th–U для цирконов Шатакского комплекса (а) и гранитоидов северной части Приполярного Урала (б) *Диаграмма (a)*: 1 — цирконы из базальтов машакской свиты, по [Пучков, 2010]; 2 — цирконы из базальтоидов кузъелгинской подсвиты; 3 — цирконы из базальтоидов куранской подсвиты. *Диаграмма (б)*: 1 — Николайшорский массив; 2 — Кожимский массив; 3 — Хаталамбо-Лапчинский массив; 4 — Лапчавожский массив. 1–4 — по [Пыстина, Пыстин, 2018, табл. 2].

Fig. 3. Th–U diagrams for zircons of the Shatak complex (a) and granitoids of the northern part of the Subpolar Urals (6) *Chart* (*a*): 1 – zircons from basalts of the Mashak Formation [Puchkov, 2010]; 2 – zircons from basaltoids of the Kuz'elga Subformation; 3 – zircons from basaltoids of the Caran Subformation. *Chart* ( $\delta$ ): 1 – Nikolashor massif; 2 – Kozhimsky massif; 3 – Khatalambo-Lapchinsky massif; 4 – Lapchavozhsky massif. 1–4 – by [Pystina, Pystin, 2018, table 2].

содержания урана, тория и Th/U в цирконах из кузъелгинской и каранской подсвит Шатакского комплекса подвержены значительным вариациям (U — 106–1055 ppm, Th — 80–595 ppm, Th/U — 0.19–0.98 в цирконах кузъелгинской подсвиты и U — 86–639 ppm, Th — 28–529 ppm, Th/U — 0.33–1.21 в цирконах каранской подсвиты). Приме-

чательно, что концентрации этих элементов в изученных цирконах в значительной степени превышают содержания урана и тория в цирконах из базальтов Шатакского комплекса (см. рис. 3а), исследованных В.Н. Пучковым с соавторами [Пучков, 2010]. Из этой же диаграммы следует, что для цирконов каранской подсвиты характерна прямая

### Таблица

## Результаты U-Pb SIMS-SHRIMP анализов цирконов из магматических пород кузъелгинской и каранской подсвит Шатакского комплекса

Table

№ п/п	№ обр.	<sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> , %	U, ppm	Th, ppm	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	<sup>206</sup> Pb*, ppm	<sup>206</sup> Pb / <sup>238</sup> U, Age
1	1-6.1	0.04	1055	199	0.19	237	1496
2	1-11.2	0.08	230	154	0.69	60.9	1728
3	1-8.1	0.02	750	398	0.55	213	1838
4	1-3.1	0.04	685	161	0.24	193	1823
5	1-10.1	0.01	391	119	0.31	113	1865
6	1-7.1	0.12	106	80	0.78	32.8	1972
7	1-1.1	0.02	434	154	0.37	136	2001
8	1-11.1	3.29	513	164	0.33	125	1563
9	1-5.1	0.02	761	181	0.25	258	2142
10	1-2.1	0.33	795	595	0.77	286	2252
11	1-4.1	0.02	258	156	0.63	115	2692
12	1-9.1	0.00	401	380	0.98	217	3152
13	2-8.1	0.01	581	340	0.61	135	1539
14	2-7.1	0.02	276	102	0.38	79.6	1868
15	2-17.1	0.05	169	97	0.59	49.8	1903
16	2-12.1	0.02	561	270	0.50	172	1966
17	2-1.1	0.05	408	347	0.88	120	1901
18	2-10.1	0.00	249	262	1.09	79.2	2032
19	2-4.1	0.01	202	180	0.92	63.3	2000
20	2-14.1	0.10	133	80	0.62	41.8	2006
21	2-3.1	0.01	179	64	0.37	56.1	2000
22	2-5.1	0.05	169	197	1.21	53.1	2012
23	2-18.1	0.09	141	118	0.87	44.1	2004
24	2-2.1	0.00	440	293	0.69	137	1989
25	2-9.1	0.04	639	529	0.86	201	2009
26	2-13.1	0.02	163	154	0.98	66.9	2518
27	2-11.1	0.09	89	79	0.92	37.5	2579
28	2-16.1	0.03	252	81	0.33	111	2670
29	2-15.1	0.07	122	103	0.88	55.7	2748
30	2-6.1	0.05	86	28	0.33	40	2798

The results of the U-Pb SIMS-SHRIMP analyzes of zircons from igneous rocks of the Kuz'elga and Karan subassemblies of the Shatak complex

*Примечание*. № 1–12 — кузъелгинская подсвита; № 13–30 — каранская подсвита; Pb<sub>c</sub> and Pb\* обозначают нерадиогенный и радиогенный свинец, соответственно.

Note. No. 1-12 - Kuz'ylga Subformation; No. 13-30 - Karan Subformation; Pb<sub>c</sub> and Pb<sup>\*</sup> denote non-radiogenic and radiogenic lead, respectively.

зависимость между содержаниями U и Th с коэффициентом аппроксимации 0.76, в то время как для минералов из базальтоидов кузъелгинской подсвиты какая-либо зависимость между этими элементами отсутствует (коэффициент аппроксимации 0.19) и точки на диаграмме располагаются бессистемно (см. рис. 3а). В связи с этим представляется интересным сравнить содержания и конфигурацию графиков для урана и тория из гранитных

массивов северной части Приполярного Урала (см. рис. 3б), опубликованных Ю.И. Пыстиной и А.М. Пыстиным [2018], с полученными нами материалами. Как видно из приведенного графика (см. рис. 3б), для цирконов всех гранитных массивов характерна четко проявленная прямая корреляция между ураном и торием с очень высокими коэффициентами аппроксимации (0.87-0.98), что, вероятнее всего, обусловлено особенностями процесса кристаллизации минерала из гранитного расплава при закономерном снижении количеств U и Th в процессе минералообразования за счет их «связывания» в кристаллизующихся минералах. Аналогичная тенденция, установленная для цирконов из базальтоидов каранской подсвиты (см. рис. 2), может свидетельствовать об их принадлежности к гранитоидам, контаминированным магматическим расплавом при его эволюции в промежуточном очаге.

Возраст цирконов был определен для обеих групп минералов. Для 5 зерен из базальтоидов кузъелгинской подсвиты получены два дискордантных возраста — 1985±16 (n=2) и 1892.4±9.7 (n=3) млн лет (рис. 4a, б). В целом же разброс возрастов единичных кристаллов по <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U располагается в интервале 1496-3152 млн лет с «максимумом» ~1900 млн лет, а возрастные интервалы соответствуют: 1496-1563 млн лет; 1728-1865 млн лет; 1972-2001 млн лет; 2142-2252 млн лет; 2692 млн лет и 3152 млн лет. Конкордантный возраст, построенный по 7 зернам цирконов из каранской подсвиты, соответствует 2003.2±9.7 млн лет (см. рис. 4в), а разброс возрастов единичных кристаллов по <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U располагается в интервале 1539-2798 млн лет с «максимумом» ~2 млрд лет. При этом

возрастные интервалы для цирконов каранской подсвиты близки к аналогам из кузъелгинской подсвиты, но не тождественны: 1539 млн лет; 1869–1966 млн лет; 2000–2032 млн лет; 2518–2579 млн лет; 2670 млн лет; 2748–2798 млн лет. Здесь же необходимо подчеркнуть, что, как видно из рис. 2, часто кратеры от единичных анализов захватывают несколько зон роста кристаллов, т.е. мы имеем некие интегральные значения возрастов,



Рис. 4. Диаграммы с дискордией (а), (б) и конкордией (в) для цирконов и магматических пород Шатакского комплекса

Fig. 4. Diagrams with discordia (a), (6) and concordia (b) for zircons and igneous rocks of the Shatak complex

и если оценивать картину в целом, то необходимо констатировать, что большая часть цирконов имеет возраст близкий к 2 млрд лет.

### Обсуждение результатов

Сложившаяся ситуация, когда в породах Шатакского комплекса обнаружено не просто значительное, а преобладающее количество цирконов с возрастами, противоречащими геологическим материалам, требует своего разрешения. Нами предлагается следующая модель, объясняющая изложенный выше материал.

В рифейской истории западного склона Южного Урала среднерифейский этап являлся временем с максимальным развитием магматизма на обширной территории, выходящей далеко за пределы Южного Урала (Восточно-Европейская платформа, Тиман, Гренландия, Сибирский кратон), и представлял собой событие субглобального масштаба, свидетельствующее о его плюмовой/суперплюмовой природе [Пучков, Ковалев, 2013]. В это время поступление недифференцированного мантийного вещества при подъеме плюма и связанный с ним рифтогенный процесс активного типа приводят к внедрению расплава в верхние горизонты коры. Р-Т условия расплава в промежуточном очаге реконструируются по составу оливина и клинопироксена пикритов Шатакского комплекса, согласно которым кристаллизация оливина началась при T=1100°С и давлении 10-11 кбар [Ковалев и др., 2017]. Геологическое строение Шатакского комплекса, а именно наличие базальтов и риолитов в кузъелгинской подсвите и базальтов в казавдинской, калпакской и каранской подсвитах, различающихся по времени излияния, позволяет предполагать существование нескольких взаимосвязанных промежуточных очагов. Эволюция расплава в промежуточных камерах определялась, по нашему мнению, действием АFC процесса (assimilation and fractional crystallization) [De Paolo, 1981], который характеризовался фракционированием ликвидусных фаз (оливин  $\pm$  клинопироксен), накоплением флюидной фазы в прикровельной части камеры/очага, с одной стороны, и ассимиляцией вмещающих пород — с другой. Реальность действия AFC процесса доказывается наличием пикритов как продуктов фракционирования оливина и клинопироксена, а также эволюцией Sm-Nd системы в магматических породах Шатакского комплекса, свидетельствующей о контаминации расплава архейскими и палеопротерозойскими породами [Ковалев и др., 2018]. В процессе контаминации в магматическую камеру попадают ксеногенные цирконы из ассимилированного вещества. Причем установленные в ряде публикаций U-Pb возраста цирконов из субстрата тараташского метаморфического комплекса [Ронкин и др., 2012] и обломочных цирконов из базальных уровней стратотипа рифея [Кузнецов и др., 2013] практически полностью идентичны возрастным интервалам, приведенным выше. Хорошая сохранность кристаллографических форм цирконов свидетельствует о том, что они представляют собой «магматические» минералы из архейско-палеопротерозойского гранито-гнейсового субстрата.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что находки «древних» цирконов в магматических породах Шатакского комплекса могут быть объяснены реализацией AFC процесса при эволюции расплава в промежуточных очагах и свидетельствуют о том, что породы тараташского комплекса могут служить аналогом фундамента, распространенного (по крайней мере, в среднерифейское время) под всей западной палеоконтинентальной частью Южного Урала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-45-020045.

### Список литературы:

Бибикова Е.В. U-Pb геохронология ранних этапов развития древних щитов. – М.: Наука, 1989. – 180 с.

Каулина Т.В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. – Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2010. – 144 с.

Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. Новый тип благороднометальной минерализации в терригенных породах Шатакского грабена (западный склон Южного Урала) // Литология и полезные ископаемые. – 2006. – № 4. – С. 415–421.

Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. Новые данные по геологии Шатакского комплекса (западный склон Южного Урала) // Литология и полезные ископаемые. – 2008. – № 3. – С. 280–289.

Ковалев С.Г., Высоцкий С.И., Ковалев С.С. Изотопногеохимическое (Rb-Sr, Sm-Nd) изучение магматических пород Шатакского комплекса (Башкирский мегантиклинорий) // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий. – Спб: Свое издательство, 2018. – С. 256–262.

Ковалев С.Г., Пучков В.Н., Высоцкий С.И., Ковалев С.С. Условия образования магматических пород при плюмовом процессе (на примере западного склона Южного Урала) // ДАН. – 2017. – Т. 475, № 2. – С. 171–175. – doi.org/10. 7868/S0869565217200129.

*Краснобаев А.А.* Циркон как индикатор геологических процессов. – М.: Наука, 1986. – 152 с.

Кузнецов Н.Б., Маслов А.В., Белоусова Е.А., Романюк Т.В., Крупенин М.Т., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н., Серегина Е.С., Цельмович В.А. Первые результаты U–Pb LA–ICP–MS-изотопного датирования обломочных цирконов из базальных уровней стратотипа рифея // ДАН. – 2013. – Т. 451, № 3. – С. 308–313. – doi.org/10.7868/S0869565 213210226.

*Носырев И.В., Робул В.М., Орса В.И.* Генерационный анализ акцессорного циркона. – М.: Наука, 1989. – 203 с.

Парначев В.П, Ротарь А.Ф., Ротарь З.М. Среднерифейская вулканогенно-осадочная ассоциация Башкирского мегантиклинория (Южный Урал). – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. – 105 с.

*Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). — Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. — 280 с.

Пучков В.Н., Ковалев С.Г. Плюмовые события на Урале и их связь с субглобальными эпохами рифтогенеза // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. – С. 34–38.

Пучков В.Н., Козлов В.И., Краснобаев А.А. Палеозойские U-Pb SHRIMP-датировки магматических пород Башкирского мегантиклинория // Геологический сборник № 9 / ИГ УНЦ РАН. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2011.– С. 36–43.

Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Шмитц М., Козлов В.И., Давыдов В.И., Лепехина Е.Н., Нехорошева А.Г. Новые U-PB датировки вулканитов машакской свиты рифея Южного Урала и их сравнительная оценка // Геологический сборник № 8 / ИГ УНЦ РАН. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2009. – С. 3–14.

*Пыстина Ю.И., Пыстин А.М.* Цирконовая летопись Уральского докембрия. — Екатеринбург: УрО РАН, 2002. — 167 с.

Пыстина Ю.И., Пыстин А.М. Распределение U и Th в цирконах метаморфических пород и гранитоидов севера Урала // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий. – Спб: Свое издательство, 2018. – С. 294–299.

*Ронкин Ю.Л., Синдерн С., Лепихина О.П.* Изотопная геология древнейших образований Южного Урала // Лито-сфера. – 2012. – № 5. – С. 50–76.

Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2002. – V. 143. – P. 602–622. – doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7.

*De Paolo D.J.* Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fracional crystallization // Earth and Planetary Science Letters. -1981. - V. 53. - P. 189-202. - doi.org/10.1016/0012-821x(81)90153-9.

*Hoskin P.W.O., Schaltegger U.* The Composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // Zirkon: Reviews in mineralogy & geochemistry. – 2003. – V. 53. – P. 27–62. – doi.org/10.2113/0530027.

Kovalev S.G., Puchkov V.N., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. Finds of "Ancient" Zircons in Magmatic Rocks of the Shatak Complex (Southern Urals) // Doklady Earth Sciences. – 2018. – V. 482. – No. 2. – P. 1270–1274. – doi.org/10.1134/s1028334x 18100124.

*Rubatto D.* Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism // Chemical Geology. – 2002. – V. 184. – P. 123–138. – doi. org/10.1016/s0009-2541(01)00355-2.

### **References:**

*Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I.* Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2002. V. 143. P. 602–622. doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7.

*Bibikova E.V.* U-Pb geokhronologiya rannikh etapov razvitiya drevnikh shchitov [U-Pb geochronology of the early stages of the development of ancient shields]. M.: Science, 1989. 180 p. (in Russian).

*De Paolo D.J.* Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fracional crystallization // Earth and Planetary Science Letters. 1981. V. 53. P. 189–202. doi.org/10.1016/0012-821x(81)90153-9.

*Hoskin P.W.O., Schaltegger U.* The Composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // Zircon: Reviews in mineralogy & geochemistry. 2003. V. 53. P. 27–62. doi.org/10.2113/0530027.

*Kaulina T.V.* Obrazovanie i preobrazovanie tsirkona v polimetamorficheskikh kompleksakh [Formation and transformation of zircon in polymetamorphic complexes]. Apatity: Publishing house of the Kola Scientific Center of the RAS, 2010. 144 p. (in Russian).

*Kovalev S.G., Vysotsky I.V.* A new type of noble metal mineralization in the terrigenous rocks of Shatak graben, western slope of the Southern Urals] // Lithology and Mineral Resources. 2006. V. 41, No. 4. P. 371–377. doi.org/10.1134/S002449020 6040079.

*Kovalev S.G., Vysotsky I.V.* New data on geology of the Shatak Complex (western slope of the Southern Urals)] // Lithology and Mineral Resources. 2008. V. 43, No. 3. P. 250–259. doi.org/10.1134/S0024490208030048.

Kovalev S.G., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. Izotopno-geokhimicheskoe (Rb-Sr, Sm-Nd) izuchenie magmaticheskikh porod Shatakskogo kompleksa (Bashkirskii megantiklinorii) [Isotope-geochemical (Rb-Sr, Sm-Nd) study of igneous rocks of the Shatak complex (Bashkir meganticlinorium)] // Geologiia, poleznye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredelnykh territorii [Geology, minerals and problems of geoecology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories]. Spb: Svoe publ., 2018. P. 256–262 (in Russian).

*Kovalev S.G., Puchkov V.N., Vysotsky S.I., Kovalev S.S.* Conditions of formation of igneous rocks in plume magmatism at the example of the western slope of the Southern // Doklady Earth Sciences. 2017. V. 475, No. 1. P. 743–747. doi.org/10.1134/ S1028334X17070169.

Kovalev S.G., Puchkov V.N., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. Finds of "Ancient" Zircons in Magmatic Rocks of the Shatak Complex (Southern Urals) // Doklady Earth Sciences. 2018. V.482. No. 2. P. 1270–1274. doi.org/10.1134/s1028334x18100124.

*Krasnobaev A.A.* Tsirkon kak indikator geologicheskikh protsessov [Zircon as an indicator of geological processes]. M.: Nauka publ., 1986. 152 p. (in Russian).

Kuznetsov N.B., Maslov A.V., Belousova E.A., Romanyuk T.V., Krupenin M.T., Gorohanin V.M., Gorozhanina E.N., Seryogina E.S., Tselmovich V.A. The first U-PB (LA-ICP-MS) isotope data of detrital zircons from the basal levels of the Riphean stratotype // Doklady Earth Sciences. 2013. V. 451, No. 1. P. 724–728. doi.org/10.1134/S1028334X1307026X.

*Nosyrev I.V., Robul V.M., Orsa V.I.* Generatsionnyi analiz aktsessornogo tsirkona [Generation analysis of accessory zircon]. M.: Nauka publ., 1989. 203 p. (in Russian).

Parnachev V.P., Rotar A.F., Rotar Z.M. Srednerifeiskaya vulkanogenno-osadochnaya assotsiatsiya Bashkirskogo megantiklinoriya (Yuzhnyi Ural) [The Middle Riphean volcanogenicsedimentary association of the Bashkir meganticlinorium (South Ural)]. Sverdlovsk: USC, USSR Academy of Sciences, 1986. 105 p. (in Russian).

*Puchkov V.N.* Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and Urals (current issues of stratigraphy, techtonic, geodynamics and metallogeny)]. Ufa: DesignPoly-graphService, 2010. 280 p. (in Russian).

*Puchkov V.N., Kovalev S.G.* Plyumovye sobytiya na Urale i ikh svyaz' s subglobal'nymi epokhami riftogeneza [Plume events in the Urals and their connection with subglobal eras of rifting] // Kontinentalnyi riftogenez, soputstvuiushchie protsessy [Continental rifting, related processes]. Irkutsk: IZK SB RAS, 2013. P. 34–38 (in Russian).

Puchkov V.N., Kozlov V.I., Krasnobaev A.A. Paleozoiskie U-Pb SHRIMP-datirovki magmaticheskikh porod Bashkirskogo megantiklinoriya [Paleozoic U-Pb SHRIMP-dating of igneous rocks of the Bashkir meganticlinorium] // Geologicheskii sbornik 9 [Geological collection No. 9] / IG UC RAS. Ufa: DesignPoligraphService publ., 2011. P. 36–43 (in Russian).

Puchkov V.N., Krasnobaev A.A., Schmitz M., Kozlov V.I., Davydov V.I., Lepekhina E.N., Nekhorosheva A.G. Novye U-PB datirovki vulkanitov mashakskoi svity rifeya Yuzhnogo Urala i ikh sravnitel'naya otsenka [New U-PB datings of the Mashak Formation of the Riphean Southern Urals and their comparative assessment] // Geologicheskii sbornik 8 [Geological collection No. 8] / IG UC RAS. Ufa: DesignPoligraphService, 2009. P. 3–14 (in Russian).

*Pystina Yu.I., Pystin A.M.* Tsirkonovaya letopis' Ural'skogo dokembriya [Zircon Chronicle of the Ural Precambrian]. Ekaterinburg: Urals Branch of the RAS, 2002. 167 p. (in Russian).

*Pystina Yu.I., Pystin A.M.* Raspredelenie U i Th v tsirkonakh metamorficheskikh porod i granitoidov severa Urala [The distribution of U and Th in zircons of metamorphic rocks and granitoids of the north of the Urals] // Geologiia, poleznye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredelnykh territorii [Geology, minerals and problems of the geoecology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories]. SPb: Svoe publ., 2018. P. 294–299 (in Russian).

*Ronkin Yu.L., Sindern S., Lepikhina O.P.* Izotopnaya geologiya drevneishikh obrazovanii Yuzhnogo Urala [Isotope Geology of the Oldest rocks of the Southern Urals] // Lithosphere. 2012. No. 5. P. 50–76 (in Russian).

*Rubatto D.* Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism // Chemical Geology. 2002. V. 184. P. 123–138. doi.org/10.1016/s0009-2541(01)00355-2.

#### Сведения об авторах:

Ковалев Сергей Григорьевич, доктор геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: kovalev@ufaras.ru

**Высоцкий Сергей Игоревич,** Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа

Ковалев Сергей Сергеевич, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа

### About the authors:

**Kovalev Sergei Grigor'evich,** doctor of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: kovalev@ufaras.ru

**Vysotsky Sergei Igorevich,** Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa

**Kovalev Sergei Sergeevich**, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa

УДК 553.33

DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-4

### РУДОНОСНОСТЬ УГЛЕРОДИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МАКСЮТОВСКОГО КОМПЛЕКСА (ЗОНА УРАЛТАУ)

© 2018 г. А.В. Сначёв, Я.Н. Нугуманова, Д.Е. Савельев

Реферат. В статье рассмотрено геологическое строение максютовского комплекса, развитого в южной части зоны Уралтау. Особое внимание уделено широко представленным в его составе углеродистым отложениям (графитистые кварциты, слюдисто-графито-кварцевые сланцы). Показано, что они относятся к низкоуглеродистому типу и кремнисто-углеродистой формации. В статье отмечается, что рудоносность черносланцевой формации максютовского комплекса довольно слабая и определяется двумя металлогеническими этапами, первый из которых характеризуется преобладанием седиментационных процессов, а второй проявился в период постседиментационной активизации региона. С первым из них связаны проявления фосфоритов, а со вторым — пиритпирротин-халькопиритовое оруденение с повышенным содержанием золота.

Ключевые слова: зона Уралтау, углеродистые отложения, рудоносность, благородные металлы

### ORE PROSPECTS OF CARBONACEOUS DEPOSITS OF THE MAKSYUTOVO COMPLEX (URALTAU ZONE)

### A.V. Snachev, Ya.N. Nugumanova, D.E. Saveliev

**Abstract.** The article discusses the geological structure of the Maksyutovo complex, developed in the southern part of the Uraltau zone. Particular attention is paid to the carbonaceous deposits widely represented in it (graphitic quartzites, micaceous-graphite-quartz schists). It was shown that they belong to the low-carbon type and a siliceous-carbon formation. The article notes that the ore-bearing nature of the black shale formation of the Maksyutovo complex is rather weak and is determined by two metallogenic stages. The first is characterized by the predominance of sedimentation processes, and the second is manifested during the period of post-sedimentation activation of the region. Manifestations of phosphorites are associated with the first one, and pyrite-pyrrhotite-chalcopyrite mineralization with a high gold content is associated with the second one.

Keywords: zone Uraltau, black shale, ore-bearing, noble metals

Зона Уралтау, расположенная между Главным Уральским разломом на востоке, Зилаирским мегасинклинорием и Башкирским мегантиклинорием на западе, прослеживается в меридиональном направлении от широты с. Кирябинское до Мугоджар. Основы стратиграфии метаморфических толщ зоны Уралтау были заложены Д.Г. Ожигановым [1941], который выделил максютовский и суванякский метаморфические комплексы, отличающиеся степенью метаморфизма и имеющие тектоническое соотношение на всем своем протяжении по Янтышевско-Юлукскому надвигу западного падения. До недавнего времени эти комплексы выделялись на всех геологических картах как рифей-вендская антиклинорная структура асимметричного строения с пологим западным и крутым восточным крыльями [Козлов, Пацков, 1974]. Восточное крыло антиклинорной структуры, по-видимому, перекрыто надвинутыми по Главному Уральскому разлому толщами палеоокеанического сектора, представленными на поверхности в зоне динамического влияния разлома мощной полосой развития тектонических брекчий, милонитов и бластомилонитов [Нечеухин и др., 1986].

Для цитирования: Сначёв А.В., Нугуманова Я.Н., Савельев Д.Е. Рудоносность углеродистых отложений максютовского комплекса (зона Уралтау) // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 55–67. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-4. For citation: Snachev A.V., Nugumanova J.N., Saveliev D.E. Ore prospects of carbonaceous deposits of the Maksyutovo complex (Uraltau zone) // Geologicheskii vestnik. 2019. No. 1. P. 55–67. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-4.

В результате долгой и кропотливой работы геологов по поискам фауны наметилась тенденция к пересмотру стратиграфии и тектоники этого региона [Криницкий, Криницкая, 1965; Родионов, Радченко, 1988; Захаров, Пучков, 1994; Пучков, 1994; Захаров, Мавринская, 1994; Захаров и др., 1995]. По итогам последних геологосъемочных работ зона Уралтау трактуется как ранне-среднепалеозойская структура (возможно, с реликтами более древнего субстрата, объемы которого не ясны) [Князев и др., 2013]. В частности, четырехчленное деление максютовского комплекса (галеевская, кайраклинская, юмагузинская и карамалинская свиты) на основе вещественно-структурного анализа заменено на двучленное (галеевская, карамалинская серии) (Захаров, Быкова, 2003ф) (рис. 1). В данной статье авторами принимается вариант геологического строения территории, предложенный А.А. Захаровым и Л.С. Быковой.

Галеевская серия (O-S?) — объединяет метаосадки, включая метакварциты, метаграувакки и метапелиты, среди которых встречаются менее деформированные блоки основного и ультраосновного состава (см. рис. 1). В целом эта единица отвечает галеевской, кайраклинской и юмагузинской свитам стандартной стратиграфической схемы. Карамалинская серия (S–D<sub>1</sub>), отделенная от первой тектоническими контактами, представлена углеродистыми сланцами и кварцитами в тесном сочетании с метавулканитами, линзами мраморов, метагаббро и линзами серпентинитового меланжа с метародингитами. Она соответствует верхней и средней подсвите кайраклинской и всей карамалинской свитам. Для ультрабазитов, подчеркивающих своим положением тектонические блоки, возраст условно принят как ранне-среднеордовикский.

Отложения максютовского комплекса в результате тектонических движений, субдукции и последующей коллизии с Магнитогорской островной дугой были метаморфизованы [Пучков, 2000]. Расчеты термодинамических параметров для минеральных парагенезисов показали, что отложения галеевской серии испытали метаморфизм при температуре 650–700 °C со значительным разбросом по давлению (пиковый для низкотитанистых эклогитов в 24 кбар), карамалинской серии — при 450 °C и 8 кбар [Ковалев и др., 2011, 2015]. Вариации параметров обусловлены тем, что они находились на различных по глубинности уровнях субдуцирующей плиты. Затем первые поднялась вверх и пришли в тектонический контакт со вторыми на уровне лавсонит-глаукофанового метаморфического парагенезиса. Наконец, в ходе дальнейшей эксгумации обе единицы были смяты в антиформу, и структура приобрела современный вид [Пучков, 2010].

В разрезе метаморфических комплексов Уралтау углеродсодержащие отложения занимают различные возрастные уровни. Наиболее полное их развитие отмечается среди пород максютовского комплекса. Так, якуповская метаформация (O-S?ms<sub>2</sub>) сложена в основном сланцами мусковит-кварцевого и слюдисто-плагиоклаз-кварцевого состава с прослоями графитистых кварцитов, в аралбаевской метаформации ( $S-D_1$ ?ms<sub>3</sub>) графитистые сланцы встречаются по всему разрезу, образуя толщи переслаивания с ортопородами, слюдисто-кварцевыми и хлорит (гранат)-слюдисто-кварцевыми сланцами.

Углеродистые сланцы и кварциты имеют площадное распространение и образуют самостоятельные пачки и горизонты выдержанной мощности по латерали. Существенное преобладание среди них тонкозернистых пелитовых разностей, присутствие хемогенного (кремнистого) материала, характерное тонкополосчатое (слоистое) строение свидетельствуют о накоплении этих отложений в сравнительно спокойных условиях морского бассейна на значительном удалении от береговой линии (рис. 2).

На стандартных петрохимических диаграммах они относятся к кремнисто-углеродистой формации и имеют достаточно однородный минеральный состав (рис. 3). Породообразующим является кварц (до 90%), представленный разнозернистыми как субидиоморфными, так и ксеноморфными зубчатыми зернами, размер которых варьирует от 0.3— 2 мм. Мусковит и серицит (до 5%) в виде чешуек и волокон ориентированы по сланцеватости породы. Гранат (до 5%) выражен идиоморфными зернами от 0.1 до 0.4 мм с включениями мелкозернистого кварца.

Содержание углеродистого вещества в сланцах и кварцитах максютовского метаморфического комплекса составляет 1.5–3.0%. По данным рентгеноструктурного анализа углеродистое вещество представлено графитом. Основная его масса обособляется в виде полосчатых, прожилковидных и чешуйчатых выделений гексагонального и призматического габитуса, ориентированных параллельно полосчатости и рассланцеванию (см. рис. 36). Анализ соотношения изотопов углерода <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C по сравнению с PDB составляет 25–30‰, что доказывает биогенную природу углерода в сланцах

## Рис. 1. Геологическое строение максютовского комплекса Юлукской площади (по А.А. Захарову, Л.С. Быковой [2003ф], с упрощениями авторов)

Условные обозначения: 1 — зилаирская и мукасовская свиты объединенные (полимиктовые песчаники, алевролиты, кремнистые сланцы); 2 — сакмарская и туратская свиты объединенные (метаэффузивы основного состава, кремнистые сланцы, полимиктовые песчаники, алевролиты); 3 — суванякский комплекс, уткальская серия, рябчиковая и кварцитовая метаформации объединенные (метаморфо-метасоматические образования по вулканогенно-терригенным толщам); 4 — максютовский комплекс, карамалинская серия, баракальская и аралбаевская метаформации объединенные (метаморфо-метасоматические образования по вулканогенно-терригенным толщам); 5 — максютовский комплекс, галеевская серия, юмагузинская и якуповская метаформации объединенные (метаморфо-метасоматические образования по терригенным толщам); 6 — юлукский комплекс (габбро, габбро-долериты в различной степени метаморфизованные); 7 — ташлинский и войкаринско-кемпирсайский комплексы (серпентиниты и продукты их метаморфометасоматических преобразований); 8 — главные разрывные нарушения (1 — Янтышевско-Юлукский разлом, 2 — Главный Уральский разлом); 9 — Южно-Юлукский участок детальных работ. Структурно-формационные зоны: I-II — Уралтауская мегазона (I — суванякский комплекс, II — максютовский комплекс), III — зона Главного Уральского разлома, IV — Магнитогорская мегазона.

# Fig. 1. The geological structure of the Maksyutovo complex of the Yuluk area (according to A.A. Zakharov, L.S. Bykova [2003f], with the simplifications of the authors)

Legend: 1 - Zilair and Mukasov combined (polymictic sandstones, siltstone, siliceous schists); 2 - Sakmara and Turatsk Formations undivided (meta-effusions of mafic composition, siliceous shales, polymictic sandstones, aleurolites); 3 - Suvanyak complex, Utkal series, greywacke and quartzite meta-formations combined (metamorpho-metasomatic formations on volcanogenic-terrigenous strata); 4 - Maksyutovo complex, Karamalin series, Barakal and Aralbaev metaformations combined (metamorpho-metasomatic formations upon volcanogenic-terrigenous strata); 5 -Maksyutovo complex, Galeev series, Yumaguzin and Yakupov metaformations combined (metamorpho-metasomatic formations in terrigenous strata); 6 -Yuluk complex (gabbro, gabbro-dolerites metamorphozed to varying degrees); 7 tashlinsky and voykar-kempirsaysky complexes (serpentinites and products of their metamorpho-metasomatic transformations); 8 - main faults (1 - Yantysh-Yuluk fault, 2 - the Main Ural fault); 9 - South Yuluk area of detailed work. Structural-formational zones: I-II - Uraltau megazone (I - Suvanyak complex, II - Maksiut complex), III - zone of the Main Ural fault, IV - Magnitogorsk megazone.



Геологический вестник. 2019. №1



Рис. 2. Фотографии типовых углеродсодержащих пород максютовского комплекса Fig. 2. Photos of typical carbonaceous rocks of the Maksyutovo complex

и кварцитах [Leech, Ernst, 1998; Ковалев, Тимофеева, 2013]. В результате воздействия на породы процессов регионального и динамометаморфизма происходит перегруппировка, графит укрупняется и происходит совершенствование его структуры. При этом содержание углерода в рассматриваемых отложениях может достигать 38% [Leech, Ernst, 2000] (см. рис. 3а, в).

Металлогения черносланцевых отложений зоны Уралтау специально ранее не изучалась. К настоящему времени нет достаточно надежных данных для детального районирования углеродистых формаций и отнесения содержащейся в них рудной минерализации к определенным тектоно-магматическим циклам развития этой территории. Это объясняется в первую очередь слабой металлогенической изученностью зоны Уралтау в целом, отсутствием надежных сведений о возрасте оруденения, его связи с глубинной структурой, геохимической и рудной специализации осадочных и магматических образований и др.

*Ванадий, фосфор.* Типичными примерами раннего седиментационного этапа накопления рудных

Геологический вестник. 2019. №1

компонентов в углеродистых отложениях зоны Уралтау могут служить ванадиеносные и фосфатоносные черносланцевые образования максютовского комплекса.

По данным А.А. Алексеева [Алексеев, 1978] в графитистых кварцитах и графито-кварцевых сланцах якуповской и аралбаевской метаформаций концентрации ванадия составляют от 800 до 5000 г/т (табл. 1).

При кларке ванадия в черных сланцах около 200 г/т [Юдович, Кетрис, 1986], такие содержания можно отнести к резко аномальным или рудогенным. Примечательно, что аномальное обогащение ванадием графитистых пород носит выдержанный характер. Это позволило выделить в максютовском комплексе ванадиеносную графито-кварцито-сланцевую формацию [Алексеев, 1978]. Автором отмечается прямая зависимость содержаний ванадия в черных сланцах от концентраций в них органического вещества, что указывает на седиментационную природу этого элемента. Его реальным поставщиком в осадок, по аналогии с другими подобными объектами, могли быть твердые обло-





николи ×



59

### Таблица 1

## Результаты спектрального (1) и химического (2) анализов проб графитистых пород максютовского комплекса на V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%) [Алексеев, 1978]

Table 1

## Results of spectral (1) and chemical (2) analyzes of samples of graphitic rocks of the Maksyutovo complex for V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%) [Alekseev, 1978]

№ п.п.	№ пробы	Название породы и привязка	1	2
1	6198	Слюдисто-графито-кварцевый сланец, Сев. Юлук	0.07	0.15
2	6227	Графито-кварцевый сланец, Сев. Юлук	0.07	0.08
3	6278	Графито-кварцевый сланец, Южный Юлук	0.11	0.14
4	6408	Углеродисто-кварцевый сланец, Южный Юлук	0.11	0.14
5	6417	Графито-кварцевый сланец, Южный Юлук	0.11	0.15
6	6447	Графито-кварцевый сланец, Сев. Юлук	0.07	0.11
7	6474	Углеродисто-хлорито-альбитовый сланец Сев. Юлук	0.07	0.08
8	6549	Углеродисто-кварцевый сланец, Южный Юлук	0.11	0.09
9	7344	Графитистый кварцит, р. Сакмара у д. Сабирово	0.14	0.11
10	7592	Графито-кварцевый сланец, руч. Кашля-Уар	0.09	0.09
11	8417	Слюдисто-графито-кварцевый сланец, р. Губерля	0.09	0.07
12	160	Графито-кварцевый сланец, руч. Карамала	0.90	0.19
13	192	Графито-кварцевый сланец, р. Сакмара	0.54	0.16
14	5574	Графито-кварцевый сланец, р. Баракал	0.18	0.13
15	6544	Слюдисто-графито-кварцевый сланец, Южный Юлук	0.18	0.12
16	147	Графито-кварцевый сланец, д. М. Юлдыбаево	0.90	0.35

*Примечания:* Пробы 1–8, 10, 15, 16 — аралбаевская метаформация; 9, 11–14 — якуповская метаформация. Химические анализы выполнены в химлаборатории Института геологии БФАН СССР З.В. Евдокимовой, спектральные — в спектральной лаборатории К.Т. Вильдановой.

*Notes:* Samples 1–8, 10, 15, 16 – Aralbaev meta-formation; 9, 11–14 – Yakupov meta-formation. Chemical analyzes were performed in the chemical laboratory of the Institute of Geology, BFAN USSR Z.V. Evdokimova, spectral – in the spectral laboratory of K.T. Vildanova.

мочные частицы терригенного или вулканогенного материала основных пород, что хорошо согласуется с наличием в максютовском комплексе горизонтов ортосланцев базитового состава. К этому необходимо добавить обогащенность ванадиеносных графитистых сланцев надкларковыми количествами молибдена, марганца, серебра, золота. В будущем эти отложения могли быть регенерированы и служить дополнительным источником металлов для объектов, связанных с тектоно-магматической активизацией региона.

В южной части зоны Уралтау от верховьев р. Сакмары на севере до р. Губерля на юге слюдисто-графито-кварцевые сланцы и графитистые кварциты кайраклинской и карамалинской свит содержат многочисленные фосфатопроявления с концентрациями P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> от 0.5 до 17% [Аксенов и др., 1979]. Основной носитель фосфора — тонкодисперсные и скрытокристаллические выделения апатита в графит-слюдистой массе, а также сферические обособления апатита, первоначально представлявшие, по-видимому, кремнисто-углеродистые осадочные конкреции. Седиментационная природа фосфатных проявлений подчеркивается пластовой формой их залегания, а также стратифицированностью и выдержанностью на большой площади. Подобные фосфатопроявления ранее были отмечены в еремкинской толще в пределах Кочкарской площади Восточно-Уральского поднятия, а также Никольского участка Арамильско-Сухтелинской зоны [Сначёв, Муркин, 1989; Сначёв и др., 2015].

**Благородные металлы.** Золото и элементы группы платины относятся к числу наиболее изученных элементов-примесей черных сланцев. Кларковые содержания золота в углеродистых отложениях мира, оценены разными способами, составляет 0.008–0.01 г/т [Юдович, Кетрис, 1994], аномальными можно считать содержания в 20–35 мг/т, сильной аномалией — 35–50 мг/т, рудогенной аномалией — >50 мг/т. Основным минералом – концентратором золота в породах черносланцевых толщ является пирит [Арифулов и др., 2006]. По данным Я.Э. Юдовича, М.П. Кетрис [1986] существует два предварительных признака возможной платиноносности черных сланцев — аномалии по никелю и молибдену. Проведенное нами изучение углеродистых отложений на W и Mo (8 проб) в АСИЦ ВИМС (рентгеноспектральный флуоресцентный метод) показало наличие в них вольфрама и молибдена в пределах кларка, соответственно 1.0–1.7 и 1.1–1.4 г/т, что не позволяет надеяться на выявление в них платиноидов. Так оно и получилось.

В ходе проведения геологосъемочных работ нами особое внимание уделялось тектонически проработанным зонам, в пределах которых углеродистые сланцы и кварциты были интенсивно окварцованы и сульфидизированы, широко развиты процессы окисления с развитием бурожелезняковых кор выветривания по ним. Определения золота, серебра, платины, палладия, родия, иридия, осмия, рутения были выполнены химико-спектральным методом, а также для проверки полученных результатов было выполнено 5 проб нейтронно-активационным методом углеродистых сланцев только на золото (нижний предел обнаружения — 0.01 г/т) (табл. 2).

Результаты количественных определений благородных металлов в углеродистых сланцах и кварцитах максютовского комплекса довольно скромные. Все значения элементов группы платины находятся ниже предела чувствительности метода и не представляют интереса для дальнейшей интерпретации. Определенные перспективы на поисковые работы можно связывать лишь с золотом, содержания которого в проанализированных пробах находятся в основном в пределах 10-44 мг/т, т.е. аномалии и сильной аномалии. Лишь одна проба (№ 2502/1), отобранная в аралбаевской метаформации в верховьях р. Карамалы близ пос. Вознесенский, показала значение золота в 240 мг/т, что соответствует рудогенной аномалии и указывает на определенные перспективы

### Таблица 2

## Результаты количественных определений благородных металлов в углеродистых сланцах и кварцитах максютовского комплекса

### Table 2

The results of quantitative determinations of noble metals in carbonaceous shales and quartzites of the Maksyutovo complex

№№ п/п	№№ зак.	Os г/т	Ru г/т	Аи г/т	Ад г/т	Рt г/т	Рd г/т	Rh г/т	Yr г/т
1	2502/1	< 0.004	< 0.004	0.24	0.10	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002
2	2515	< 0.004	< 0.004	0.044	< 0.01	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002
3	2502/2	< 0.004	< 0.004	0.010	0.02	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002
4	2504/1	< 0.004	< 0.004	0.016	< 0.01	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002
5	2505	< 0.004	< 0.004	0.028	0.13	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002
6	2506	< 0.004	< 0.004	0.016	0.20	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002
7	2501/1	< 0.004	< 0.004	0.022	< 0.01	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002
8	2501	< 0.004	< 0.004	0.026	0.14	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002
9	2517/1	< 0.004	< 0.004	0.024	0.06	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002
10	2510	< 0.004	< 0.004	0.016	< 0.01	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002
11	2504	< 0.004	< 0.004	0.016	0.08	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002
12	2509	< 0.004	< 0.004	0.012	0.15	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002
13	2511	< 0.004	< 0.004	0.022	0.04	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002
14	2516	< 0.004	< 0.004	0.032	0.10	< 0.05	< 0.05	< 0.02	0.003
15	2530	< 0.004	< 0.004	0.022	0.11	< 0.05	< 0.05	< 0.02	< 0.002

*Примечания:* анализы выполнены в ИГЕМ (г. Москва, лаборатория В.В. Дистлера) химико-спектральным методом с предварительным концентрированием на органическом полимерном сорбенте «Полиоргс-4». Нижние пределы количественных определений Os, Ru — 0.004 г/т; Au, Ag — 0.01 г/т; Pt, Pd — 0.05 г/т; Rh — 0.02 г/т; Ir — 0.002 г/т.

*Notes:* the analyzes were carried out in IGEM (Moscow, laboratory of V.V. Distler) by chemical-spectral method with preliminary concentration on the organic polymer sorbent "Poliorgs-4". The lower limits of quantitative determinations Os, Ru - 0.004 g/t; Au, Ag - 0.01 g/t; Pt, Pd - 0.05 g/t; Rh - 0.02 g/t; Ir - 0.002 g/t.



## Рис. 4. Геологическое строение и разрез Южно-Юлукского участка (по А.А. Захарову, Л.С. Быковой [2003ф], с упрощениями авторов)

Условные обозначения: 1 — суванякский комплекс, уткальская серия, рябчиковая и кварцитовая метаформации объединенные (метаморфо-метасоматические образования по вулканогенно-терригенным толщам); 2—3 — карамалинская серия: 2 — баракальская метаформация (слюдисто-кварцевые, графит-слюдисто-кварцевые, хлорит-полевошпатовые сланцы), 3 — аралбаевская метаформация (хлорит-полевошпатовые, слюдисто-кварцевые, графит-слюдисто-кварцевые сланцы и кварциты, линзы мраморизованых известняков); 4 — юлукский комплекс (габбро-долериты и продукты их метаморфо-метасоматических преобразований); 5 — ташлинский комплекс (серпентиниты нерасчлененные и продукты их метаморфо-метасоматических преобразований); 6 — линия геологического разреза; 7 — сплошная и прожилково-вкрапленная халькопирит-пиритовая руда; 8 — точка отбора пробы на промывку; 9 — населенные пункты.

## Fig. 4. Geological structure and section of the South Yuluk area (according to A.A. Zakharov, L.S. Bykova [2003f], with the simplifications of the authors)

*Legend*: 1 — Suvanyak complex, Utkal series, greywacke and quartzite metaformations combined (metamorpho-metasomatic formations on volcanogenic-terrigenous strata); 2-3 — Karamaly series: 2 — Barakal meta-formation (mica-quartz, graphite-mica-quartz, and quartz stone, chlorite-feldspar shale), 3 — Aralbaev meta-formation (chlorite-feldspar, mica-quartz, graphite-mica-quartz schists and quartzites, lenses of marbled limestone); 4 — Yuluk complex (gabbro-dolerites and products of their metamorpho-metasomatic transformations); 5 — Tashly complex (serpentinites undifferentiated and the products of their metamorpho-metasomatic transformations); 6 — line of geological section; 7 — solid and vein-interspersed chalcopyrite-pyrite ore; 8 — the point of sampling for washing; 9 — settlements.

рассматриваемых отложений на поиски в них золота.

Определенный интерес для понимания рудоносности углеродистых отложений Уралтауской мегазоны представляет рассмотрение небольших месторождений сульфидных руд, объединяемых в Юлукскую группу (Юлук, Гумерово, расположенных соответственно в 5 км к югу от д. Юлук и в 1 км к востоку от д. Юлдыбаево, см. рис. 1, 4).

Геологическая позиция и состав оруденения этих объектов подробно изучены в результате геологосъемочных работ последних лет [Захарова, Захаров, 1994; Захаров, Быкова, 2003ф]. Анализ полученных материалов позволяет нам, вслед за другими исследователями, относить Юлукскую

Геологический вестник. 2019. №1

группу месторождений к единой полиметальнопирротиновой формации. Вмещающими породами для рудных тел служат графитистые кварциты и габброиды, метаморфизованные в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма. Парапороды содержат вкрапленность пирита и рассеянное органическое вещество, что создавало восстановительную среду, способствующую сульфидоотложению. В частности с буферирующими свойствами черных сланцев можно связывать образование пирротина в сульфидных рудах. Рудные тела полиметальнопирротиновой формации характеризуются жилообразной и линзовидной формой и окружены штокверковым и вкрапленным ореолом. Они сложены преимущественно массивными, полосчатыми и вкрапленными рудами. Для рудных тел характерен отчетливый контроль разрывными нарушениями как в региональном, так и в локальном плане. На региональном уровне контроль сульфидной минерализации осуществляется крупными продольными разломами — надвигами (Янтышевско-Юлукским, ГУР и другими, см. рис. 1), которые вероятно являлись отражением расколов фундамента в допалеозойском складчатом этаже. На локальном уровне рудные тела контролируются зонами рассланцевания, полостями отслоения, син- и постскладчатыми сколовыми зонами и секущими разрывами (см. рис. 4).

Из кор выветривания, развитых по углеродистым породам, были отмыты несколько мелких золотин размером до 0.2 мм (рис. 5), микрозондовый анализ которых показал отсутствие зональности, выдержанный состав, незначительную примесь ртути и среднюю пробность 750 (табл. 3).

Анализ штуфных проб сульфидизированных углеродистых сланцев, отобранных на рудных объектах Юлук и Гумерово, показал довольно высокие и стабильные значения золота в пределах 0.56— 0.85 г/т, что указывает на хорошие перспективы указанных месторождений при дальнейшей их оценке на золото.

Исходя из общего строения структурно-вещественных комплексов и их геохимической специализации, можно допустить, что рудоносность углеродистых формаций зоны Уралтау определялась двумя металлогеническими этапами.

Для первого из них характерно преобладание седиментационных процессов при подчиненной роли магматизма. В углеродистых осадках накапливались в надкларковых количествах ванадий, уран, фосфор, золото и молибден, образуя обогащенные послойные минеральные зоны, локализованные на различных уровнях разреза максютовского комплекса.

Второй этап охватывал период постседиментационной активизации региона, сопровождающийся заложением крупных долгоживущих разрывных нарушений, контролировавших пути миграции, перераспределение и мобилизацию рудного вещества с возможным образованием гидротермальноосадочного и гидротермально-метасоматического оруденения. Подобные структуры являются весьма благоприятными для локализации жильной и жильно-штокверковой золоторудной минерализации [Арифулов и др., 2006; Коротеев и др., 2009; Знаменский, Знаменская, 2011; Сазонов и др., 2011; Иванов, 2017]. Поисковые работы на таких участках следует ориентировать одновременно на



Рис. 5 Фотографии и точки опробования самородного золота из кор выветривания по углеродистым сланцам максютовского комплекса

*Примечание:* снимки получены в обратно-рассеянных электронах на растровом электронном микроскопе Tescan Vega 3 SBH в ИПСМ РАН (Уфа).

## Fig. 5 Photographs and sampling points of native gold from weathering crusts on carbonaceous shale of the Maksyutovo complex

*Note:* The images were taken in backscattered electrons on a Tescan Vega 3 SBH scanning electron microscope at the IPSM RAS (Ufa).

## Результаты микрозондового анализа золотин из кор выветривания по углеродистым сланцам максютовского комплекса (в %)

Table 3

Таблица 3

## The results of the microprobe analysis of gold from the weathering crust of carbonaceous shale of the Maksyutovo complex (in %)

№ п/п	№ анализа	Au	Ag	Hg	Сумма	Пробность
1	16	70.37	28.26	1.31	99.94	714
2	17	65.38	27.70	0.96	94.04	702
3	24	75.99	23.55	0.83	100.37	763
4	25	75.96	22.90	0.35	99.21	768
5	65	78.18	21.82	—	100.00	782
6	66	78.89	21.11	_	100.00	789

*Примечания:* анализ выполнен в Лаборатории физических методов исследования минералов МГУ, на микрозонде «CAMEBAX SX50» фирмы «CAMECA» с применением эталонов (аналитик И.А. Брызгалов). Точность метода исследования в пределах ±0.01%, условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 30 нА. Прочерк — элемент не определялся.

*Notes:* the analysis was performed in the laboratory of "Physical Methods for the Study of Minerals" of the Moscow State University, on the CAMEBAX SX50 microprobe of the CAMECA company using standards (analyst I.A. Bryzgalov). The accuracy of the research method is within  $\pm 0.01\%$ , the analysis conditions: an accelerating voltage of 20 kV, a probe current of 30 nA. Dash — the item was not determined.

обнаружение как стратиформных, так и секущих рудных тел золото(платино)-сульфидного и золото-кварцевого генетических типов. Там же, где углеродисто-сульфидные толщи пространственно ассоциируют с магматическими породами (габброидами, гранитоидами), наследующими зоны глубинных разломов, с ними связана сульфидно-кварцево-жильная минерализация с повышенными содержаниями палладия, вольфрама и молибдена.

### Список литературы:

Аксенов Е.М., Волков Б.И., Евлентьев И.В. Метаморфизм докембрийских вулканогенно-кремнистых комплексов Урала и их фосфатоносность // Метаморфогенное рудообразование. – Апатиты, 1979. – С. 44–45.

Алексеев А.А. О распространенности ванадия в осадочно-метаморфических породах зоны Уралтау // Минералого-геохимические особенности колчеданных месторождений, вулканогенных и осадочных образований Южного Урала. – Уфа: БФАН СССР, 1978. – С. 56–59.

Арифулов Ч.Х., Плугин Д.В., Чернояров В.Г., Овсянников М.П., Арсентьева И.В., Щербакова А.В. Золоторудные месторождения «черносланцевого» типа на Южном Урале и закономерности их размещения // Отечественная геология. – 2006. – № 4. – С. 13–22.

Захаров О.А., Мавринская Т.М. Новые палеонтологические данные о возрасте субстрата метаморфитов Уралтау // Ежегодник–1993/ИГ УНЦ РАН.–Уфа, 1994.–С. 19–20.

Захаров О.А., Пучков В.Н. О тектонической природе максютовского комплекса зоны Уралтау: Препр. / РАН. Уфимский науч. центр. Ин-т геологии. – Уфа, 1994. – 29 с.

Захаров О.А., Пучков В.Н., Маслов В.А., Артюшкова О.В., Нурмухаметов Э.М. Первая находка палеозойской

Геологический вестник. 2019. №1

фауны в «рифейских» образованиях кайраклинской свиты максютовского комплекса // Общие проблемы стратиграфии и геологической истории рифея Северной Евразии. – Екатеринбург: УрО РАН, 1995. – С. 32.

Захарова А.А., Захаров О.А. Условия формирования сульфидного оруденения в метаморфитах зоны Уралтау на Южном Урале: Препр. / РАН. Уфимский науч. центр. Ин-т геологии. — Уфа, 1994. — 38 с.

Знаменский С.Е., Знаменская Н.М. Рудовмещающие транстенсивные дуплексы золото-кварцевых и золотосульфидно-кварцевых месторождений Южного Урала // Литосфера. – 2011. – № 1. – С. 94–105.

Иванов А.И. Роль метаморфических условий преобразования углеродистых карбонатно-терригенных отложений для формирования золотого оруденения на разных этапах коллизионной эпохи развития Байкало-Патомской металлогенической провинции // Отечественная геология. — 2017. – № 4. – С. 3–23.

Князев Ю.Г., Князева О.Ю., Сначёв В.И., Жданов А.В., Каримов Т.Р., Айдаров Э.М., Масагутов Р.Х., Арсланова Э.Р. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М 1:1000000 (3-е поколение). Сер. Уральская. Лист N40-Уфа: Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. – 512 с.

Ковалев С.Г., Тимофеева Е.А. Первые данные по геохимии и изотопии углерода графитовых эклогитов максютовского комплекса (Южный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2013. – № 3. – С. 8–11.

Ковалев С.Г., Тимофеева В.А., Пиндюрина Е.О. Геохимия эклогитов максютовского комплекса (Южный Урал) и генетическая природа их протолитов // Геохимия. – 2015. – № 4. – С. 299–327. – DOI: https://doi.org/10.7868/ s0016752515040044.

Ковалев С.Г., Тимофеева Е.А., Пиндюрина Е.О., Ковалев С.С. Геохимия и условия образования эклогитов максютовского комплекса // Геологический сборник № 9 / ИГ УНЦ РАН. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2011. – С. 236–245.

Козлов В.И., Пацков А.А. О тектонической природе максютовского комплекса зоны Уралтау // Тектоника и магматизм Южного Урала. – М.: Наука, 1974. – С. 121–129.

Коротеев В.А., Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Поленов Ю.А. Шовные зоны Урала как интегральные перспективные рудоносные структуры // Геология рудных месторождений. – 2009. – № 2. – С. 107–124.

Криницкий Д.Д., Криницкая В.М. Об открытии на юге Башкирии силурийских отложений среди древних толщ западного склона хребта Урал-Тау // Материалы по геологии и полезным ископаемым Южного Урала. Вып. 4. – М.: Недра, 1965. – С. 37–39.

Нечеухин В.М., Берлянд Н.Г., Пучков В.Н., Соколов В.Б. Глубинное строение, тектоника, металлогения Урала. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. – 106 с.

Ожиганов Д.Г. Геология хребта Уралтау и района перидотитового массива Ю. Крака – М: Госгеолиздат, 1941. – 103 с. – (Труды БТГУ; Вып. 12).

*Пучков В.Н.* Новые данные по геологии Урал-Тау и проблема их геодинамической интерпретации // Ежегодник–1993 / ИГ УНЦ РАН. – Уфа, 1994. – С. 55–63.

*Пучков В.Н.* Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. – Уфа: Даурия, 2000. – 146 с.

*Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). — Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. — 280 с.

Родионов В.Ю., Радченко В.В. О стратиграфии палеозойских отложений восточного крыла Зилаирского синклинория // Биостратиграфия девона и карбона Урала. – Уфа: БНЦ УрО АН СССР, 1988. – С. 15–22.

Сазонов В.Н., Коротеев В.А., Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Великанов А.Я. Золото в «черных сланцах» Урала // Литосфера. – 2011. – № 4. – С. 70–92.

*Сначёв В.И., Муркин В.П.* Новые данные по магматизму, метаморфизму и металлогении Кочкарской площади (Южный Урал): Препр. / РАН. Уфимский науч. центр. Ин-т геологии – Уфа, 1989. – 23 с.

Сначёв А.В., Сначёв В.И., Романовская М.А. Геология, петрогеохимия и рудоносность углеродистых отложений Ларинского купола (Южный Урал) // Вестник Московского университета. Сер. 4: Геология. – 2015. – № 2. – С. 58–67. – doi.org/10.3103/s014587521502009х.

*Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Химическая классификация осадочных горных пород. – Сыктывкар: Коми ФАН СССР, 1986. – 34 с. (Сер. препр. «Науч. докл.»; Вып. 148).

*Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Элементы-примеси в черных сланцах. – Екатеринбург: УИФ Наука, 1994. – 304 с.

*Leech M.L., Ernst W.G.* Graphite pseudomorphs after diamond? A carbon isotope and spectroscopic study of graphite cuboids from the Maksyutov Complex, south Ural Mountains, Russia // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1998. – V. 62. – P. 2143–2154. – https://doi.org/10.1016/s0016-7037(98)00142-2.

Leech M.L., Ernst W.G. Petrotectonic evolution of the high to ultrahigh-pressure Maksyutov Complex, Karayanova

area, south Ural Mountains: structural and oxygen isotope constraints // Lithos. - 2000. - V. 52. - P. 235-253. - https://doi.org/10.1016/s0024-4937(99)00093-6.

### **References:**

Aksenov E.M., Volkov B.I., Evlent'ev I.V. Metamorfizm dokembriiskikh vulkanogenno-kremnistykh kompleksov Urala i ikh fosfatonosnost' [Metamorphism of Precambrian volcanogenic-siliceous complexes of the Urals and their phosphate bearing] // Metamorfogennoe rudoobrazovanie [Metamorphogenic ore formation]. Apatity, 1979. P. 44–45 (In Russian).

Alekseev A.A. O rasprostranennosti vanadiya v osadochnometamorficheskikh porodakh zony Uraltau [On the prevalence of vanadium in sedimentary-metamorphic rocks of the Uraltau zone] // Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti kolchedannykh mestorozhdenii, vulkanogennykh i osadochnykh obrazovanii Yuzhnogo Urala [Mineralogical and geochemical features of a pyrite deposit, volcanogenic and sedimentary formations of the Southern Urals]. Ufa: BFAN SSSR, 1978. P. 56–59 (In Russian).

Arifulov Ch.Kh., Plugin D.V., Chernoyarov V.G., Ovsyannikov M.P., Arsent'eva I.V., Shcherbakova A.V. Zolotorudnye mestorozhdeniya "chernoslantsevogo" tipa na Yuzhnom Urale i zakonomernosti ikh razmeshcheniya [Gold-ore deposits of "black shale" type in the South Urals and the patterns of their location] // Otechestvennaya geologiya. 2006. № 4. P. 13–22 (In Russian).

*Ivanov A.I.* Rol' metamorficheskikh uslovii preobrazovaniya uglerodistykh karbonatno-terrigennykh otlozhenii dlya formirovaniya zolotogo orudeneniya na raznykh etapakh kollizionnoi epokhi razvitiya Baikalo-Patomskoi metallogenicheskoi provintsii [The role of metamorphic conditions for the conversion of carbonaceous carbonate-terrigenous deposits for the formation of gold mineralization at different stages of the collisional era of the Baikal-Patom metallogenic province] // Otechestvennaya geologiya. 2017.  $\mathbb{N}$  4. P. 3–23 (In Russian).

Knyazev Yu.G., Knyazeva O.Yu., Snachev V.I., Zhdanov A.V., Karimov T.R., Aidarov E.M., Masagutov R.Kh., Arslanova E.R. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. M 1:1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Ural'skaya. List N40-Ufa: Ob"yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Ural series. Sheet N40-Ufa]. SPb.: VSEGEI, 2013. 512 p. (In Russian).

Koroteev V.A., Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A. Shovnye zony Urala kak integral'nye perspektivnye rudonosnye struktury [Ural suture zones as integral promising ore-bearing structures] // Geologiya rudnykh mestorozhdenii. 2009.  $\mathbb{N}$  2. P. 107–124 (In Russian).

Kovalev S.G., Timofeeva E.A. Pervye dannye po geokhimii i izotopii ugleroda grafitovykh eklogitov maksyutovskogo kompleksa (Yuzhnyi Ural) [The first data on geochemistry and carbon isotopy of graphite eclogites of the Maksyutovo complex (Southern Urals)] // Vestnik IG Komi NTs UrO RAN. 2013.  $\mathbb{N}^{\circ}$  3. P. 8–11 (In Russian).

Kovalev S.G., Timofeeva V.A., Pindyurina E.O. Geokhimiya eklogitov maksyutovskogo kompleksa (Yuzhnyi Ural) i geneticheskaya priroda ikh protolitov [Geochemistry of the eclogites

of the Maksyutovo complex, Southern Urals, and genetic nature of their protoliths] // Geokhimiya. 2015. № 4. P. 299–327. doi. org/10.7868/s0016752515040044. (In Russian).

Kovalev S.G., Timofeeva E.A., Pindyurina E.O., Kovalev S.S. Geokhimiya i usloviya obrazovaniya eklogitov maksyutovskogo kompleksa [Geochemistry and conditions for the formation of eclogites of the Maksyutovo complex] // Geologicheskii sbornik  $\mathbb{N}$ 9 / IG USC RAS. – Ufa: DizainPoligrafServis, 2011. P. 236–245 (In Russian).

*Kozlov V.I., Patskov A.A.* O tektonicheskoi prirode maksyutovskogo kompleksa zony Uraltau [On the tectonic nature of the Maksyutovo complex of the Uraltau zone] // Tektonika i magmatizm Yuzhnogo Urala [Tectonics and Magmatism of the Southern Urals]. M.: Nauka, 1974. P. 121–129 (In Russian).

*Krinitskii D.D., Krinitskaya V.M.* Ob otkrytii na yuge Bashkirii siluriiskikh otlozhenii sredi drevnikh tolshch zapadnogo sklona khrebta Ural-Tau [On the discovery in the south of Bashkiria of Silurian deposits among the ancient strata of the western slope of the UralTau ridge] // Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Yuzhnogo Urala [Materials on geology and minerals of the Southern Urals]. Is. 4. M.: Nedra, 1965. P. 37–39 (In Russian).

*Leech M.L., Ernst W.G.* Graphite pseudomorphs after diamond? A carbon isotope and spectroscopic study of graphite cuboids from the Maksyutov Complex, south Ural Mountains, Russia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1998. V. 62. P. 2143–2154. doi.org/10.1016/s0016-7037(98)00142-2.

*Leech M.L., Ernst W.G.* Petrotectonic evolution of the high to ultrahigh-pressure Maksyutov Complex, Karayanova area, south Ural Mountains: structural and oxygen isotope constraints // Lithos. 2000. V. 52. P. 235–253. doi.org/10.1016/ s0024-4937(99)00093-6.

Necheukhin V.M., Berlyand N.G., Puchkov V.N., Sokolov V.B. Glubinnoe stroenie, tektonika, metallogeniya Urala [Deep structure, tectonics, metallogeny of the Urals]. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1986. 106 p. (In Russian).

*Ozhiganov D.G.* Geologiya khrebta Uraltau i raiona peridotitovogo massiva Yu. Kraka [Geology of the Uraltau Ridge and the Peridotite Array of the Southern Kraka] // Moscow: Gosgeolizdat, 1941. 103 p. (Trudy BTGU; Is. 12). (In Russian).

*Puchkov V.N.* Novye dannye po geologii Ural-Tau i problema ikh geodinamicheskoi interpretatsii [New data on the geology of Ural-Tau and the problem of their geodynamic interpretation] // Ezhegodnik–1993 / IG USC RAS. Ufa, 1994. P. 55–63 (In Russian).

*Puchkov V.N.* Paleogeodinamika Yuzhnogo i Srednego Urala [Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals]. Ufa: Dauriya, 2000. 146 p. (In Russian).

*Puchkov V.N.* Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and Urals (current issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa: DizainPoligrafServis, 2010. 280 p. (In Russian).

Rodionov V.Yu., Radchenko V.V. O stratigrafii paleozoiskikh otlozhenii vostochnogo kryla Zilairskogo sinklinoriya [On the stratigraphy of Paleozoic deposits of the eastern wing of the Zilair synclinorium] // Biostratigrafiya devona i karbona Urala [Biostratigraphy of the Devonian and Carboniferous of the Urals]. Ufa: BSC UrO AS USSR, 1988. P. 15–22 (In Russian).

Sazonov V.N., Koroteev V.A., Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Velikanov A.Ya. Zoloto v «chernykh slantsakh» Urala [Gold in the Black Shale of the Urals] // Litosfera. 2011. № 4. P. 70–92 (In Russian).

Snachev V.I., Murkin V.P. Novye dannye po magmatizmu, metamorfizmu i metallogenii Kochkarskoi ploshchadi (Yuzhnyi Ural) [New data on magmatism, metamorphism and metallogeny of Kochkarskaya area (Southern Urals)]: Preprint. Ufa, 1989. 23 p. (In Russian).

Snachev A.V., Snachev V.I., Romanovskaya M.A. Geologiya, petrogeokhimiya i rudonosnost' uglerodistykh otlozhenii Larinskogo kupola (Yuzhnyi Ural) [Geology, petrogeochemistry and ore-bearing carbonaceous deposits of the Larinsky dome (South Urals)] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4: Geologiya. 2015. No. 2. P. 58–67. doi.org/10.3103/ s014587521502009x. (In Russian).

*Yudovich Ya.E., Ketris M.P.* Khimicheskaya klassifikatsiya osadochnykh gornykh porod [Chemical classification of sedimentary rocks]. Syktyvkar: Komi fil. AS USSR, 1986. 34 p. (Ser. prepr. "Nauch. dokl."; Is. 148). (In Russian).

*Yudovich Ya.E., Ketris M.P.* Elementy-primesi v chernykh slantsakh [Impurity elements in black shales]. Ekaterinburg: UIF «Nauka», 1994. 304 p. (In Russian).

Zakharov O.A., Mavrinskaya T.M. Novye paleontologicheskie dannye o vozraste substrata metamorfitov Uraltau [New paleontological data on the age of the metamorphic substrate Uraltau] // Ezhegodnik–1993 / IG USC RAS. Ufa, 1994. P. 19–20 (In Russian).

Zakharov O.A., Puchkov V.N. O tektonicheskoi prirode maksyutovskogo kompleksa zony Uraltau [On the tectonic nature of the Maksyutovo complex of the Uraltau zone]: Preprint. Ufa, 1994. 29 p. (In Russian).

Zakharov O.A., Puchkov V.N., Maslov V.A., Artyushkova O.V., Nurmukhametov E.M. Pervaya nakhodka paleozoiskoi fauny v «rifeiskikh» obrazovaniyakh kairaklinskoi svity maksyutovskogo kompleksa [The first find of the Paleozoic fauna in the "Riphean" formations of the Kairaklinsk Formation of the Maksyutovo complex] // Obshchie problemy stratigrafii i geologicheskoi istorii rifeya Severnoi Evrazii [Common problems of stratigraphy and geological history of Riphean of Northern Eurasia]. Ekaterinburg: UrO RAS, 1995. P. 32. (In Russian).

Zakharova A.A., Zakharov O.A. Usloviya formirovaniya sul'fidnogo orudeneniya v metamorfitakh zony Uraltau na Yuzhnom Urale [Conditions for the formation of sulfide mineralization in the metamorphic Uraltau zone in the southern Urals]: Preprint. Ufa, 1994. 38 p. (In Russian).

Znamenskii S.E., Znamenskaya N.M. Rudovmeshchayushchie transtensivnye dupleksy zoloto-kvartsevykh i zolotosul'fidno-kvartsevykh mestorozhdenii Yuzhnogo Urala [Orecontaining transtensive duplexes of gold-quartz and gold-sulphide-quartz deposits of the Southern Urals] // Litosfera. 2011. № 1. P. 94–105 (In Russian).

### Сведения об авторах:

Сначёв Александр Владимирович, канд. геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: SAVant@rambler.ru

Нугуманова Язгуль Наилевна, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: jazgul-ice@ yandex.ru

Савельев Дмитрий Евгеньевич, д-р геол.-мин. наук, проф. АНРБ, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: savl71@mail.ru

#### About the authors:

**Snachev** Akexander Vladimirovich, candidate of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: SAVant@rambler.ru

**Nugumanova Yazgul Nailevna,** Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: jazgul-ice@yandex.ru

**Saveliev Dmitry Evgenievich,** doctor of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: savl71@mail.ru

УДК 550.41

DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-5

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНИТОИДОВ ЕЛАНЧИКОВСКОГО МАССИВА И ИХ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ

### © 2019 г. В.И. Сначёв

Реферат. В статье приводится описание геологического строения Еланчиковского мигматит-гнейсогранитного массива, расположенного в южной части Ильменогорско-Сысертского блока. Сложен он гранитоидами, образование которых происходило в два этапа: в первый сформировались мигматиты и гнейсограниты, а во второй — биотитовые, мусковитовые и двуслюдяные граниты. Массив залегает среди метаморфических пород еланчиковской и кыштымской толщ в районе оз. Бол. Еланчик.

На основе изучения гранат-биотитового парагенезиса, всесторонне исследованного экспериментально и широко представленного в гранитоидах Еланчиковского массива, получены температуры образования гнейсогранитов (530–550°С) и огнейсованных биотитовых гранитов (540–560°С), а также приблизительно оценена глубина формирования пород, соответствующая приповерхностной или гипабиссальной зонам (первые километры). Полученные данные по физико-химическим условиям становления пород массива позволили сделать вывод об их метасоматической природе и исключить магматический генезис.

Практически все анализы гранитоидов 1 и 2 этапов формирования Еланчиковского массива (мигматиты, гнейсограниты, биотитовые, двуслюдяные и мусковитовые граниты) укладываются в главный известково-щелочной тренд (СА) и располагаются в пределах либо известково-щелочного, либо субщелочного полей. Мигматиты и гнейсограниты первого этапа становления массива тяготеют к вольфрам-молибденовому (W-Mo) и молибденовому (Mo-Cu) металлогеническим трендам. Наибольший интерес на вольфрамовое оруденение представляют мигматиты, а на молибденовое — гнейсограниты. Двуслюдяные граниты второго этапа не образуют отчетливого тренда и их металлогеническая специализация не определена. Все анализы биотитовых и мусковитовых гранитов также имеют W-Mo металлогеническую специализацию.

**Ключевые слова:** Еланчиковский массив, граниты, мигматиты, гнейсограниты, биотит-гранатовый термометр, металлогеническая специализация

### PHYSICAL AND CHEMICAL CONDITIONS OF THE FORMATION OF GRANITOIDS OF YELANCHIK MASSIF AND THEIR METALLOGENIC SPECIALIZATION

### V.I. Snachev

**Abstract.** The article describes the geological structure of the Yelanchik migmatite-gneissogranite massif located in the southern part of the Ilmenogorsk-Sysertsky block. It is composed of granitoids, the formation of which took place in two stages: in the first of them migmatites and gneiss-granites were formed, and in the second — biotite, muscovite and bi-mica granites. The massif lies among the metamorphic rocks of the Yelanchik and Kyshtym strata in the area of the lake Big Yelanchik.

Based on the study of garnet-biotite paragenesis, comprehensively studied experimentally and widely represented in the granitoids of the Yelanchik massif, the formation temperatures of gneiss-granite (530-550 °C) and gneiss-biotite granites (540-560 °C) were obtained, as well as the formation depth of rocks, corresponding to the near-surface or hypabyssal zones (first kilometers). The obtained data on the physicochemical conditions of formation of rocks of the massif made it possible to conclude that they are metasomatic in nature and exclude the magmatic genesis.

**For citation:** Snachev V.I. Physical and chemical conditions of the formation of granitoids of Yelanchik massif and their metallogenic specialization // Geologicheskii vestnik. 2019. No. 1. P. 68–76. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-5.

Для цитирования: Сначёв В.И. Физико-химические условия формирования гранитоидов Еланчиковского массива и их металлогеническая специализация // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 68–76. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-5.

Practically all analyzes of granitoids of the 1 and 2 stages of the formation of the Yelanchik massif (migmatites, gneiss-granites, biotite, bi-mica and muscovite granites) fit into the main calc-alkaline trend (CA) and are located within either calc-alkaline or subalkaline fields. Migmatites and gneiss-granites of the first stage of formation of the massif to the tungsten-molybdenum (W-Mo) and molybdenum (Mo-Cu) metallogenic trends. Of the greatest interest on tungsten mineralization are migmatites, and on molybdenum — gneiss-granites. The bi-mica granites of the second stage do not form a distinct trend and their metallogenic specialization is not defined. All analyzes of biotite and muscovite granites also show W-Mo metallogenic specialization.

Keywords: Yelanchik massif, granites, migmatites, gneiss-granites, biotite-garnet thermometer, metallogenic specialization

Еланчиковский и Чашковский массивы входят в состав еланчиковского комплекса и расположены в южной части Ильменогорской зоны (рис. 1). Согласно геологосъемочным работам, проведенным в 1997-2001 гг. сотрудниками ОАО «Челябинскгеосъемка» (лист N-41-VII, Миасс, М 1:200000), петротипом комплекса является Еланчиковский массив, который в плане имеет форму неправильного овала и занимает площадь около 20 км<sup>2</sup> с выпуклым южным и вогнутым северным контактами. Он залегает среди образований еланчиковской и кыштымской толщ в районе оз. Большой Еланчик. В гранитоидах отмечаются ксенолиты плагиогнейсов и амфиболитов. Контакты его полого погружаются на юг. Мощность массива в северной части 100-300 м, в южной - 1.5 км. Массив сложен биотитовыми и биотит-мусковитовыми гранитами и лейкогранитами с гнейсовидной текстурой, в составе которых: плагиоклаз (№ 13–20), решетчатый микроклин, биотит, кварц, мусковит, гранат (альмандин – спессартин), апатит, циркон, ильменит, эпидот, магнетит. Жильные породы представлены пегматитами и аплитами. В пегматитах установлены следующие акцессорные минералы: ортит, спессартин, сфен, апатит, турмалин, флюорит, ильменит, самарскит, циркон.

По данным Г.Б. Ферштатера и др. [1994], еланчиковские гранитоиды резко отличаются от других кислых интрузий Ильменогорско-Сысертского блока высоким содержанием мусковита, специфическим химическим составом, развитием в ассоциации с мусковитом граната альмандин-спессартинового ряда, принадлежностью к высокоглиноземистой группе пород. Субстратом для гранитоидов Еланчиковского массива, по-видимому, были метапелиты. Его геохимические и петрографические особенности указывают на «терригенное происхождение массива».

В период 1996—2000 гг. в пределах Чашковско-Еланчиковского массива Б.Н. Пермяковым [2000] были проведены детальные работы, касающиеся петрологического изучения гранитоидов, стратиграфии южного замыкания Ильменогорского антиклинория, петро-геохимических особенностей пород, характера контактовых изменений вмещающих толщ, металлогенической специализации гранитоидов. В результате этих исследований были сделаны следующие важные выводы, среди которых: 1) Еланчиковский и Чашковский массивы представляют собой единое гранитоидное тело и фиксируют собой ядра гранитно-гнейсовых куполов; 2) становление Чашковско-Еланчиковского массива происходило в два этапа, первый из которых включает гранитизацию исходных метаморфических пород (амфиболитов, амфибол-биотитовых и биотитовых плагиогнейсов) с образованием линзовидно-полосчатых мигматитов и порфиробластовых гнейсогранитов, а второй — метасоматическое преобразование и локальное плавление гранитоидов первого этапа с образованием биотитовых, мусковитовых и двуслюдяных гнейсогранитов и гранитов; 3) в контактовой зоне гранитоидных массивов с вмещающими метаморфическими породами кроме мигматизации последних возникают переходные петрографические разновидности пород, образование которых обусловлено гранитизирующими растворами; 4) гранитоиды Чашковско-Еланчиковского массива относятся преимущественно к известково-щелочному и щелочному рядам; 5) петро-геохимические особенности гранитоидов и вмещающих их пород очень близки, что указывает на унаследованность химического состава первых от субстрата.

Перечисленные выше выводы, полученные Б.Н. Пермяковым [2000] по Чашковско-Еланчиковскому массиву, позволяют сопоставить его с гранитоидами Кочкарского антиклинория (Восточно-Уральское поднятие), где в 80-е годы прошлого столетия В.П. Муркиным и др. (ОАО «Челябинскгеосъемка») были проведены детальные работы, включающие геологическую съемку мас-



### Рис. 1. Геологическая карта Ильменогорско-Сысертского мегантиклинория и восточного его обрамления (составлена по материалам В.И. Петрова)

Условные обозначения: 1 — кулуевская толща (лавы и лавобрекчии базальтов, реже андезибазальтов); 2 — булатовская толща (сланцы углеродисто-кремнистые, углеродисто-глинисто-кремнистые); 3 — шеметовская толща (базальты, андезибазальты); 4 — кундравинская свита (метагравелиты, метапесчаники с прослоями мраморизованных известняков); 5 — игишская свита (кварциты графитистые, графитистые кварцито-сланцы); 6 — саитовская свита (плагиосланцы амфиболовые, гранат-биотит-амфиболовые); 7 — кыштымская толща (амфиболиты, гнейсы гранат-биотитовые); 8 — еланчиковская толща (гнейсы биотитовые, амфибол-биотитовые); 9 ильменогорская толща (амфиболиты, плагиогнейсы биотитовые); 10 — селянкинская свита (плагиогнейсы биотитовые, гранатбиотитовые); 11 — еланчиковский комплекс гранитовый; 12 — степнинский комплекс монцодиорит-граносиенит-гранитовый; 13 увильдинско-кисегачский комплекс монцодиорит-гранитовый; 16 — вишневогорско-ильменогорский комплекс карбонатит-миаскитовый; 17 — чебаркульско-казбаевский комплекс серпентинизированных дунитов, гарибургитов; 18 — чебаркульско-казбаевский комплекс комплекс комплекс габбровый; 19 — каганский комплекс метаморфизованных дунитов, гарибургитов; 18 — чебаркульско-казбаевский комплекс паббровый; 19 — каганский комплекс метаморфизованных дунитов и габброидов; 20 — контур Непряхинского рудного узла. *Римскими цифрами показаны зоны*: 1 — Вознесенско-Присакмарская и Западно-Магнитогорская, II — Ильменогорско-Сысертская, III — Уйско-Новооренбургская, 17 — Арамильско-Сухтелинская, V — Касаргино-Рефтинская. *Арабскими цифрами показаны гранитовине ранитовие* и западно-Магнитогорская, II — Ильменогорско-Сысертская, III — Уйско-Новоренбургская, 2 — Чашковский.

### Fig. 1. Geological map of the Ilmenogorsk-Sysertsky meganticlinorium and its eastern framing (based on the materials of V.I. Petrov)

*Legend*: 1 — Kuluyev stratum (basaltic lava and lavobreccias, rarely andesibasalts); 2 — Bulatov stratum (shale, carbonic-siliceous, carbonicclay-siliceous); 3 — Shemetov stratum (basalts, andesibasalts); 4 — Kundrava Formation (metagravelites, metasandstone with interlayers of marbled limestone); 5 — Igish Formation (graphitic quartzite, quartzite-graphitic schists); 6 — Saitov Formation (amphibole, garnet-biotiteamphibole plagioschists,); 7 — Kyshtym stratum (amphibolites, garnet-biotite gneisses); 8 — Yelanchikov stratum (biotite gneiss, amphibole-biotite gneiss); 9 — Ilmenogorsk stratum (amphibolites, biotite plagiogneiss); 10 — Selyankinsk Formation (biotite and garnet-biotite plagiogneiss); 11 — Yelanchik granite complex; 12 — Stepninsky monzodiorite-granosyenite-granoite complex; 13 — Uvildin-Kisegach monzodiorite-granosyenitegranite complex; 14 — Urazbaevskiy tonalite-plagiogranite complex; 15 — Neplyuev diorite-granoite, harzburgites; 18 — Chebarkul-Kazbayev gabbro complex; 19 — Kagan complex of metamorphosed ultramafics and gabbroids; 20 — contour of the Nepryakhin ore field. *Roman numerals show the zones*: I — Voznesensk-Prisakmar and Western Magnitogorsk, II — Ilmenogorsk-Sysertrsk, III — Uysko-Novoorenburgsk, IV — Aramilsk-Sukhtelinsk, V — Kasargi-Reftinsk. *Arabic numerals show granitoid massifs*: 1 — Yelanchik, 2 — Cheashkov.

штаба 1:50000 и большой объем колонкового бурения. В процессе проведенных геологосъемочных и научно-исследовательских работ [Сначёв, Муркин, 1989] были получены практически те же выводы, которые приводятся в монографии Б.Н. Пермякова [2000] по Чашковско-Еланчиковскому массиву. Ряд скважин, пробуренных по профилю от Еремкинского до Борисовского гнейсо-мигматитовых куполов (Кочкарский антиклинорий), показал наличие постепенного перехода между гранитоидами и вмещающими метаморфическими породами еремкинской толщи. Граница массивов была проведена по 50% доле в породе неосомы, что указывает на метасоматический генезис рассматриваемых гранитоидов.

С целью определения *P-T* условий образования гранитоидов Еланчиковского массива нами был использован биотит-гранатовый парагенезис, всесторонне изученный экспериментально [Перчук, Рябчиков, 1976; Термо- и барометрия..., 1977] и широко представленный как среди мигматитов и гнейсогранитов, так и биотитовых, мусковитовых и двуслюдяных гранитов. Составы минералов, отобранных из гнейсогранитов (обр. 766, табл. 1) и биотитовых гранитов (обр. 771), проанализированы И.А. Блиновым (ИМин УрО РАН, г. Миасс)

Таблица 1

71

## Химический состав биотита (*Bi*), граната (*Gr*) и мусковита (*Mu*) из гранитоидов Еланчиковского массива (мас. %)

Table 1

The chemical composition of biotite (*Bi*), garnet (*Gr*) and muscovite (*Mu*) from the granitoids of the Yelanchik massif (wt. %)

Минерал	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма	X <sup>Bi,Gr</sup> <sub>Mg</sub>
<i>Mu</i> -1	47.18	0.51	31.97	3.97	0	0	0.88	0.38	10.03	94.92	0.29
<i>Bi</i> -2	35.37	2.71	17.09	21.87	0.66	0	6.02	0.22	8.39	92.33	0.32
<i>Bi</i> -3	36.93	2.60	17.45	22.28	0.72	0	6.13	0	8.39	94.5	0.32
<i>Gr</i> -1	36.99	0	21.19	23.92	16.28	1.58	0.95	0	0	100.91	0.039
<i>Gr</i> -2	36.65	0	21.11	23.20	16.61	1.85	0.94	0	0	100.36	0.039
Gr-3	36.50	0	21.03	23.40	16.51	1.75	1.01	0	0	100.19	0.042
Bi-4	37.89	2.65	17.84	22.11	1.05	0	6.89	0.23	8.85	97.52	0.35
Bi-5	37.29	2.82	17.65	23.70	1.09	0	6.30	0.24	8.88	97.97	0.31
Bi-6	37.75	3.49	17.57	22.41	1.02	0	7.13	0	8.98	98.35	0.35
Gr-4	36.76	0	20.73	21.92	18.96	0.93	1.08	0	0	100.40	0.044
Gr-5	36.88	0	21.09	22.15	18.87	0.83	0.96	0	0	100.79	0.041
<i>Gr</i> -6	36.56	0	20.84	22.32	17.79	0.92	1.22	0	0	99.64	0.052

 $Mu-1 - (K_{0.85}Na_{0.05})_{0.90}(Mg_{0.09}Fe_{0.22}Ti_{0.03}Al_{1.66})_2(Si_{3.15}Al_{0.85})_4[O_{9.77}(OH)_{2.23}]_{12}$ 

 $Bi-2 - (K_{0.88}Na_{0.04})_{0.92}(Mg_{0.74}Fe_{1.50}Mn_{0.05}Ti_{0.17}Al_{0.55})_3(Si_{2.90}Al_{1.10})_4O_{10}[O_{0.73}(OH)_{1.27}]_2$ 

 $Bi-3 - K_{0.85}(Mg_{0.73}Fe_{1.48}Mn_{0.05}Ti_{0.16}Al_{0.59})_3(Si_{2.95}Al_{1.05})_4O_{10}[O_{0.73}(OH)_{1.27}]_2$ 

 $Gr-1 - (Ca_{0.14}Fe_{1.62}Mg_{0.11}Mn_{1.11})_{2.98}Al_{2.02}Si_{3}O_{12}$ 

 $\textit{Gr-2} - (Ca_{0.16}Fe_{1.58}Mg_{0.11}Mn_{1.14})_{3.00}Al_{2.00}(Si_{2.98}Al_{0.02})_{3}O_{12}$ 

 $Gr-3 - (Ca_{0.15}Fe_{1.59}Mg_{0.12}Mn_{1.14})_{3.00}Al_{2.00}(Si_{2.98}Al_{0.02})_{3}O_{12}$ 

 $\textit{Bi-4} - (K_{0.87}Na_{0.03})_{0.90}(Mg_{0.79}Fe_{1.43}Mn_{0.07}Ti_{0.15}Al_{0.55})_3(Si_{2.93}Al_{1.07})_4O_{10}[O_{0.66}(OH)_{1.34}]_2$ 

 $\textit{Bi-5} - (K_{0.88}Na_{0.04})_{0.92}(Mg_{0.73}Fe_{1.53}Mn_{0.07}Ti_{0.16}Al_{0.50})_3(Si_{2.89}Al_{1.11})_4O_{10}[O_{0.61}(OH)_{1.39}]_2$ 

 $\textit{Bi-6} - K_{0.88}(Mg_{0.81}Fe_{1.43}Mn_{0.07}Ti_{0.20}Al_{0.49})_3(Si_{2.90}Al_{1.10})_4O_{10}[O_{0.67}(OH)_{1.33}]_2$ 

 $Gr-4 - (Ca_{0.08}Fe_{1.49}Mg_{0.13}Mn_{1.31})_{3.01}Al_{1.99}Si_{3}O_{12}$ 

 $Gr-5 - (Ca_{0.07}Fe_{1.50}Mg_{0.12}Mn_{1.30})_{2.99}Al_{2.01}Si_{3}O_{12}$ 

 $Gr-6 - (Ca_{0.08}Fe_{1.53}Mg_{0.15}Mn_{1.23})_{2.99}Al_{2.01}Si_{3}O_{12}$ 

Примечание: Ми-1 — (номер пробы 766, номер анализа 18469а); Ві-2 — (766, 18469b); Ві-3 — (766, 18469c); Gr-1 — (766, 18469d); Gr-2 — (766, 18469e); Gr-3 — (766, 18469f); Ві-4 — (771, 18470a); Ві-5 — (771, 18470b); Ві-6 — (771, 18470c); Gr-4 — (771, 18470e); Gr-5 — (771, 18470f); Gr-6 — (771, 18470g).

*Note:* Mu-1 - (sample number 766, analysis number 18469a); Bi-2 - (766, 18469b); Bi-3 - (766, 18469c); Gr-1 - (766, 18469d); Gr-2 - (766, 18469e); Gr-3 - (766, 18469f); Bi-4 - (771, 18470a); Bi-5 - (771, 18470b); Bi-6 - (771, 18470s); Gr-4 - (771, 18470e); Gr-5 - (771, 18470f); Gr-6 - (771, 18470g).
на растровом электронном микроскопе Tescan Vega 3sbu с энерго-дисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-act (ускоряющее напряжение 20 кВ, эталоны для биотита — биотит, для граната пироп, андрадит и гроссуляр). Их формулы рассчитывались по известной методике И.Д. Борнеман-Старынкевич [1964], а затем с помощью диаграммы фазового соответствия магнезиальностей парагенезиса биотит – гранат [Перчук, Рябчиков, 1976] получены температуры и приблизительно оценена глубина формирования пород. Следует отметить, что составы биотитов и гранатов (альмандин-спессартинового ряда) из гнейсогранитов почти ничем не отличаются от таковых из биотитовых гранитов. В гранате последних лишь немного меньше СаО (0.83-0.93% против 1.58-1.85%) и больше MnO (17.79–18.96% против 16.28–16.61%), чем в первых. При этом более марганцовистым является и биотит (1.02–1.09% MnO против 0.66–0.72%).

Обратимся к рис. 2, на котором в координатах  $X_{Mg} = Mg/(Mg+Fe+Mn)$  (значения мольных долей компонентов в биотите и гранате) вынесены точки составов для шести пар указанных минералов (1–3 для гнейсогранитов и 4–6 для биотитовых гранитов). Как видим, все ассоциации образуют единое поле. Температуры их образования составляют 530–560°C. Вместе с тем расчет давления по известной



Рис. 2. Диаграмма фазового соответствия  $X_{Mg}^{Cr} - X_{Mg}^{Bi}$  в гранитоидах Еланчиковского массива [Термо- и барометрия..., 1977]. Номера точек (1–6) соответствуют табл. 1

Fig. 2. Diagram of the phase correspondence  $X_{Mg}^{Cr} - X_{Mg}^{Bi}$  in the granitoids of the Yelanchik massif [Thermal and barometry..., 1977]. Point numbers (1–6) refer to table 1

Геологический вестник. 2019. №1

температуре и коэффициенту ln K, где  $K = X_{Mg}^{Cr} / X_{Mg}^{Bi}$  [Термо- и барометрия..., 1977], оказался лишь приблизительным в силу небольшой величины ln K около — 1.9...—2.0. Определенно можно говорить только о небольшой глубине становления гранитоидов Еланчиковского массива, соответствующей приповерхностной или гипабиссальной зонам (первые километры). Полученные данные по физико-химическим условиям образования пород массива позволяют сделать вывод об их метасоматической природе и исключить магматический генезис.

Металлогеническая специализация гранитоидов Еланчиковского массива наглядно демонстрируется и классификационной диаграммой эталонных трендов рудогенных гранитоидных формаций, разработанной Л.С. Бородиным [2004]. На этой диаграмме (рис. 3)  $A_c - (Na+K)/Ca$ , основанной на данных силикатного анализа (табл. 2, 3), где A<sub>c</sub> — универсальный параметр кислотностиосновности, учитывающий не только содержания, но и химическую активность породообразующих элементов, а (Na+K)/Ca — параметр, характеризующий степень щелочности-известковистости, показаны типовые тренды редкометальных, оловорудных и медных провинций мира по отношению к S- и I-гранитам. Как видно из диаграммы, W-Mo тренд располагается в поле ІІв и соответствует субизвестково-щелочным лейкогранитам S-типа, образование которых связывается с завершающими этапами длительной эволюции мантийно-корового магматизма в коллизионных обстановках внутриконтинентальных или окраинно-континентальных орогенных поясов.

Практически все анализы гранитоидов 1 и 2 этапов формирования Еланчиковского массива (мигматиты, гнейсограниты, биотитовые, двуслюдяные и мусковитовые граниты) укладываются в главный известково-щелочной тренд (СА) и, за исключением нескольких проб гранитов второго этапа, располагаются в пределах либо известковощелочного (сектор IIв), либо субщелочного (сектор IIIа) полей. Из рис. За хорошо видно, что мигматиты и гнейсограниты первого этапа становления массива образуют компактную область, вытянутую вдоль границы раздела известково-щелочного и субщелочного полей, и тяготеют к вольфраммолибденовому (W-Mo) и молибденовому (Mo-Cu) металлогеническим трендам. Наибольший интерес на вольфрамовое оруденение представляют мигматиты, а на молибденовое — гнейсограниты. Подтверждается это и результатами геологосъемочных



## Рис. 3. Диаграмма (Na+K)/Ca – A<sub>c</sub> для гранитоидов Еланчиковского массива с эталонными трендами рудогенных гранитоидных формаций [Бородин, 2004]

Условные обозначения: 1–2 (для рис. 3а): 1 — мигматиты, 2 — гнейсограниты; 1–3 (для рис. 3б): 1 — биотитовые граниты, 2 — двуслюдяные граниты, 3 — мусковитовые граниты. Классификационные поля: I — известковое, II — известково-щелочное (IIa — субизвестковистые, II6 — известково-щелочные, IIB — субизвестково-щелочные граниты); III — субщелочное (IIIa — субщелочные и шелочные граниты и лейкограниты, III6 — шелочные агпаитовые граниты); IV — шелочное. Эталонные тренды: СА — главный известково-щелочной, LM — латитовый (монцонитовый). Эталонные тренды рудогенных граниты сраниты: Sn — оловянный, Cu — медно-порфировый, Mo — молибденовый, W — вольфрамовый; Li, Ta, Nb, Sn — литий-тантал-ниобий-оловянный.

## Fig. 3. The $(Na+K)/Ca - A_c$ diagram for the granitoids of the Yelanchik massif with the reference trends of ore-producing granitoid formations [Borodin, 2004]

*Legend*: 1–2 (for fig. 3a): 1 — migmatites, 2 — gneiss-granites; 1–3 (for fig. 36): 1 — biotite granites, 2 — bi-mica granites, 3 — muscovite granites. Classification fields: I — calc., II — calc-alkaline (IIa — sub-calcareous, II6 — calc-alkaline, IIB — subcalc-alkaline granites); III — subalkaline and alkaline granites and leucogranites, III6 — alkaline agpaitic granites); IV — alkaline. *Reference trends:* CA — main calc-alkaline, LM — latite (monzonite). *Standard trends of ore granitoid formations:* Sn — tin, Cu — porphyry copper, Mo — molybdenum, W — tungstene; Li, Ta, Nb, Sn — lithium-tantalum-niobium-tin.

## Таблица 2

## Химический состав гранитоидов 1-го этапа формирования Чашковско-Еланчиковского массива

Table 2

## The chemical composition of the granitoids of the 1st stage of formation of the Chashkov-Yelanchikov massif

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	A1 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	61.39	1.02	16.39	2.30	3.08	2.15	2.83	4.80	4.50
2	66.40	0.40	17.90	0.63	1.70	1.18	3.09	5.80	2.62
3	69.89	0.34	14.68	0.07	2.08	1.18	2.41	3.68	4.14
4	72.46	0.26	13.87	0.73	2.06	0.27	1.26	4.29	2.87
5	73.16	0.25	13.96	0.22	1.39	0.98	1.41	3.90	4.20
6	69.68	0.46	15.74	0.52	1.55	0.99	1.70	5.00	3.73
7	73.26	0.25	13.53	0.86	1.58	0.27	0.93	4.43	4.55
8	75.20	0.17	12.49	0.96	1.31	1.15	2.80	4.60	0.18
9	73.89	0.14	14.06	0.07	0.86	0.79	2.28	5.29	1.65
10	73.42	0.22	14.03	1.00	1.08	0.23	0.84	3.80	4.64
11	75.81	0.33	12.74	0.97	0.93	0.30	0.69	4.03	3.29
12	68.98	0.45	15.26	2.00	1.17	0.43	1.32	3.98	4.80

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	70.68	0.32	13.84	1.40	1.80	0.37	1.25	4.50	4.70
14	72.82	0.13	12.96	1.10	1.41	0.34	1.20	3.60	5.30
15	73.26	0.18	12.91	0.85	1.12	0.29	1.28	4.15	4.80
16	72.77	0.24	13.92	0.53	1.83	0.40	0.99	3.67	3.92
17	69.69	0.28	14.61	2.19	1.68	0.52	1.35	4.41	3.64
18	73.21	0.20	13.54	0.90	1.56	0.26	0.94	3.57	4.46
19	72.43	0.29	13.73	1.04	1.68	0.32	1.23	5.10	3.70
20	69.70	0.12	12.22	1.69	3.85	0.57	0.69	3.60	4.60
21	74.73	0.14	13.42	0.07	1.73	0.44	0.97	4.58	4.12
22	72.77	0.24	13.92	0.53	1.83	0.40	0.99	3.67	3.92
23	74.76	0.16	13.09	0.93	1.23	0.15	0.67	4.06	4.18
24	76.42	0.20	12.60	0.26	1.05	0.18	0.85	3.60	4.20
25	75.54	0.19	12.93	0.36	1.16	0.22	0.91	4.30	4.30
26	75.29	0.08	11.82	0.99	0.98	0.25	0.68	3.75	4.40
27	75.80	0.07	12.08	0.75	1.32	0.24	0.60	3.60	4.50

*Примечания:* 1–11 — мигматиты; 12–27 — порфиробластовые гнейсограниты. Анализы принадлежат Б.Н. Пермякову [2000]. *Notes:* 1–11 — migmatites; 12–27 — porphyroblastic gneiss-granites. Analyzes belong to B.N. Permyakov [2000].

Таблица 3

# Химический состав гранитов 2-го этапа формирования Чашковско-Еланчиковского массива

Table 3

# The chemical composition of granites of the 2nd stage of formation of the Chashkov-Yelanchik massif

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	$Al_2O_3$	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	71.52	0.39	15.45	0.14	1.39	0.43	2.30	3.52	3.91
2	70.66	0.25	15.58	0.30	1.79	0.74	1.86	3.90	3.70
3	71.59	0.31	14.27	0.21	1.58	0.80	1.58	4.00	5.00
4	70.95	0.40	14.75	0.07	1.91	0.32	1.34	3.92	5.15
5	71.59	0.21	15.13	1.25	1.40	0.26	1.48	5.60	2.70
6	71.44	0.61	13.43	1.19	0.89	0.50	0.90	3.30	5.90
7	73.26	0.40	13.44	0.86	0.65	0.19	0.86	3.70	5.20
8	70.18	0.77	13.91	1.72	1.22	0.52	1.21	4.00	4.70
9	70.19	0.36	15.40	1.19	1.45	0.57	1.98	4.10	3.60
10	70.86	0.26	14.10	0.90	1.08	0.51	1.58	4.00	5.60
11	70.46	0.18	14.38	1.22	1.22	0.40	1.34	3.85	4.80
12	71.40	0.21	13.31	1.50	1.56	0.43	1.32	3.70	4.70
13	71.35	0.13	14.30	0.61	1.21	0.32	1.09	4.60	5.80
14	76.04	0.16	12.88	0.64	1.09	0.26	1.29	3.08	3.68
15	75.22	0.13	12.98	1.02	0.96	0.19	1.43	4.00	4.00
16	75.64	0.05	13.80	0.31	0.63	0.19	1.12	4.00	3.24
17	74.90	0.18	13.20	0.77	0.97	0.39	1.41	3.92	4.40
18	76.80	0.12	12.30	0.43	1.02	0.36	0.44	2.92	3.76
19	75.09	0.10	12.48	0.30	0.74	1.20	0.70	3.68	5.00
20	76.08	0.14	11.96	0.94	1.56	0.33	0.82	5.10	2.00
21	76.58	0.08	12.03	0.57	0.99	0.15	0.74	4.20	4.30
22	76.77	0.10	12.65	0.99	0.73	0.11	0.38	3.93	3.57

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
23	76.95	0.12	11.72	1.25	1.26	0.16	0.38	2.90	4.32
24	75.12	0.14	12.84	0.06	1.25	0.18	0.95	2.80	5.90
25	75.08	0.17	12.95	0.58	1.46	0.18	0.87	4.05	4.60
26	74.44	0.20	13.60	0.68	1.79	0.17	1.03	5.20	1.50
27	72.24	0.19	14.39	0.47	1.20	0.32	0.93	4.90	4.39
28	73.20	0.39	13.45	0.53	0.83	0.27	0.99	3.40	5.00
29	69.24	0.36	15.72	1.04	0.95	0.52	1.68	5.75	3.30
30	72.60	0.18	13.64	0.64	1.04	0.22	1.02	3.80	5.30
31	72.01	0.15	14.25	0.59	1.28	0.34	1.18	3.90	5.30
32	74.03	0.13	14.15	0.69	0.60	0.25	0.96	3.00	4.50
33	73.10	0.13	14.56	0.26	1.11	0.26	1.07	3.67	4.78
34	72.04	0.28	14.32	0.68	0.97	0.54	1.19	4.00	5.00
35	71.64	0.20	14.56	0.36	1.48	0.32	1.07	3.40	4.50
36	72.97	0.16	14.10	0.58	0.92	0.36	0.91	4.24	4.70
37	72.81	0.21	14.35	0.44	1.27	0.32	1.02	4.05	4.75
38	71.74	0.35	13.56	0.52	2.27	0.31	0.89	3.40	4.50
39	72.00	0.18	14.21	0.64	0.96	0.40	1.43	4.10	4.85
40	72.16	0.15	14.22	0.55	1.57	0.35	1.08	3.20	5.15
41	72.44	0.12	14.19	0.70	0.86	0.21	1.03	3.30	5.10
42	73.10	0.17	14.10	0.62	0.83	0.24	1.03	3.60	5.15
43	70.42	0.11	15.15	0.49	0.77	0.21	1.01	4.00	7.20
44	75.07	0.10	14.20	0.07	1.10	0.39	1.69	3.76	3.36
45	73.40	0.09	14.72	0.07	1.06	0.09	1.77	4.06	3.92
46	74.94	0.23	12.23	0.17	1.08	0.24	0.67	3.20	4.80
47	74.58	0.05	13.49	0.08	0.75	0.30	1.15	4.00	5.00
48	74.12	0.14	13.40	0.25	0.71	0.49	1.12	3.12	5.00
49	73.81	0.16	14.41	0.35	0.93	0.12	0.91	3.23	5.29
50	73.38	0.04	14.51	0.74	0.14	0.26	0.40	4.14	4.21

*Примечания:* 1–26 — биотитовые и лейкократовые гнейсограниты; 27–32 — двуслюдяные граниты; 33–50 — мусковитовые граниты. Анализы принадлежат Б.Н. Пермякову [2000].

*Notes:* 1-26 – biotite and leucocratic gneiss-granite; 27-32 – bi-mica granites; 33-50 – muscovite granites. Analyzes belong to B.N. Permyakov [2000].

работ В.И. Петрова и др. (ОАО «Челябинскгеосъемка») в пределах листа N-41-VII (Миасс, М 1:200000), которые указывают на присутствие в эндоконтактовых зонах Еланчиковского и Чашковского массивов нескольких мелких проявлений W и Mo.

Двуслюдяные граниты второго этапа не образуют на диаграмме A<sub>c</sub> – (Na+K)/Ca отчетливого тренда и их металлогеническая специализация не определена (рис. 36). Совсем другая картина просматривается для биотитовых и мусковитовых гранитов. Все их анализы ложатся в ту же область, что и породы первого этапа формирования рассматриваемого массива. Соответственно они также имеют W-Mo металлогеническую специализацию. Данный вывод хорошо согласуется с результатами исследований Б.Н. Пермякова [2000] по оценке рудоносности гранитоидов Чашковско-Еланчиковского массива на основе серии других петрохимических диаграмм. Автором отмечается, что: 1) от ранних к более поздним петрографическим разностям пород увеличивается степень их потенциальной рудоносности; 2) мигматиты потенциально рудоносны на молибден, гнейсограниты на вольфрам и в меньшей мере на молибден; биотитовые, мусковитовые и двуслюдяные граниты на вольфрам; 3) в силу слабой магматической и эманационной дифференциации пород массива образование крупных концентраций редких металлов здесь ожидать не следует.

Редкометальная специализация гранитоидов Ильменогорско-Сысертского блока не является специфической особенностью, характерной только для данной структурно-формационной зоны. Ранее нами [Демин, Сначёв, 1981; Сначёв и др., 2010; Сначёв, Сначёв, 2014] высокие содержания вольфрама и молибдена были отмечены в гранитоидах и во вмещающих их породах Суундукского, Ахуновского массивов, Белорецкого метаморфического купола.

Таким образом, полученные по биотит-гранатовому термобарометру *P-T* условия формирования Еланчиковского гранитоидного массива (T=530-560°C, приповерхностно-гипабиссальная зона глубинности) позволили подтвердить вывод, сделанный ранее Б.Н. Пермяковым [2000], о метасоматическом происхождении мигматитов и гнейсогранитов. Кроме того, анализ классификационной диаграммы эталонных трендов рудогенных гранитоидных формаций указывает на редкометальную (W-Mo) специализацию пород Еланчиковского массива.

## Список литературы:

*Борнеман-Старынкевич И.Д.* Руководство по расчету формул минералов. – М.: Наука, 1964. – 224 с.

Бородин Л.С. Модельная система петрогеохимических и металлогенических трендов гранитоидов как основа прогноза месторождений Sn, Li, Ta, Nb, W, Mo, Cu // Геология рудных месторождений. – 2004. – Т. 46, № 1. – С. 3–26.

Демин Ю.И., Сначёв В.И. Тепловые поля Ахуновского гранитного массива и закономерности размещения в них оруденения // Доклады АН СССР. – 1981. – Т. 261, № 1. – С. 152–156.

Пермяков Б.Н. Чашковско-Еланчиковский мигматитгнейсогранитный массив (Южный Урал). – Миасс: ИГЗ УрО РАН, 2000. – 187 с.

*Перчук Л.Л., Рябчиков И.Д.* Фазовое соответствие в минеральных системах. – М.: Недра, 1976. – 287 с.

*Сначёв В.И., Муркин В.П.* Новые данные по магматизму, метаморфизму и металлогении Кочкарской площади (Южный Урал): Препринт. – Уфа, 1989. – 23 с.

Сначёв В.И., Сначёв А.В. Закономерности размещения золоторудных проявлений в углеродистых отложениях Белорецкого метаморфического комплекса (Южный Урал) // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. геол. – 2014. – № 2. – С. 79–87.

Сначёв А.В., Сначёв В.И., Рыкус М.В. Перспективы рудоносности углеродистых отложений западного обрамле-

#### Сведения об авторе:

Сначёв Владимир Иванович, доктор геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: SAVant@inbox.ru

#### About the author:

**Snachev Vladimir Ivanovich,** Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Institution of Russian Academy of Sciences Institute of Geology of the Ufimian Scientific Centre (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: SAVant@inbox.ru

ния Суундукского гранитного массива // Нефтегазовое дело. – 2010. – Т. 8, № 2. – С. 11–20.

Термо- и барометрия метаморфических пород / Под ред. В.А. Глебовицкого. – Л.: Наука, 1977. – 207 с.

Ферштатер Г.Б., Бородина Н.С., Рапопорт М.С., Осипова Т.А., Смирнов В.Н., Левин В.Я. Орогенный гранитоидный магматизм Урала. – Свердловск: ИГГ УрО РАН, 1994. – 250 с.

## **References:**

*Borneman-Starynkevich I.D.* Rukovodstvo po raschetu formul mineralov [Guidelines for the calculation of mineral formulas]. M.: Nauka, 1964. 224 p. (In Russian).

*Borodin L.S.* Model system of petrochemical and metallogenic trends of granitoids as a basis for prognosis of Sn, Li, Ta, Nb, W, Mo, and Cu deposits // Geology of ore deposits. 2004. V. 46, No. 1. P. 1–21.

*Demin Yu.I., Snachev V.I.* Thermal fields of the Akhunovo massif and the regularities of mineralization distribution in them // Doklady AN SSSR. 1981. V. 261, No. 1. P. 152–156.

Fershtater G.B., Borodina N.S., Rapoport M.S., Osipova T.A., Smirnov V.N., Levin V.Ya. Orogennyi granitoidnyi magmatizm Urala [Ural orogenic granitoid magmatism]. Sverdlovsk: IGG UrO RAN, 1994. 250 p. (In Russian).

*Perchuk L.L., Ryabchikov I.D.* Fazovoe sootvetstvie v mineral'nykh sistemakh [Phase correspondence in mineral systems]. M.: Nedra, 1976. 287 p. (In Russian).

*Permyakov B.N.* Chashkovsko-Elanchikovskii migmatitgneisogranitnyi massiv (Yuzhnyi Ural) [Chashkov-Elanchik migmatite-gneisso-granite massif (Southern Urals)]. Miass: IGZ UrO RAN, 2000. 187 p. (In Russian).

Snachev V.I., Murkin V.P. Novye dannye po magmatizmu, metamorfizmu i metallogenii Kochkarskoi ploshchadi (Yuzhnyi Ural) [New data on magmatism, metamorphism and metallogeny of the Kochkarsk area (Southern Urals)]. Ufa: Print, 1989. 23 p. (In Russian).

Snachev V.I., Snachev A.V. Zakonomernosti razmeshcheniya zolotorudnykh proyavlenii v uglerodistykh otlozheniyakh Beloretskogo metamorficheskogo kompleksa (Yuzhnyi Ural) [Patterns of placement of gold occurrences in carbonaceous deposits of the Beloretsk metamorphic complex (Southern Urals)] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. 2014. No. 2. P. 79–87. (In Russian).

Snachev A.V., Snachev V.I., Rykus M.V. Perspektivy rudonosnosti uglerodistykh otlozhenii zapadnogo obramleniya Suundukskogo granitnogo massiva [Prospects of ore-bearing carbonaceous deposits of the western frame of the Suunduk granite massif] // Neftegazovoe delo. 2010. V. 8, No. 2. P. 11– 20 (In Russian).

Termo- i barometriya metamorficheskikh porod [Thermoand barometry of metamorphic rocks] / *V.A. Glebovitskii (ed.)*. L.: Nauka, 1977. 207 p. (In Russian). УДК 553.461(234.853)

DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-6

## ХРОМИТИТЫ ЗОНЫ МЕЛАНЖА НУРАЛИНСКОГО МАССИВА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2018 г. Д.Е. Савельев, Я.Н. Нугуманова, Р.А. Гатауллин, С.Н. Сергеев

**Реферат.** Исследованы минералогические особенности хромититов из зоны серпентинитового меланжа в восточной части Нуралинского массива. Установлено, что рудообразующие хромшпинелиды проявлений Сарусаккульского рудного узла и рудопроявления Шерамбайское представлены высокохромистыми разновидностями, близкими по составу к шпинелидам из хромититов внутренней части мантийного разреза офиолитов. Основными акцессорными минералами в хромититах являются сульфиды и арсениды никеля (миллерит, хизлевудит, орселит), к которым часто приурочены тонкие выделения (1–7 мкм) минералов платиновой группы. По геохимическим особенностям минерализация относится к смешанному типу (Os, Pt, Ir > Ru > Pd, Rh). Делается вывод о том, что образование акцессорной минерализации и выделение платинометальных фаз было вызвано тектонической перегруппировкой материала и воздействием на хромититы низкотемпературных флюидов.

**Ключевые слова:** ультрамафиты, хромшпинелиды, акцессорные минералы, сульфиды, платиноиды, массив Нурали

## CHROMITITES FROM MÉLANGE ZONE OF THE NURALI MASSIF (THE SOUTHERN URALS)

D. E. Saveliev, Ya. N. Nugumanova, R. A. Gataullin, S. N. Sergeev

**Abstract.** We present some results of study of mineralogical peculiarities of chromitites from serpentinite mélange zone in the eastern part of Nurali massif. It was found that chromian spinel grains from Sherambayskoe and Sarusakkul area occurrences are high-Cr as those from chromitite bodies of the inner parts of ophiolite mantle section. The main accessory minerals in the chromitite are Ni-sulfides and arsenides (millerite, heazlewoodite and orcelite). These often enclose tiny precipitations  $(1-7 \ \mu m)$  of platinum group minerals (PGM). Chemically, this mineralizations belong to a mixed type with Os, Pt, Ir > Ru > Pd, Rh. We infer that accessory minerals formation including PGM was caused by both tectonic redistribution of matter and interaction of chromitites with low-T fluids.

Keywords: ultramafic rock, chromian spinel, accessory minerals, base metal sulfides, PGE, Nurali massif

## Введение

Актуальность изучения акцессорной минерализации, приуроченной к хромититам Нуралинского массива, определяется тем, что в непосредственной близости от него расположены россыпи золота, несущие платинометальную минерализацию [Зайков и др., 2016]. Предыдущие исследования [Дмитренко и др., 1992; Смирнов, 1995; Молошаг, Смирнов, 1996; Grieco et al., 2007; Zaccarini et al., 2004 и др.] позволили установить платиноносность некоторых рудопроявлений, расположенных на площади распространения переходного мантийно-корового комплекса офиолитов (Западно-Шерамбайское и Приозерное). В дальнейшем минералы платиновой группы были установлены также в пределах месторождения Мокрая Яма [Савельев и др., 2017], которое приурочено к апоперидотитовым серпентинитам и отделяется от них небольшой оторочкой аподунитовых серпентинитов.

Для цитирования: Савельев Д.Е., Нугуманова Я.Н., Гатауллин Р.А., Сергеев С.Н. Хромититы зоны меланжа Нуралинского массива (Южный Урал) // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 77–90. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-6. For citation: Saveliev D.E., Nugumanova Ya.N., Gataullin R.A., Sergeev S.N. Chromitites from mélange zone of the Nurali massif (the Southern Urals) // Geologicheskii vestnik. 2019. No. 1. P. 77–90. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-6. Целью настоящей работы является продолжение исследований состава хромшпинелидов и акцессорной минерализации в хромититах восточной части массива. В данном сообщении рассмотрены рудопроявления, локализованные в зоне серпентинитового меланжа.

Исследования включали в себя маршрутное геологическое изучение рудопроявлений, отбор образцов хромититов и вмещающих пород (серпентинизированных ультрамафитов, габброидов, лиственитов). Петрографический и минеральный состав пород и руд изучен в полированных шлифах и аншлифах на поляризационных оптических микроскопах. Электронно-микроскопические исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе Vega 3 SBH Tescan с энерго-дисперсионным анализатором x-Act Oxford Instruments в ИПСМ РАН (г. Уфа). Формулы минералов рассчитывались в пересчете на целое число атомов анионов: миллерита — на один атом S, хизлевудита — на два атома S, полидимита — на 4 атома S, пентландита — на 8 атомов S, орселита — на 2 атома As, маухерита — на 8 атомов As, интерметаллидов — на 1 формульную единицу суммы металлов.

## Результаты исследований и их обсуждение

### Геологическая позиция рудопроявлений

Восточная часть Нуралинского массива представляет собой слабо всхолмленную равнину с многочисленными мелкими озерами. Небольшие возвышенности с абсолютными отметками 450-550 м сложены габбро, диабазами, лиственитами и родингитизированными осадочными и вулканогенными породами (рис. 1). Данные породы слагают блоки в меланже, матриксом которого являются преимущественно хризотиловые серпентиниты, занимающие пониженные участки и подножия склонов. При поисковых работах на хромовые руды в 1930-х (Фарафонтьев, 1939 г. и др.) и 1970-х годах (Шумихин, 1980 г.) в серпентинитовом меланже Нуралинского массива был выявлен ряд небольших рудопроявлений, в том числе Шерамбайское и проявления Сарусаккульского рудного узла (Шумихин, 1987 г.), минералогические особенности которых мы и рассмотрим ниже.

Рудопроявления в различной степени изучены с поверхности и характеризуются небольшими размерами. Судя по остаткам эксплуатационных выемок, наиболее крупными из них являлись Восточно- и Южно-Сарусаккульское (рис. 2a, б). Следует отметить, что, хотя проявления названы по оз. Сарусаккуль, все они расположены примерно в 1 км к юго-востоку от него, вблизи другого, безымянного озерца округлой формы.

На Восточно-Сарусаккульском рудопроявлении (HP-118) пройдена цепочка небольших карьеров размерами до 5×3×3 м с общим северо-восточным простиранием (CB 40°). В днище одной из выемок пройден шурф глубиной не менее 3 м. По-видимому, рудопроявление было представлено цепочкой из трех линзовидных тел массивных и густовкрапленных хромититов длиной от 1 до 10 м. В отвалах с преобладанием хризотиловых апоперидотитовых серпентинитов (см. рис. 2в) довольно часто встречаются рудные обломки.

На Южно-Сарусаккульском проявлении (НР-217), расположенном на южном берегу безымянного озера (см. рис. 2г), сохранились две сильно заросшие выемки размером  $7 \times 7 \times 5$  и  $3 \times 3 \times 1$  м (см. рис. 2д), расположенные также в виде цепочки северо-восточного простирания. В отвалах рудные образцы встречаются значительно реже, здесь также преобладают серпентиниты. Значительно меньшими размерами характеризуется Сарусаккульское рудопроявление. Оно расположено на северном берегу одноименного озера, в 10 м от уреза воды, и в настоящее время представлено заросшей выемкой размером  $3 \times 1.5 \times 1.5$  м, пройденной на контакте серпентинитов и родингитизированных осветленных пород предположительно первичной вулканогенно-осадочной природы (см. рис. 2е). Хромититы были отобраны из отвала выемки, где они встречаются в виде крупных обломков (см. рис. 2ж, 3) вместе с серпентинитами и родингитами.

Помимо упомянутых выше рудопроявлений, принадлежащих к Сарусаккульскому рудному узлу, в отчетах и на карте Е.А. Шумихина (1987 г.) отмечены также Северо-Сарусаккульское и Уртыкташское. Первое нами не было найдено, а на участке, где обозначено второе, мы обнаружили только многочисленные неглубокие канавы, пройденные по серпентинитам, но обломки хромититов не были найдены.

## Структурные и минералогические особенности хромититов

Шерамбайское рудопроявление расположено на одноименном ручье, на северном берегу пруда (см. рис. 1), и приурочено к западному контакту блока лиственитов с серпентинитами. Положительные формы рельефа с хорошо выраженными



## Рис. 1. Схема геологического строения восточной части Нуралинского массива. Составлена с использованием данных работ (Шумихин, 1987 г.), [Савельев и др., 2017; Saveliev, Ankusheva, 2018]

*Условные обозначения*: 1 — четвертичные аллювиальные отложения; 2 — осадочные породы; 3 — вулканогенные породы; 4 — габброиды; 5 — переходный мантийно-коровый комплекс (пироксениты, верлиты, вебстериты); 6 — шпинелевые перидотиты; 7 — преимущественно дуниты; 8 — серпентиниты; 9 — листвениты; 10 — разрывные нарушения; 11 — хромитопроявления (а — в мантийном и переходном мантийно-коровом комплексе; 6 — в меланже, описанные в настоящей работе: 1 — Шерамбайское, 2 — Сарусаккульское, 3 — Восточно-Сарусаккульское, 4 — Южно-Сарусаккульское), 12 — золотоносные россыпи, содержащие МПГ.

## Fig. 1. Sketch geological map of the eastern part of Nurali ultramafic massif. After works (Shumikhin, 1987), [Saveliev et al., 2017; Saveliev, Ankusheva, 2018]

*Legend*: 1 – Quatermary alluvial deposits; 2 – sedimentary rocks; 3 – volcanic rocks; 4 – gabbro; 5 – mantle-crust transition zone (pyroxenites, wehrlites, vebsterites); 6 – spinel peridotites; 7 – dunite; 8 – serpentinites; 9 – listwanites; 10 – faults; 11 – chrome ore occurrences (a – in the mantle and mantle-crust transition sections; 6 – in the serpentinite mélange, studied here: 1 – Sherambayskoe, 2 – Sarusakkulskoe, 3 – East-Sarusakkulskoe, 4 – South-Sarusakkulskoe), 12 – gold placers with PGM.

обнажениями представлены лиственитами, а серпентиниты слагают преимущественно пониженные участки. Листвениты характеризуются светлой окраской — от почти белой до зеленовато-коричневой. Они состоят главным образом из кварца и магнезита с небольшим количеством хромовой слюды — фуксита и редких ксеноморфных зерен хромшпинелидов (рис. 3), состав которых существенно отличается от типичных составов акцессорных и рудообразующих шпинелидов ультрамафитов (см. ниже).

Морфология хромшпинелидов указывает на то, что листвениты были образованы, скорее всего, по перидотитам мантийного разреза офиолитового комплекса. Хромититы в коренных выходах представлены преимущественно густовкрапленными мелко- и среднезернистыми разновидностями, в элювии встречены обломки массивных хромити-



Рис. 2. Общий вид рудопроявлений и обнажений хромититов и вмещающих пород

Примечание: а–в — Восточно-Сарусаккульское рудопроявление, на врезке — шурф; г — обнажения родингитизированных вмещающих пород на северном берегу безымянного озера, стрелки указывают на расположение проявлений Южно-Сарусаккульское (HP-217) и Сарусаккульское (HP-115); д — заплывшая выемка на Южно-Сарусаккульском рудопроявлении; е–з — Южно-Сарусаккульское рудопроявление (е — родингиты в борту канавы, вскрывающей хромититы; ж, з — крупнозернистые густовкрапленные хромититы из отвала).

## Fig. 2. General view of occurrences and outcrops of chromitites and their wall rocks

*Note:* a-B — East-Sarusakkulskoe occurrence, on the inset — exploration pit; r — outcrops of rodingitized wall rocks on the north side of unnamed lake; arrows show locations of South-Sarusakkulskoe (HP-217) and Sarusakkulskoe occurrences (HP-115);  $\pi$  — small quarry at the South-Sarusakkulskoe occurrence; e-3 — South-Sarusakkulskoe occurrence (e — rodingites on the wall of exploration trench at the contact with chromitites; w, 3 — coarse-grained dense-disseminated chromitites from waste).



**Рис. 3. Структурные и минералогические особенности лиственитов Шерамбайского рудопроявления** *Примечание:* а — сканированное изображение аншлифа, длина масштабной линейки 1 см; б-г — снимки в режиме обратно-рассеянных электронов (далее — BSE); q — кварц, fu — фуксит, Chrt — хромшпинелид, Mgt — магнетит.

#### Fig. 3. Structural and mineralogical peculiarities of listwanites from Sherambayskoe occurrence

*Note:* a - scan-image of polished section, scale 1 cm; 6-r - BSE-images; q - quartz, fu - fuchsite, Chrt - chromian spinel, Mgt - magnetite.

тов. Вкрапленные хромититы сложены округлыми зернами хромшпинелидов, соприкасающимися между собой. Рудные зерна разбиты трещинами, заполненными карбонатом, реже серпентином.

Из акцессорных минералов наибольшим распространением пользуется сульфид никеля — хизлевудит (рис. 4г, е), значительно реже в срастаниях с ним или в виде мелких выделений внутри него встречен арсенид никеля (орселит). Размер зерен варьирует от долей микрона до 15–20 мкм, поэтому количественные данные о составе минералов удается получить не всегда. Относительно крупные выделения локализованы среди более крупных кристаллов хромита, а среди раздробленных и измененных тонкозернистых хромититов обычно встречаются обильные тончайшие выделения акцессориев.

В некоторых случаях сростки хизлевудита и орселита содержат очень мелкие обособления минералов платиновой группы, среди которых определены арсенид Ni-Cu-Pt, платинистая медь, твердые растворы состава Ni-Pt-Fe-Ru-Ir. В овальных измененных кристаллах миллерита обнаружены обильные мельчайшие выделения недиагностируемых фаз (<1 мкм) с высокими содержаниями рутения и иридия (см. рис. 43).



## Рис. 4. Хромититы и акцессорная минерализация Шерамбайского рудопроявления

*Примечание:* а, б — сканированное изображение аншлифа, длина масштабной линейки 1 см; в-и — изображения в режиме BSE; Chrt — хромшпинелиды, Spt — серпентин.

## Fig. 4. Chromitites and accessory minerals of Sherambayskoe occurrence

Note: a, б – scan-image of polished section, scale 1 cm; в–и – BSE-images; Chrt – chromian spinel, Spt – serpentine.

На *Сарусаккульском рудопроявлении* оруденение приурочено к тектонизированным хризотиловым серпентинитам, слагающим пониженные участки вдоль северного берега безымянного озера. С запада и севера они граничат с плотными осветленными родингитами, которые обнажаются на склоне и вершинах возвышенностей (см. рис. 2г). Среди хромититов преобладают крупнозернистые средне- и густовкрапленные разновидности.

Под микроскопом хромититы представлены агрегатами плотно соприкасающихся зерен. В большинстве случаев границы отдельных кристаллов неотличимы: с одной стороны, они тесно срастаются между собой, а с другой — разбиты многочисленными тонкими трещинами. Внешние границы отчетливы только в случае соприкосновения хромита с силикатным материалом, который представлен серпентином и хлоритом. В этом случае для зерен хромита характерна преимущественно неправильная форма, часто с округлыми очертаниями границ.

Морфология силикатных выделений еще более причудлива и свидетельствует, скорее всего, о выжимании более мягкого серпентин-хлоритового матрикса при формировании (либо преобразовании) структуры хромититов. К таким участкам приурочены почти все обнаруженные выделения акцессорных минералов, которые на данном проявлении являются наиболее многочисленными (см. рис. 5в). Преимущественным распространением среди акцессориев пользуется миллерит (см. рис. 5в–д, ж, з). Он образует изометричные либо

неправильной формы зерна размером 50-100 мкм,

внутри которых иногда обнаруживаются более мелкие (до 7 мкм) выделения минералов платиноидов. Последние представлены чаще всего твердыми растворами состава Os-Ir-Pt-Ru $\pm$ Pd $\pm$ Rh c Ni, Fe, Cu. Вторым по распространенности акцессорием в хромититах является хизлевудит, в одном из его сростков с пентландитом обнаружены многочисленные, но очень мелкие (<1 мкм) выделения фаз Os и Ir (см. рис. 5е).



## Рис. 5. Хромититы и акцессорная минерализация Сарусаккульского рудопроявления

*Примечание:* снимки в режиме BSE; з — фрагмент участка «ж»; Chrt — хромшпинелид, Spt — серпентин, Chl — хлорит, Hzl — хизлевудит.

Рис. 5. Chromitites and accessory minerals of Sarusakkulskoe occurrence

*Note:* BSE-images; Chrt – chromian spinel, Spt – serpentine, Chl – chlorite, Hzl – heazlewoodite.

Восточно-Сарусаккульское рудопроявление (НР-118) сложено густовкрапленными и массивными хромититами, которые характеризуются разнозернистой структурой (рис. 6а). Размер зерен варьирует от 1 до 5 мм, в сплошных агрегатах индивидуальные кристаллы хромита трудно различимы из-за их тесного срастания между собой и наличия многочисленных трещин. Зерна обычно соединены в непрерывные агрегаты с извилистыми границами, заключающими внутри себя силикатные (серпентиновые) включения неправильной формы. Для зерен, граничащих с силикатным материалом, характерна округленная форма.

Хромшпинелиды содержат многочисленные включения, преимущественно представленные серпентином. Значительно реже внутри зерен либо в интерстициях встречаются выделения акцессорных минералов, большая часть которых представлена миллеритом (см. рис. 6б, в). Размер выделений изменяется от первых до 50 мкм, они часто приурочены к небольшим включениям силикатного материала внутри кристаллов хромита. При изучении в режиме обратно-рассеянных электронов зерна миллерита обычно характеризуются однородным составом.

*Южно-Сарусаккульское рудопроявление* (HP-217) преимущественно было сложено массивными хромититами с небольшой долей ксеноморфных включений силикатного материала (рис. 7а). При изучении под микроскопом в хромититах фиксируется широкое распространение микробрекчиевидных текстур, которые развиты вдоль зон дробления массивных хромититов. Одна из таких зон хорошо видна в левой части изображения аншлифа (см. рис. 7а), а ее внутреннее строение иллюстрируют рис. 76, в. Зерна хромита разбиты на угловатые блоки размером от 10—20 мкм до 100 мкм и погружены в матрикс серпентинового состава (см. рис. 76). Вокруг блоков отмечается тонкая оторочка, представленная предположительно гидроандрадитом (см. рис. 7г, д). Именно к таким зонам дробления приурочена большая часть обнаруженных акцессориев.

Выделения акцессорных минералов в хромититах представлены преимущественно арсенидом никеля — орселитом, размер зерен которого варьирует от субмикронного до 20–30 мкм (см. рис. 7в–д). Одно из редких крупных ксеноморфных зерен размером около 100 мкм содержит включение палладистой меди (рис. 7е). В целом же практически все изученные выделения арсенидов характеризуются однородным составом.

## Состав хромшпинелидов и акцессорных минералов руд

Большая часть проанализированных рудообразующих хромшпинелидов относится к высокохромистым разновидностям — хромиту и алюмохромиту, концентрация  $Cr_2O_3$  в неизмененных зернах варьирует в пределах 52—65 мас. % (табл. 1). Отношение двухвалентных катионов Mg/Fe в формуле примерно равно единице (рис. 8а). Уменьшение концентраций магния и алюминия обычно связано с метаморфическими преобразованиями первичных шпинелидов, замещением их хроммагнетитом и магнетитом. На изученных проявлениях обогащенные железом составы выявлены во внешних каемках зерен.



## Рис. 6. Хромититы и акцессорная минерализация Восточно-Сарусаккульского рудопроявления

*Примечание:* а — сканированное изображение аншлифа, длина масштабной линейки 1 см; б, в — снимки в режиме BSE; Chrt — хромшпинелид, Spt — серпентин.

### Fig. 6. Chromitites and accessory minerals of East-Sarusakkulskoe occurrence

Note: a - scan-image of polished section, scale 1 cm; 6, B - BSE-images; Chrt - chromian spinel, Spt - serpentine.



**Рис. 7. Хромититы и акцессорная минерализация Южно-Сарусаккульского рудопроявления** *Примечание:* а — сканированное изображение аншлифа, длина масштабной линейки 1 см; б-е — снимки в режиме BSE; Chrt — хромшпинелид, огс — орселит.

#### Fig. 7. Chromitites and accessory minerals of South-Sarusakkulskoe occurrence

*Note:* a – scan-image of polished section, scale 1 cm; 6–e – BSE-images; Chrt – chromian spinel, orc – orcelite.

Наиболее интенсивные изменения хромшпинелидов происходят при гидротермальном воздействии на ультрамафиты и могут быть проиллюстрированы составами акцессорных шпинелидов из вмещающих лиственитов проявления Шерамбайское. Как следует из табл. 1 и рис. 8, в зернах шпинелидов из лиственитов полностью отсутствует магний, а алюминий отмечается лишь в следовых количествах. В то же время минералы в значительной степени обогащены двух- и трехвалентным железом, а из примесных компонентов в них отмечается высокое содержание никеля (до 7 мас. % NiO) и цинка (до 1 мас. % ZnO). Вместе с тем форма выделений шпинелидов из лиственитов весьма сходна с таковой акцессорных хромшпинелидов из слабо серпентинизированных шпинелевых перидотитов Нуралинского массива. Из рассмотрения диаграмм Мg#-Fe# и Al-Cr-Fe+3 следует, что хромшпинелиды всех изученных проявлений близки к таковым типичных подиформных месторождений мантийной части разреза офиолитовых комплексов.

Составы акцессорных минералов из хромититов приведены в табл. 2. В целом из нее следует, что на изученных рудопроявлениях наиболее распространены три минерала — миллерит, хизлевудит и орселит. Миллерит встречен на Шерамбайском, Сарусаккульском и Восточно-Сарусаккульском проявлениях. Для минералов Шерамбайского проявления характерны примеси меди, кобальта и железа. Наиболее высокие концентрации хрома (2.12 мас. %) и железа (до 5 мас. %) зафиксированы в миллерите из Восточно-Сарусаккульского проявления. Наличие в анализах небольших количеств хрома обычно связывается с захватом матрицы вмещающего хромшпинелида, но в данном случае он встречен во всех изученных точках, в том числе и в достаточно крупных зернах. Практически отсутствуют примеси в миллеритах Сарусаккульского проявления, а содержание никеля в них максимально (65 мас. %).

Хизлевудит встречается в хромититах Шерамбайского и Сарусаккульского рудопроявлений.

## Средние химические составы хромшпинелидов (мас. %)

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
Ν	4	9	3	11	8	14	2	1
$Cr_2O_3$	52.77	60.64	36.2	57.63	58.80	58.87	64.63	51.35
$Al_2O_3$	16.87	10.04	0.93	13.86	12.07	12.51	7.39	11.54
FeO	15.0	14.88	55.14	14.07	14.21	13.51	14.59	23.19
MgO	15.1	14.31	_	13.90	14.92	15.00	13.28	13.91
TiO <sub>2</sub>	0.26	0.14	_	—	_	0.11	0.11	—
MnO	—	_	_	0.48	_	—	—	—
NiO	—	—	6.95	—	_	—	—	—
ZnO	—	_	0.78	0.06	—	—	—	_
			Коэф	фициенты фо	ормул			
Cr	1.297	1.540	1.080	1.446	1.475	1.472	1.672	1.303
Al	0.617	0.380	0.041	0.513	0.450	0.466	0.285	0.437
Fe <sup>+3</sup>	0.076	0.078	0.852	0.036	0.077	0.061	0.051	0.246
Fe <sup>+2</sup>	0.306	0.314	0.793	0.339	0.292	0.291	0.342	0.349
Mg	0.698	0.685	—	0.651	0.705	0.707	0.648	0.665
Ti	0.006	0.003	—	—	—	0.003	0.003	_
Mn	—	_	—	0.014	—	—	—	_
Ni	—	_	0.211	—	—	_	—	_
Zn	_	_	0.022	0.001	_	_	_	_
			Числов	ые характері	истики			
#Cr	0.68	0.80	0.96	0.74	0.77	0.76	0.85	0.75
#Mg	0.70	0.69	_	0.65	0.71	0.71	0.65	0.66

Average compositions of chromian spinels (wt. %)

*Примечание:* 1–3 — Шерамбайское рудопроявление: 1 — хромитит, обр. HP-53-1a; 2 — хромитит, обр. HP-53-2; 3 — лиственит, обр. HP-53-3; 4 — Сарусаккульское рудопроявление, хромитит, обр. HP-115-1; 5 — Восточно-Сарусаккульское рудопроявление, хромитит, обр. HP-118-26; 6–8 — Южно-Сарусаккульское рудопроявление, хромитит, обр. HP-217; N — число анализов; прочерк означает, что содержание данного элемента ниже предела обнаружения.

*Notes:* 1-3 — Sherambayskoe occurrence: 1 — chromitite HP-53-1a, 2 — chromitite HP-53-2, 3 — listwanite HP-53-3; 4 — Sarusakkulskoe occurrence, chromitite HP-115-1; 5 — East-Sarusakkulskoe occurrence, chromitite HP-118-26; 6–8 — South-Sarusakkulskoe occurrence, chromitite HP-217; N — number of analyses; dash — below limit of detection.

### Рис. 8. Вариации состава хромшпинелидов в хромититах и лиственитах меланжевой зоны Нуралинского массива

Примечание: а — диаграмма Mg#[Mg/(Mg+Fe<sup>+2</sup>)]— Сг#[Сг/(Cr+Al)]; б — диаграмма Al–Cr–Fe<sup>+3</sup>, расчет по коэффициентам в формуле; 1–2 — Шерамбайское рудопроявление (HP-53): 1 — хромититы, 2 — листвениты; 3 — Сарусаккульское (HP-115); 4 — Восточно-Сарусаккульское (HP-118); 5 — Южно-Сарусаккульское (HP-217).

## Fig. 8. Compositional variations of chromian spinels in the chromitites and listwanites from mélange zone of Nurali massif

*Note:* a — Mg#[Mg/(Mg+Fe<sup>+2</sup>)]–Cr#[Cr/(Cr+Al)] diagram; 6 — Al–Cr–Fe<sup>+3</sup> diagram, all ratios were calculated using formula coefficients; 1-2 — Sherambayskoe occurrence (HP-53): 1 — chromitites, 2 — listwanites; 3 — Sarusakkulskoe (HP-115); 4 — East-Sarusakkulskoe (HP-118); 5 — South-Sarusakkulskoe (HP-217).

Геологический вестник. 2019. №1



Таблица 1

Table 1

## Средние химические составы акцессорных минералов хромититов (мас. %)

Table 2

Average	compositions	of accessor	v minerals from	chromitites	(wt.%)
					(

№ п/п	N	S	Cr	Fe	Со	Ni	Cu	As	Rh	Sb	Сумма		
1	3	36.83	0.07*	0.85	0.15	61.98	0.09	-	—	—	99.98		
2	9	34.03	0.09*	0.02	—	65.85	—	-	—	—	100		
3	5	34.41	2.12*	3.57	_	59.84		_			100		
4	17	0.03	0.35*	1.02	_	61.99	_	36.33	_	0.3	100		
5	2	_	_	0.77	_	63.63		33.48	0.21	0.48	98.55		
6	1	_	0.63*	0.48	_	50.28	_	47.14	_	1.48	100.01		
7	1	34.95	_	24.5	_	40.55					100		
8	1	40.51	_	0.65	_	58.81	0.03				100		
9	7	28.36	_	0.04	_	71.6				_	100		
10	3	28.15	_	0.29	_	71.32		-		_	99.76		
11	2	2 9.99 - 0.27 - 64.35 - 20.6 - 4.65 99.85											
	Формулы минералов												
1	$(Ni_{0.913}Fe_{0.013}Co_{0.001}Cu_{0.001}Cr_{0.001})_{0.929}S_{1.00}$												
2					(Ni <sub>1.0</sub>	$_{0.002}Cr_{0.002})_{1.0}$	${}_{54}S_{1.00}$						
3					(Ni <sub>0.945</sub> I	$Fe_{0.06}Cr_{0.037}$	$)_{1.042}S_{1.00}$						
4				(Ni <sub>4.34</sub>	$Fe_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{0.078}Cr_{$	$_{027}$ ) <sub>4.452</sub> (As <sub>1</sub>	.987Sb <sub>0.009</sub> S	0.004)2.00					
5				(Ni	$_{4.791}$ Fe $_{0.061}$ R	.h <sub>0.009</sub> ) <sub>4.860</sub> (4	$As_{1.983}Sb_{0.01}$	17) <sub>2.00</sub>					
6				(Ni	$_{10.641}Cr_{0.151}H$	$Fe_{0.107})_{10.899}$	As <sub>7.849</sub> Sb <sub>0.1</sub>	15) <sub>8.00</sub>					
7					(Ni <sub>5.0</sub>	$Fe_{3.205})_{8.2}$	${}_{39}S_{8.00}$						
8					(Ni <sub>3.15</sub> F	$e_{0.037}Cu_{0.001}$	$)_{3.188}S_{4.00}$						
9					(Ni <sub>2.2</sub>	$_{739}$ Fe <sub>0.002</sub> ) <sub>2.7</sub>	41S2.00						
10	$(Ni_{2.748}Fe_{0.012})_{2.759}S_{2.00}$												
11				(N	i <sub>8.789</sub> Fe <sub>0.039</sub>	$S_{8.768}(S_{2.488}A)$	s <sub>2.202</sub> Sb <sub>0.31</sub>	)5.00					

*Примечание:* 1–3 — миллерит; 4, 5 — орселит; 6 — маухерит; 7 — пентландит; 8 — полидимит; 9–10 — хизлевудит; 11 — Ni<sub>9</sub>(AsS),; 1, 5, 8, 10, 11 — Шерамбайское (HP-53); 2, 7, 9 — Сарусаккульское (Hp-115); 3 — Восточно-Сарусаккульское; 4, 6 — Южно-Сарусаккульское; \* — подсветка матрицы хромшпинелидов.

*Notes:* 1-3 - millerite; 4, 5 - orcelite; 6 - maucherite; 7 - pentlandite; 8 - polydimite; 9-10 - heazlewoodite; 11 - Ni<sub>9</sub>(AsS)<sub>5</sub>; 1, 5, 8, 10, 11 - Sherambayskoe (HP-53); 2, 7, 9 - Sarusakkulskoe (Hp-115); 3 - East-Sarusakkulskoe; 4, 6 - South-Sarusakkulskoe; \* - effect of spinel matrix.

Для всех изученных зерен данного минерала характерен дефицит металлов по отношению к сере (см. табл. 2). Из примесей присутствует только железо в весьма незначительном количестве. Орселит встречен в хромититах Южно-Сарусаккульского и Шерамбайского проявлений. На Южно-Сарусаккульском рудопроявлении он является основным акцессорием, для него характерны примеси железа, сурьмы и серы. Кроме данного минерала, встречено одно зерно маухерита, содержащего в виде примеси до 1.48 мас. % сурьмы. Зерна орселита с Шерамбайского рудопроявления содержат в виде примеси родий (0.21 мас. %) и сурьму (до 0.45 мас. %).

Кроме отмеченных выше минералов, в хромититах также встречены единичные выделения пентландита, полидимита, маухерита и неидентифицированный сульфоарсенид никеля, состав которого наиболее близок к формуле  $Ni_9(AsS)_5$ . В последнем зафиксированы высокие содержания сурьмы (4.65 мас. %).

Платинометальная минерализация в изученных образцах хромититов представлена очень мелкими выделениями интерметаллидов и сульфоарсенидов платиноидов, количественный анализ которых удается провести далеко не всегда. В табл. 3 приведены данные химических анализов, которые характеризуют выделения МПГ размером более 5 мкм. Из таблицы следует, что подавляющее большинство изученных зерен представлено твердыми растворами платиновых металлов с никелем, железом и медью. Наибольшее число анализов (7) относится к хромититам Сарусаккульского рудопроявления, из них 6 — твердые растворы с преобладанием тугоплавких ЭПГ и одно — сульфоарсенид никеля с высоким содержанием родия (19.59 мас. %). Из шести анализов интерметаллидов, в трех ведущая роль принадлежит осмию (Os>Ir>Ru, Pt, Pd), в двух — иридию (Ir>Ru), в одном — платине (Pt>Ir). На Шерамбайском проявлении получены данные о составе твердого раствора никеля и железа с платиноидами состава Pt > Ru > Ir и платинистой меди с примесью палладия, на Южно-Сарусаккульском — палладистой меди.

Проведенные минералого-геохимические исследования показали, что акцессорная минерализация неравномерно распределена в хромититах меланжевой зоны Нуралинского массива. Наименьшее количество акцессориев встречается в рудах Восточно-Сарусаккульского проявления, умеренные количества характерны для Шерамбайского и Южно-Сарусаккульского проявлений, а максимальное количество сульфидов обнаружено в хромититах Сарусаккульского рудопроявления.

По составу акцессориев также отмечаются различия: на Южно-Сарусаккульском проявлении встречены исключительно арсениды никеля

Таблица 3

## Химический состав минералов платиновой группы из хромититов (мас. %)

Table 3

Chemical composition of Platinum Group Minerals from chromitites (wt. %)

№ п/п	S	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Сумма
1	_	14.88	41.93	_	_	_	11.96	_	_	_	7.56	23.08	99.41
2	_	1.34	9.45	8.92	_	_	5.04	—	1.62	50.9	19.89	2.84	100
3	1.31	13.54	47.87	—	_	—	1.61	—	—	—	35.68	—	100
4	2.08	2.08 9.92 37.59 11.92 38.48 - 99.99											
5		0.45	5.73	_	0.88		6.26			61.73	24.96		100
6		17.57	50.56	1.05	_		1.52	0.69			4.88	23.74	100
7	—	9.79	28.87	—	_	—	5.45	—	—	25.34	14.08	16.45	99.98
8	_	_	_	67.52	_	_	_	_	2.42	_	_	30.06	100
9		0.9		91.58	—				7.52				100
10	13.16 - 44.92 21.9 - 19.59 99.57												
	$\Phi$ ормулы минералов												
1					Ν	Vi <sub>0.568</sub> Fe <sub>0.1</sub>	$_{212}$ Ru <sub>0.095</sub> I	$Pt_{0.094}Ir_{0.03}$	31				
2				C	s <sub>0.345</sub> Ni <sub>0.2</sub>	$_{206}Cu_{0.181}I$	$r_{0.134}Ru_{0.0}$	$_{064}$ Fe <sub>0.031</sub> P	$Pd_{0.020}Pt_{0.0}$	19			
3					]	Ni <sub>0.626</sub> Fe <sub>0</sub>	$_{187}$ Ir <sub>0.143</sub> S	$_{0.032}$ Ru $_{0.01}$	2				
4					]	Ni <sub>0.532</sub> Ir <sub>0.1</sub>	$_{67}$ Fe <sub>0.148</sub> R	$u_{0.099}S_{0.05}$	4				
5					Os <sub>0.5</sub>	$_{511}$ Ir <sub>0.205</sub> N	i <sub>0.153</sub> Ru <sub>0.09</sub>	$_{98}Zn_{0.021}F$	e <sub>0.013</sub>				
6					Ni <sub>0.632</sub> F	$e_{0.231}$ Pt <sub>0.05</sub>	$_{00}$ Ir <sub>0.019</sub> Cu	$u_{0.012}Ru_{0.012}$	$_{11}Rh_{0.005}$				
7					Ni <sub>0.4</sub>	485Fe <sub>0.173</sub> C	$Ds_{0.132}Pt_{0.0}$	$_{84}$ Ir <sub>0.073</sub> Ri	u <sub>0.053</sub>				
8						Cu <sub>0.2</sub>	$_{355}Pt_{0.126}P$	d <sub>0.019</sub>					
9	$Cu_{0.943}Pd_{0.046}Fe_{0.011}$												
10	$(Ni_{3.248}Rh_{0.811})_{4.059}(As_{1.246}S_{1.754})_{3.00}$												

*Примечание*: 1–7 — твердые растворы платиноидов с Ni, Fe, Cu; 8 — платинистая медь; 9 — палладистая медь; 10 — Rh-содержащий сульфоарсенид никеля (?); 1, 8 — Шерамбайское (HP-53); 2–7, 10 — Сарусаккульское (HP-115); 9 — Южно-Сарусаккульское (HP-217). *Notes:* 1–7 — solid solutions of PGE with Ni, Fe, Cu; 8 — Pt-containig Cu; 9 — Pd-containing Cu; 10 — Rh-containing sulfoarsenide of Ni (?); 1, 8 — Sherambayskoe (HP-53); 2–7, 10 — Sarusakkulskoe (HP-115); 9 — South-Sarusakkulskoe (HP-217).

(орселит и маухерит), тогда как в хромититах остальных рудопроявлений преобладают сульфиды (миллерит, хизлевудит). Платинометальная минерализация в наибольшем количестве представлена в хромититах Сарусаккульского проявления и носит смешанный характер с преобладанием тугоплавких элементов (Os, Ir) и платины, несколько меньшее значение имеет рутений, а палладий и родий являются редкими. На Шерамбайском рудопроявлении платинометальная минерализация преимущественно приурочена к зонам интенсивного дробления хромититов, и она также имеет смешанный характер (Pt, Ru, Pd).

Поскольку в составе МПГ преобладают тугоплавкие ЭПГ и платина, а состав рудообразующих хромшпинелидов изученных проявлений близок к таковому из хромититов рудных тел, локализованных в мантийном разрезе массива, можно предположить, что все изученные рудопроявления первоначально также размещались в дунитовых телах среди мантийных перидотитов. Тектоническое перемещение и связанные с ним процессы низкотемпературного метаморфизма и гидротермальных преобразований (серпентинизация, родингитизация, лиственитизация) привели к структурной перестройке хромититовых тел и минералого-геохимическим изменениям. Структурная перестройка заключалась в изменении морфологии тел, формировании зон дробления и брекчиевидных текстур. Вещественные изменения выразились в высвобождении примесных элементов (Ni, Fe, Си, ЭПГ) из решетки хромшпинелидов и первичного оливина при серпентинизации и последующем дроблении в виде зерен акцессорных минералов — сульфидов, арсенидов и самородных металлов. В качестве дополнительных источников серы и мышьяка могли выступать коровые метаморфические флюиды.

### Выводы

1. Исследован состав хромититов зоны серпентинитового меланжа Нуралинского массива и показано, что рудопроявления Сарусаккульского рудного узла и Шерамбайское сложены высокохромистыми шпинелидами, близкими к таковым месторождений внутренней части мантийного разреза массива.

2. Акцессорная минерализация изученных хромититов представлена сульфидами и арсенидами никеля, из которых основная роль принадлежит миллериту, хизлевудиту, орселиту. 3. На рудопроявлениях Шерамбайское, Сарусаккульское и Южно-Сарусаккульское впервые выявлена платинометальная минерализация, представленная преимущественно твердыми растворами платиноидов с никелем, железом и медью и единичными выделениями сульфоарсенидов. По геохимическим особенностям минерализация относится к смешанному типу (Os, Pt, Ir>Ru> >Pd, Rh).

4. Формирование акцессорной минерализации и выделение платинометальных фаз было вызвано тектонической перегруппировкой материала и воздействием на хромититы низкотемпературных флюидов. Примесные элементы, первоначально входившие в состав хромшпинелидов и оливина, под действием деформаций и замещения первичного матрикса высвобождались из кристаллических решеток и образовали новые фазы.

Исследования проведены в рамках Госзадания (темы №№ 0252-2017-0014, 0246-2019-0078). Электронно-микроскопические исследования минералов ультрамафитов проведены на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

### Список литературы:

Дмитренко Г.Г., Горелова Е.М., Савельева Г.Н. Минералы платиноидов в хромитах массива Нурали (Южный Урал) // Докл. РАН. – 1992. – Т. 324, № 2. – С. 403–406.

Зайков В.В., Мелекесцева И.Ю., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Крайнев Ю.Д. Сростки минералов ЭПГ в Миасской россыпной зоне и их коренные источники // Минералогия. – 2016. – № 4. – С. 31–47.

Молошаг В.П., Смирнов С.В. Платиноидная минерализация Нуралинского гипербазит-габбрового массива (Южный Урал) // Записки РМО. – 1996. – № 1. – С. 48–54.

Савельев Д.Е., Зайков В.В., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Крайнев Ю.Д. Хромшпинелиды и акцессорная минерализация в хромититах и ультрамафитах Нуралинского массива (Южный Урал)// Записки РМО. – 2017. – № 1. – С. 59–83.

Смирнов С.В. Петрология верлит-клинопироксенитгаббровой ассоциации Нуралинского гипербазитового массива и связанное с ним платиноидное оруденение: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Екатеринбург, 1995. – 18 с.

*Grieco G., Diella V., Chaplygina N.L., Savelieva G.N.* Platinum group elements zoning and mineralogy of chromitites from the cumulate sequence of the Nurali massif (Southern Urals, Russia) // Ore Geol. Reviews. – 2007. – V. 30. – P. 257– 276. – doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.03.002.

Saveliev D.E., Ankusheva N.N. Nurali ophiolite massif the Southern Urals): geological, structural and mineralogical features // Bulletin of Perm University. Geology. – 2018. – V. 18 (3). – P. 230–253. – doi.org/10.17072/psu. geol.17.3.228.

Zaccarini F., Pushkarev E.V., Fershtater G.B., Garuti G. Composition and mineralogy of PGE-rich chromitites in the Nurali Lherzolite-gabbro complex // Canadian Mineralogist. – 2004. – V. 42. – P. 545–562. – doi.org/10.2113/gscanmin. 42.2.545.

### **References:**

*Dmitrenko G.G., Gorelova E.M., Savelieva G.N.* Platinum group minerals in chromites of the Nurali massif (the Southern Urals) // Doklady Earth Sci. 1992. V. 324. P. 403–406.

*Grieco G., Diella V., Chaplygina N.L., Savelieva G.N.* Platinum group elements zoning and mineralogy of chromitites from the cumulate sequence of the Nurali massif (Southern Urals, Russia) // Ore Geol. Reviews. 2007. V. 30. P. 257–276. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.03.002.

*Moloshag V.P., Smirnov S.V.* Platinoidnaya mineralizatsiya Nuralinskogo giperbazit-gabbrovogo massiva (Yuzhnyi Ural) [PGE mineralization of the Nurali ultramafic-gabbroic massif (the South Urals)] // Zapiski RMO. 1996. V. 1. P. 48–54 (in Russian).

*Saveliev D.E., Ankusheva N.N.* Nurali ophiolite massif (the Southern Urals): geological, structural and mineralogical features // Bulletin of Perm University. Geology. 2018. V. 18 (3). P. 230–253. doi.org/10.17072/psu.geol.17.3.228.

Saveliev D.E., Zaykov V.V., Kotlyarov V.A., Zaykova E.V., Kraynev Yu.D. Khromshpinelidy i aktsessornaya mineralizatsiya v khromititakh i ul'tramafitakh Nuralinskogo massiva (Yuzhnyi Ural) [Chromespinelides and accessory mineralization in chromitites and Ultramafites of the Nurali massif, Southern Urals] // Zapiski RMO. 2017. V. 1. P. 59–83 (in Russian).

*Smirnov S.V.* Petrologiya verlit-klinopiroksenit-gabbrovoi assotsiatsii Nuralinskogo giperbazitovogo massiva i svyazannoe s nim platinoidnoe orudenenie [Petrology of the wehrliteclinopyroxenite-gabbro association of the Nurali ultrabasite massif and associated PGE mineralization]: PhD thesis syn. Ekaterinburg: IGG UB RAS, 1995. 18 p. (in Russian).

Zaccarini F., Pushkarev E.V., Fershtater G.B., Garuti G. Composition and mineralogy of PGE-rich chromitites in the Nurali Lherzolite-gabbro complex // Canadian Mineralogist. 2004. V. 42. P. 545–562. doi.org/10.2113/gscanmin.42.2.545.

Zaykov V.V., Melekestzeva I.Yu., Kotlyarov V.A., Zaykova E.V., Kraynev Yu.D. Srostki mineralov EPG v Miasskoi rossypnoi zone i ikh korennye istochniki [Intergrowths of platinum group minerals from the Miass placer zone (the Southern Urals) and their primary sources] // Mineralogiya. 2016. V. 4. P. 31–47 (in Russian).

## Сведения об авторах:

Савельев Дмитрий Евгеньевич, доктор геол.-мин. наук, профессор АНРБ, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: savl71@mail.ru

Нугуманова Язгуль Наилевна, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: jazgul-ice@yandex.ru Гатауллин Руслан Азатович, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: RusRusu4@yandex.ru Сергеев Семен Николаевич, Федеральное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (ИПСМ РАН), г. Уфа. E-mail: semen@imsp.ru

### About the autror:

**Saveliev Dmitry Evgenievich**, doctor of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: savl71@mail.ru

**Nugumanova Yazgul Nailevna,** Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: jazgul-ice@yandex.ru

**Gataullin Ruslan Azatovich,** Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: RusRusu4@yandex.ru

Sergeev Semen Nikolaevich, Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, (IMSP RAS), Ufa. E-mail: semen@imsp.ru

УДК 550.428

DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-7

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЗЭ, ПЕТРО- И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГАББРО-ДОЛЕРИТОВ АВЗЯНСКОГО РУДНОГО РАЙОНА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2018 г. А.А. Шарипова, С.В. Мичурин, В.Н. Никонов, Е.О. Калистратова, В.М. Горожанин, А.Г. Захарова

Реферат. Изучены петрохимические и геохимические особенности интрузивных пород, встречающихся в пределах площади месторождений и рудопроявлений золота Исмакаевской и Горноприисковой рудных зон в Авзянском рудном районе Южного Урала. Габбро-долериты из рудопроявлений золота по геологическим и петрохимическим показателям несколько различаются, что послужило предыдущим исследователям основой для их выделения в разные возрастные группы — раннесреднерифейскую в Исмакаевской рудной зоне и вендскую в Горноприисковой зоне в районе рудопроявления Богряшка. В габбро-долеритах Исмакаевской рудной зоны (Улюк-Бар, Кургашлинское), установлены повышенные концентрации хрома (до ~4000 г/т), которые, вероятно, обусловлены сравнительно высокой магнезиальностью неизмененных разностей этих магматических пород. Вместе с тем габбро-долериты из рудопроявлений золота имеют близкие тренды распределения лантаноидов, сходные с таковыми в предположительно позднерифейских габбро-долеритах, развитых вне пределов рудопроявлений, а также совпадающие с графиками нормированных содержаний лантаноидов по среднерифейским интрузивным комплексам Башкирского мегантиклинория. Сходство распределения РЗЭ в магматических породах из рудопроявлений золота Авзянского рудного района позволяет высказать предположение о том, что они являются не разновозрастными образованиями, а дифференциатами одного магматического источника, образованными, вероятно, в среднерифейское время.

**Ключевые слова:** Башкирский мегантиклинорий, месторождение золота, габбро-долериты, редкие и редкоземельные элементы, рифей

## DISTRIBUTION OF REE, PETRO- AND GEOCHEMICAL FEATURES OF GABBRO-DOLERITES OF AVZYAN ORE REGION (SOUTHEN URALS)

## A.A. Sharipova, S.V. Michurin, V.N. Nikonov, E.O. Kalistratova, V.M. Gorozhanin, A.G. Zakharova

Abstract. The petrochemical and geochemical features of intrusive rocks occurring within the area of the gold deposits and ore occurrences of the Ismakaevo and Gornyi Priisk ore zones in the Avzyan ore region of the Southern Urals have been studied. The gabbro-dolerites from gold ore occurrences differ somewhat in geological and petrochemical parameters, that served the previous researchers as a basis for their isolation in different age groups — the Early Middle Riphean in the Ismakaevo ore zone and the Vendan zone in the Gornopriisk zone in the Bogryashka ore zone. In gabbro-dolerites of the Ismakaevo ore zone (Ulyuk-Bar, Kurgashlya), elevated concentrations of chromium (up to ~4000 g/t) have been established, which are probably due to the relatively high magnesia of the unchanged representatives of these igneous rocks. At the same time, gabbro-dolerites from gold ore occurrences have similar lanthanide distribution trends, similar to those in supposedly Late Riphean gabbro-dolerites, developed outside of ore gold occurrences, and also coincide with the graphs of normalized lanthanide contents of the Middle Riphean intrusive rocks of the Bashkir meganticlinorium. The similarity of the distribution of REEs in igneous rocks from the gold ores of the Avzyan ore region suggests that they are not uneven-age formations, but differentiates of a single magmatic source, probably formed in the Middle Riphean time.

Keywords: Bashkir meganticlinorium, gold deposit, gabbro-dolerite, rare and rare-earth elements, Riphean

Для цитирования: Шарипова А.А., Мичурин С.В., Никонов В.Н., Калистратова Е.О., Горожанин В.М., Захарова А.Г. Распределение РЗЭ, петро- и геохимические особенности габбро-долеритов Авзянского рудного района (Южный Урал) // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 91–100. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-7.

**For citation:** Sharipova A.A., Michurin S.V., Nikonov V.N., Kalistratova E.O., Gorozhanin V.M., Zakharova A.G. Distribution of REE, petro- and geochemical features of gabbro-dolerites of Avzyan ore region (Southen Urals) // Geologicheskii vestnik. 2019. No. ). P. 91–100. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-7.

## Введение

Геохимическая характеристика при изучении магматических образований является одной из основных задач. Широко распространенным методом генетической интерпретации геохимических данных является анализ распределения редкоземельных элементов (РЗЭ), которое контролируется их содержанием в магматическом источнике и равновесиями «минерал – расплав» [Интерпретация..., 2001]. В целом распределение редкоземельных элементов отражает степень фракционирования расплава. Мы провели изучение интрузивных пород, встречающихся в пределах площади месторождений и рудопроявлений золота Исмакаевской (Улюк-Бар, Кургашлинское) и Горноприисковой (Горный Прииск, Богряшка) рудных зон в Авзянском рудном районе, с целью сравнительного анализа их петрохимических и геохимических особенностей [Шарипова и др., 2018]. Всего изучено 20 образцов габбро-долеритов. На классификационной диаграмме в координатах «содержание кремнезема - содержание суммы щелочей» (TASдиаграмма) большинство фигуративных точек составов интрузивных пород попадают в поле габбро (рис. 1). Основная часть проб взята из коллекции А.А. Алексеева, который в пределах площади рудопроявлений золота по геологическим и петрохимическим данным выделял разновозрастные ранне-среднерифейские и вендские магматические образования. Согласно исследованиям этого автора, общими и выдержанными особенностями магматизма района являются базальтоидный характер и принадлежность его производных преимущественно к габбро-долеритовой формации, а также дайковая и силловая форма залежей, для которых почти всегда устанавливаются закаленные мелкозернистые эндоконтактовые зоны. Слагающие дайки магматические породы претерпели интенсивные изменения, связанные с неоднократным проявлением метаморфизма [Алексеев, 1984].

## Методы исследования

Содержания породообразующих окислов и некоторых редких элементов определены рентгенофлуоресцентным анализом на спектрометре VRA-30 в ИГ УФИЦ РАН (г. Уфа, аналитик В.Ф. Юлдашбаева) с использованием рентгеновской трубки с Rhанодом (30–40 кВ, 30 мА). Предел обнаружения при измерении SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составлял 0.1 мас.%, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, CaO, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, S<sub>ofill</sub> - 0.01 Mac. %, MgO - 0.2 Mac. %, As, Pb - 0.001 Mac. %.

Концентрации редких элементов (в том числе РЗЭ) определены методом ICP MS на масс-спектрометре ELAN-9000 в ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург, аналитики Н.В. Чередниченко и Н.В. Адамович). Содержания РЗЭ в габбро-долеритах нормировались на содержания лантаноидов в углеродистом хондрите С1 по [Sun, McDonough, 1989]. Аномалии Еu и Ce рассчитывались по формулам:

> $Eu/Eu^* = Eu_n/(Sm_n/(Tb_n \times Eu_n)0.5)0.5;$  $Ce/Ce^* = Ce_n/((2La_n + Sm_n)/3).$

## Результаты исследования и их обсуждение

В пределах площади рудопроявлений золота Авзянского района интрузивные породы зафиксированы главным образом в керне картировочных и поисковых скважин, бурившихся в 70-80 гг. прошлого столетия. Согласно исследованиям А.А. Алексеева [Чернов и др., 1982ф], на площади Исмакаевской рудной зоны развиты ранне-среднерифейские габбро-долериты, которые по составу неоднородны и представлены серией от меланократовых магнезиальных до кварцсодержащих габбро-долеритов. В зависимости от степени дислокационного метаморфизма они обладают массивным или сланцеватым сложением и преимущественно апо- или бластодиабазовой структурой. Кроме офитовой в них нередко наблюдаются элементы пойкилоофитовой и апогаббровой структур. Первичные минералы размером 1-4 мм почти всегда замещены метасоматическими: клинопироксен — актинолитовым амфиболом в ассоциации с хлоритом; плагиоклаз — альбитом в ассоциации с клиноцоизитом, эпидотом, серицитом; титаномагнетит — лейкоксеном, мелкозернистым сфеном в ассоциации с ксеноморфно-округлыми выделениями рутила. В породах часто присутствует гидрогранат (гроссуляр, гибшит). Отличительными петрохимическими особенностями ранне-среднерифейских габбро-долеритов являются высокие основность и магнезиальность и сравнительно низкие железистость, щелочность и титанистость  $(\leq 1.2 \text{ мас }\% \text{ TiO}_2)$ . В них повышено содержание Cr (в среднем 380 г/т по 30 образцам, полуколичественный спектральный анализ), Ni (225 г/т), Си (135 г/т) по сравнению с кларками для основных пород. По устному сообщению С.Г. Ковалева, в габбро-долеритах Исмакаевской рудной зоны содержание Cr составляет 300-500 г/т (данные ИСП МС по двум образцам).



**Рис. 1. Состав интрузивных пород Авзянского рудного района на TAS-диаграмме** *Условные обозначения:* 1— Горный прииск; 2 — Богряшка; 3 — Кургашлинское.



Согласно выводам геологов-поисковиков [Чернов и др., 1982ф], габбро-долериты Исмакаевской рудной зоны образовались ранее золотоносных кварцевых жил, которые по нашим данным [Шарипова и др., 2017], имеют позднерифейский возраст (~1000 млн лет). Мы полагаем, что формирование золотоносных кварцево-жильных систем Авзянского рудного района было обусловлено флюидной миграцией в рамках тектоно-термального (рифтогенного?) этапа в осадочном бассейне на востоке Русской платформы, который по времени совпадал с широко распространенным в других регионах мира гренвильским орогенезом. Нами в месторождении Улюк-Бар в 2017 г. отобраны образцы сильно измененных габбродолеритов, вскрытых поисковыми канавами. Они представляют собой темно-бурые ожелезненные и окварцованные хлорит-гематит-гетит-каолиниткварцевые рассланцованные аподиабазовые породы с реликтами роговой обманки. Структура диабазовая, миндалины и первичные минералы замещены кварцем, гематитом, хлоритом. По результатам микроскопического изучения установлено, что порода состоит из кварца (основной минерал) в виде отдельных зерен и зернистых агрегатов и значительного количества гидроокислов железа (по-видимому, тонкодисперсного гетита и гематита). Размер зерен кварца — 0.2–0.3 мм, зерна чистые без пойкилитовых включений. Гидроокислы железа вытягиваются в полосы, подчеркивая микроплойчатую (флюидальную) текстуру породы. Второстепенные минералы представлены хлоритом, слюдистыми (глинистыми) минералами, занимающими интерстициальное пространство между кварцем и гидроокислами железа. Хлорит часто образует гломеры размером до 0.8-1.0 мм, состоящие из прямоугольных чешуек. Плагиоклаз встречается в единичных кристаллах с полисинтетическими двойниками. Размеры кристаллов по удлинению составляют 0.5-0.8 мм. Также в хлоритглинистой с гидроокислами железа массе встречен неидентифицированный минерал. Его оптические свойства — одноосный, отрицательный, показатель преломления ~1.6-1.65, угол погасания (~10-12°), величина двупреломления не более 0.01.

В минеральном составе измененных габбродолеритов по результатам рентгенофазового анализа установлены (в %): кварц (40–50), каолинит (10–20), гетит (13–20), гематит (2–3), мусковит (2–3), титанит (1.5–3.5), клинохлор (до 1.5). В них отмечаются сравнительно высокие содержания оксидов (мас. %): Si (51.2–54.5), Al (18.1–19.7), Ti (2.1–2.3), Fe (12.5–13.1) и практически полное отсутствие окислов Mg (0.1–1.4), Са и щелочей ( $\leq$ 0.1) (табл. 1, обр. М-1016ю, М-1016-с, М-1017).

Кроме того, по результатам рентгенофлуоресцентного анализа в них фиксируются высокие содержания (в г/т) Ni (335-531), V (432-469) и значительные концентрации As (1622–1911) и Cr (1340–4362) (табл. 2). Вероятным Аs-содержащим минералом согласно результатам рентгенофазового анализа является леллингит (FeAs<sub>2</sub>). Минерал-носитель Cr не выявлен. Вынос магния, кальция, щелочей и концентрирование в породах глинозема, железа, хрома, мышьяка, очевидно, является результатом метасоматических изменений габбро-долеритов, усиленных в зоне гипергенеза. Аномально высокое для магматических пород значение ППП (потери при прокаливании) в образцах измененных габбродолеритов (М-1016ю, М-1016с, М-1017, см. табл. 1), при отсутствии в их составе карбонатных минералов, связано с разложением при высоких температурах минералов, содержащих гидроксильную группу (каолинита, мусковита, клинохлора).

Результатами полевых исследований 2018 г. явились данные по габбро-долеритам, отобранным из рудопроявления Кургашлинское (южная канава) (табл. 1, 2). Как показывают данные рентгенофлуоресцентного анализа и петрографические наблюдения, в этих породах существенно нарушен первичный баланс петрогенных окислов и широко развит комплекс вторичных минеральных образований. В частности, можно отметить высокую дисперсию в содержаниях почти всех породообразующих

## Таблица 1

# Содержание породообразующих оксидов (мас. %) в габбро-долеритах Исмакаевской рудной зоны

Table 1

The content of rock-forming oxides (wt.%) in gabbro-dolerites of the Ismakaevo ore zone

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3 общ</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	$P_2O_5$	ППП	Сумма
М-1016ю	52.44	2.30	19.66	13.11	0.11	0.15	0.11	≤0.1	0.02	0.37	10.43	98.75
M-1016c	54.54	2.07	18.05	12.48	0.43	0.64	0.11	≤0.1	0.04	0.33	9.83	98.56
M-1017	51.22	2.22	18.82	13.08	0.42	1.39	0.11	≤0.1	0.02	0.31	11.08	98.70
A-12719	52.34	2.84	13.94	12.62	0.17	7.85	1.40	0.16	2.17	0.45	5.82	99.76
M-1267	40.47	2.98	13.31	22.08	0.11	11.44	1.78	1.33	0.03	0.24	6.87	100.65
M-1277	39.34	3.44	12.78	21.19	0.15	12.26	0.88	1.11	0.04	0.27	7.89	99.36
M-1278	51.85	2.54	11.95	15.93	0.15	8.40	1.04	1.35	0.05	0.22	5.57	99.06
M-1279	32.57	3.68	15.46	23.88	0.24	11.26	2.20	1.81	0.04	0.37	7.87	99.40
M-1280	45.80	2.57	12.00	20.47	0.16	9.40	1.58	1.35	0.02	0.32	6.20	99.89
M-1281	50.12	0.99	17.44	13.71	0.09	6.12	0.66	5.10	0.03	0.23	4.57	99.07
A-13201	45.98	1.09	10.87	11.14	0.17	10.90	11.8	1.91	1.01	0.19	4.22	99.28
A-13633	47.14	1.46	13.95	11.9	0.14	8.22	9.69	2.74	0.44	0.12	3.96	99.76

*Примечания:* М-1016ю, М-1016с, М-1017, А-12719 — месторождение Улюк-Бар; А-1267–А-13633 — рудопроявление Кургашлинское. *Notes:* М-1016ю, М-1016с, М-1017, А-12719 — the Ulyuk-Bar field; А-1267–А-13633 — Kurgashlya ore occurrence.

Таблица 2

Содержание V, Cr, Ni, Cu, As (г/т) в габбро-долеритах Авзянского рудного района Table 2

Образец	V	Cr	Ni	Cu	As
М-1016ю	458.5	3858.8	458.1	119.2	1221.6
A-12719	317.1	94.4	58.7	82.9	2.4
M-1267	429.8	915.6	185.9	26.9	81.2
M-1277	465.8	924.8	178.5	44.5	39.7
M-1278	286.4	632.6	153.9	26.9	104.3
M-1279	459.6	1466.8	338.5	9.8	124.5
M-1280	340.6	988.1	333.4	94.2	218.7
M-1281	199.8	141.6	132.2	0.0	45.1
A-13201	188.7	333.8	88.7	56.1	25.7
A-13633	287.6	186.4	69.9	88.1	0.9
A-12038	318.0	77.8	54.8	155.5	5.2
A-12039	314.7	83.0	51.9	122.3	1.7
A-12042	288.7	65.3	52.2	150.6	1.8
A-12354	296.5	65.3	52.2	157.9	2.1
A-14067	90.0	78.1	28.2	23.0	4.2
A-14069	147.5	177.5	48.4	41.4	6.7
A-12790	214.5	58.7	33.5	83.1	0.9
A-12794	266.4	26.7	74.4	103	1.3

Content of V, Cr, Ni, Cu, As (g/t) in gabbro-dolerites of Avzyan ore region

элементов (за исключением кальция и калия), а также значительное возрастание в составе пород  $Fe_2O_3$  (до 23.9 мас. %) и TiO<sub>2</sub> (до 3.7 мас. %) при явной потере SiO<sub>2</sub> (до 32.6 мас. %) и K<sub>2</sub>O (до 0.02 мас. %). Следует отметить, что в дайке из рудопроявления Кургашлинское, так же как и габбро-долеритах месторождения Улюк-Бар, фиксируются аномально высокие содержания хрома, достигающие ~1500 г/т (см. табл. 2). При этом Cr здесь обнаруживает самые высокие коэффициенты корреляции с железом (0.94), TiO<sub>2</sub> (0.91) и CaO (0.85). Это указывает на то, что хром может быть связан с титанитом (хромсфеном?) и входить в него в виде примеси.

Таким образом, приведенные материалы показывают, что наиболее яркой геохимической особенностью габбро-долеритов, развитых в пределах площади Исмакаевской рудной зоны, являются повышенные концентрации хрома, которые, вероятно, обусловлены сравнительно высокой магнезиальностью наименее измененных разностей этих магматических пород. Например, в габбро-долеритах, вскрытых скв. № 7813 (обр. А-13201, А-13633) содержание MgO составляет 8.22–10.9 мас. %, а Cr — 186.4–333.8 г/т (см. табл. 1 и 2). Если рассмотреть связь хрома и магния, то она двоякая. В образцах, отобранных в пределах каждой точки наблюдения, коэффициент корреляции у этой пары положительный (Кургашлинское — 0.8; Улюк-Бар — 0.2). Однако в целом по Исмакаевской зоне, согласно данным, приведенным в таблицах 1 и 2, коэффициент корреляции между хромом и магнием отрицательный (—0.79), что обусловлено, на наш взгляд, разным содержанием этих элементов в изученных габбро-долеритах и разной степенью изменения последних.

К вендской возрастной группе А.А. Алексеев [Чернов и др., 1982ф; Алексеев, 1984] относил роговообманковые эссексит-долериты (обр. А-12041, А-14067, А-14069 табл. 3), встречающиеся только в золоторудном проявлении Богряшка Горноприисковой рудной зоны. Их наименее измененные разности представлены средне-крупнозернистыми слабопорфировидными породами гипидиоморфной структуры. Темноцветные минералы в неизмененных породах были представлены клинопироксеном, к настоящему времени полностью замещенным актинолитом в мелких пойкилитовых включениях в роговой обманке, и идиоморфной роговой обманкой (керсутит) в порфировидных выделениях. В породах присутствует апатит, ассоциирующий с кислым плагиоклазом и калишпатом. Из петрохимических черт породам этой группы

## Таблица 3

# Содержание породообразующих оксидов (мас. %) в габбро-долеритах Горноприисковой рудной зоны

Table 3

The content of rock-forming oxides (wt.%) in gabbro-dolerites of the Gornopriisk ore zone

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3 обш</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	$P_2O_5$	ППП	Сумма
A-12038	46.6	2.05	13.56	13.81	0.14	5.41	6.39	1.93	0.74	0.33	8.17*	99.13
A-12039	48.00	2.09	13.28	14.3	0.19	5.97	7.01	2.6	0.84	0.32	4.60**	99.2
A-12042	45.90	2.09	12.75	13.52	0.16	6.31	6.42	2.43	0.38	0.32	9.07***	99.35
A-12354	49.98	2.29	11.84	13.13	0.16	5.05	6.82	_	1.23	0.35	6.22	97.17
A-14067	51.31	1.98	18.55	11.23	0.07	5.08	1.76	2.88	2.79	0.29	4.01	99.95
A-14069	45.59	1.82	14.8	12.62	0.13	6.66	7.53	2.47	1.77	0.24	6.06	99.69

*Примечания:* А-12038, А-12039 — месторождение Горный прииск; А-12042, А-12354, А-14067, А-14069 — рудопроявление Богряшка. Звездочкой отмечены значения ППП с CO<sub>2</sub>: \* 3.63; \*\* 1.21; \*\*\* 4.73. Прочерк — нет данных.

*Notes:* A-12038, A-12039 — Gornyi Priisk; A-12042, A-12354, A-14067, A-14069 — Bogryashka ore occurrence. The asterisk denotes the values of the loss on ignition with  $CO_2$ : \* 3.63; \*\* 1.21; \*\*\* 4.73. Dash — no data.

присущи высокая титанистость  $(2-3 \text{ мас. }\% \text{ TiO}_2)$ , повышенная щелочность (в сумме до 5–5.5 мас. %) и пониженная известковистость [Чернов и др., 1982ф].

Вместе с тем тренды нормированных содержаний РЗЭ разновозрастных раннесреднерифейских и вендских магматических пород, установленных в пределах площади рудопроявлений золота Исмакаевской и Горноприисковой рудных зон удивительно сходны между собой (рис. 2). Все проанализированные образцы характеризуются повышенными содержаниями легких лантаноидов. В целом



Рис. 2. Диаграмма нормированных содержаний РЗЭ в габбро-долеритах, встречающихся в пределах площади месторождений и рудопроявлений золота Исмакаевской и Горноприисковой рудных зон

Fig. 2. Diagram of the normalized contents of REE in gabbro-dolerites occurring within the area of deposits and ore occurrences of the gold of Ismakaevo and Gornopriisk ore zones

распределение РЗЭ характеризуется сильным фракционированием легких лантаноидов относительно тяжелых La<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub> — 5.06—14.59, Sm<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub> — 1.93—5.41. При этом легкие и тяжелые редкие земли фракционированы примерно одинаково: La<sub>n</sub>/Sm<sub>n</sub> — 2.35—

4.00,  $Gd_n/Yb_n - 1.65-4.22$ . Еи аномалия слабо положительная.

Для сравнительного анализа на диаграмму нанесены данные по двум образцам габбро-долеритов (обр. А-12790, А-12794, табл. 4), отобранных

### Таблица 4

# Содержание некоторых редких элементов и РЗЭ (г/т) в габбро-долеритах Авзянского рудного района

Table 4

## The content of some rare elements and REE (g/t) in gabbro-dolerites of Avzyan ore region

Элементы Образцы	М-1016ю	A-12719	A-13201	A-13633	A-12038	A-12039	A-12042	A-12354	A-14067	A-14069	A-12790	A-12794
Cs	0.19	0.39	10.52	0.40	1.05	0.84	1.36	4.53	2.92	1.66	0.56	2.37
Rb	1.10	33.86	59.76	12.08	14.82	14.00	9.46	34.85	66.66	28.30	40.40	92.69
Ba	6.72	193.47	221.85	81.70	210.18	221.25	97.55	320.13	940.17	934.01	241.31	717.66
Th	1.82	1.80	2.85	0.76	1.65	1.56	1.48	1.59	9.74	4.38	4.39	1.39
U	1.42	0.47	0.97	0.21	0.41	0.39	0.39	0.41	2.58	1.59	1.05	0.36
Та	0.51	1.46	0.97	0.36	1.35	1.21	1.22	1.09	1.75	1.38	0.67	1.02
Nb	8.68	26.23	16.58	6.08	24.82	22.14	23.03	19.39	28.92	24.24	12.28	19.78
Sr	3.05	8.49	463.66	155.99	112.88	268.76	236.45	219.78	134.83	276.76	169.74	610.98
Hf	2.37	2.73	1.99	1.67	2.17	2.58	2.10	1.95	4.01	3.13	3.40	3.08
Zr	98.62	143.49	89.19	80.25	121.82	129.02	115.99	115.27	227.20	167.48	169.34	159.17
Y	22.12	18.23	15.82	18.79	23.19	21.71	18.70	15.48	24.55	19.18	28.16	18.34
La	15.43	23.65	20.16	5.98	22.38	20.48	21.37	22.32	45.24	28.19	20.39	29.21
Ce	33.55	56.16	45.78	15.37	50.87	46.28	48.89	50.90	93.39	60.88	44.99	65.16
Pr	4.35	7.16	5.76	2.25	6.54	6.07	6.26	6.56	10.76	7.56	5.55	8.33
Nd	18.18	29.46	22.89	10.35	27.34	25.34	25.74	26.96	39.30	29.19	22.87	33.80
Sm	3.80	6.09	4.84	3.02	5.92	5.44	5.49	5.69	7.07	5.75	5.28	6.76
Eu	1.03	2.03	1.63	1.25	1.85	1.85	1.80	1.77	2.20	1.93	1.65	2.29
Gd	4.37	6.35	5.08	3.45	6.40	5.82	5.72	5.85	7.52	6.03	5.97	7.09
Tb	0.57	0.72	0.60	0.57	0.81	0.74	0.69	0.66	0.83	0.70	0.84	0.76
Dy	3.56	3.89	3.23	3.51	4.55	4.14	3.82	3.45	4.65	3.73	5.10	3.95
Но	0.74	0.71	0.60	0.70	0.87	0.80	0.73	0.61	0.89	0.70	1.01	0.70
Er	2.27	1.95	1.61	1.94	2.36	2.23	1.92	1.58	2.53	1.90	2.90	1.76
Tm	0.34	0.25	0.20	0.27	0.32	0.30	0.25	0.22	0.36	0.26	0.41	0.23
Yb	2.19	1.52	1.25	1.70	1.88	1.83	1.57	1.31	2.20	1.60	2.62	1.36
Lu	0.37	0.21	0.15	0.24	0.24	0.25	0.21	0.19	0.33	0.21	0.37	0.17
∑РЗЭ	90.75	140.15	113.78	50.6	132.33	121.57	124.46	128.07	217.27	148.63	119.95	161.57
Lan/Ybn	5.06	10.58	10.92	2.40	8.07	7.60	9.26	11.62	13.95	11.96	5.29	14.59
Smn/Ybn	1.93	4.36	4.20	1.94	3.42	3.23	3.81	4.74	3.49	3.91	2.19	5.41
Lan/Smn	2.62	2.42	2.60	1.24	2.36	2.35	2.43	2.45	4.00	3.06	2.41	2.70
Gdn/Ybn	1.65	3.38	3.28	1.65	2.75	2.57	2.95	3.62	2.76	3.05	1.84	4.22
Ce/Ce*	1.06	1.14	1.10	1.06	1.09	1.08	1.10	1.10	1.06	1.08	1.06	1.09
Eu/Eu*	0.88	1.09	1.09	1.14	1.00	1.07	1.06	1.04	1.04	1.09	0.96	1.12

*Примечания:* А-12790, А-12794 — габбро-долериты, отобранные в 1–1.5 км западнее рудопроявления Кургашлинское, Привязка остальных образцов указана в примечании к табл. 1 и 3.

*Notes:* A-12790, A-12794 — gabbro-dolerites, selected 1-1.5 km west of the Kurgashlya ore occurrence. Binding of the remaining samples is indicated in the note tabl. 1 and 3.

А.А. Алексеевым западнее Караташского разлома вне пределов площади рудопроявлений золота, приблизительно в 1—1.5 км на запад от рудопроявления Кургашлинское. Эти образцы характеризуются распределением лантаноидов, аналогичным с их распределением в габбро-долеритах из рудопроявлений золота (см. рис. 2). По геологическим и петрохимическим показателям А.А. Алексеев относил их к позднерифейской возрастной группе, которая, по его представлениям, наиболее широко развита в пределах Авзянского рудного района.

Некоторые отличия в трендах появляются в образцах А-13633 и М-1016ю габбро-долеритов Исмакаевской рудной зоны. От всех образцов М-1016ю отличается наличием хорошо проявленной отрицательной Еи аномалии, вместе с тем в нем сохраняется общий отрицательный уклон тренда при незначительном положительном наклоне от Dy до Lu. Этот образец габбро-долерита



Рис. 3. Спайдер-диаграмма нормированных микроэлементов в габбродолеритах, встречающихся в пределах площади месторождений и рудопроявлений золота Исмакаевской и Горноприисковой рудных зон

Fig. 3. Spider-diagram of normalized microelements in gabbro-dolerites occurring within the area of deposits and ore occurrences of the gold of Ismakaevo and Gornopriisk ore zones

Геологический вестник. 2019. №1

наиболее сильно изменен вторичными метасоматическими и гипергенными процессами и с этой точки зрения его отличие в распределении РЗЭ от других образцов довольно легко объяснимо.

В образце А-13633 распределение лантаноидов отличается умеренным фракционированием легких земель относительно тяжелых (La<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub> — 2.40). В области легких редких земель тренд имеет горизонтальный вид, что отражают низкие величины La<sub>n</sub>/Sm<sub>n</sub> — 1.24. Тренд тяжелых лантаноидов имеет слабый наклон (Gd<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub> — 1.65).

По наиболее значимым элементам для генетической интерпретации исследуемых пород были построены спайдер-диаграммы (рис. 3), в которых измеренные концентрации элементов нормированы к их содержанию в примитивной мантии по [McDonough et al., 1991]. На спайдер-диаграмме содержания более подвижных крупноионных литофильных элементов (LILE) (Cs, Rb, Ba, K, Sr)

> могут зависеть от поведения флюидной фазы и характера вторичных процессов, тогда как содержания менее подвижных высокозарядных элементов (HFSE) (Y, Hf, Zr, Ti, Nb, Ta) контролируются составом источника и зависят от различных процессов, происходящих в ходе магматической эволюции [Интерпретация..., 2001]. Так как магматические породы из месторождений и рудопроявлений золота Авзянского рудного района подвергались вторичным изменениям, тренды распределения LILE в пробах различаются. Одинаково ведет себя Sr, образуя отрицательные аномалии (за исключением обр. А-12794, А-13201), при этом содержния Sr напрямую зависят от степени измененности пород. Его минимальное содержание приходится на образец М-1016ю из наиболее измененного габбродолерита, в котором в отличие от других проб также наблюдается сильное обеднение по Ва, К и обогащение U. Почти для всех проб долеритов характерна положительная аномалия по Nd (выпадают из тренда образцы А-12794 и А-13201) и отрицательная аномалия по Hf. В ряде проб (М-1016ю, A-13201, A-12354, A-14067, A-14069, A-12790, А-12794) наблюдаются максимум по La и тантал-ниобиевый минимум, что обычно свойственно надсубдукционным магматитам [Интерпретация..., 2001].

> Проведенное изучение особенностей габбро-долеритов, развитых в пределах пло

щади месторождений и рудопроявлений золота Авзянского рудного района, позволяет сделать следующие выводы.

Габбро-долериты по геологическим и петрохимическим показателям несколько различаются, что послужило основой для их выделения А.А. Алексеевым [1984] в разные возрастные группы — ранне-среднерифейскую в Исмакаевской рудной зоне и вендскую в Горноприисковой зоне (Богряшка). Согласно нашим данным, наиболее яркой особенностью габбро-долеритов, развитых в Исмакаевской рудной зоне (Улюк-Бар, Кургашлинское), являются повышенные в них концентрации хрома, которые, вероятно, обусловлены сравнительно высокой магнезиальностью неизмененных разностей этих магматических пород. Обогащение даек хромом за счет его привноса из вмещающих терригенных пород не подтверждается, поскольку в песчаниках большеинзерской свиты вблизи даек, по нашим данным (n=13), фиксируются околокларковые содержания Cr (~30 г/т), сходные с концентрациями этого элемента в песчаниках этого стратиграфического интервала за пределами рудной зоны.

Вместе с тем габбро-долериты из рудопроявлений золота имеют близкие между собой тренды распределения лантаноидов, сходные с таковыми в предположительно позднерифейских габбро-долеритах, развитых вне пределов площади рудопроявлений, а также совпадающие с графиками нормированных содержаний лантаноидов по среднерифейским интрузивным комплексам Башкирского мегантиклинория [Ферштатер, Холоднов, 2016]. Сходство распределения РЗЭ в магматических породах Авзянского рудного района позволяет высказать предположение о том, что они являются не разновозрастными образованиями, а, вероятно, дифференциатами одного магматического источника, и образованы приблизительно в одно время. Из этого следует, что, возможно, габбро-долериты в рудопроявлениях золота Авзянского рудного района имеют среднерифейский возраст.

Анализ спайдер-диаграммы по редким и некоторым редкоземельным элементам в целом показывает их одинаковое распределение в габбро-долеритах Авзянского района с некоторыми значительными отличиями в области LILE, обусловленными степенью метасоматических изменений.

#### Список литературы:

Алексеев А.А. Рифейско-вендский магматизм западного склона Южного Урала. – М.: Наука, 1984. – 136 с. Интерпретация геохимических данных / Под ред. Е.В. Скляровой: Учеб. пособие. – М: Интермет Инжиниринг, 2001. – 288 с.

Феритатер Г.Б., Холоднов В.В. Геохимия среднерифейских интрузивных пород Башкирского антиклинория — индикаторов начала формирования Палеоуральского океана // Ежегодник–2015 / ИГГ УрО РАН. – Екатеринбург, 2016. – С. 129–133. – (Тр. ИГГ УрО РАН; Вып. 163).

Шарипова А.А., Мичурин С.В., Крупенин М.Т., Гараева А.А., Канипова З.А. Жильный кварц из рудопроявлений золота в рифейских отложениях Авзянского рудного района (Южный Урал): минералогические и термокриометрические особенности // Вестник Пермского университета. Геология. – 2017. – Т. 16, № 3. – С. 216–232.

Шарипова А.А., Мичурин С.В., Никонов В.Н., Калистратова Е.О., Горожанин В.М. Геохимические особенности и распределение РЗЭ в габбро-долеритах Авзянского рудного района (Южный Урал) // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий: Сб. статей 6-й Всерос. молодеж. геол. конф., Уфа, 25–29 сент. 2018 г. – СПб: Свое издательство, 2018. – С. 144–148.

*McDonough W.F., Sun S., Ringwood A.E., Jagoutz E., Hofmann A.W.* K, Rb and Cs in the Earth and Moon and the evolution of the Earth's mantle // Geochim. and Cosmochim. Acta. – 1991. V. 56. – P. 1001–1012.

*Sun S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication. – 1989. – No. 42. – P. 313–345.

#### **References:**

*Alekseev A.A.* Rifeisko-vendskii magmatizm zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala [Riphean-Vendian magmatism of the western slope of the South Urals]. M.: Nauka, 1984. 136 p. (In Russian).

*Fershtater G.B., Holodnov V.V.* Geohimiya srednerifeiskih intruzivnyh porod Bashkirskogo antiklinoriya — indikatorov nachala formirovaniya Paleoural'skogo okeana [Geochemistry of Middle Riphean intrusive rocks of the Bashkir anticlinorium indicators of the beginning of the formation of the Paleourals Ocean] // Ezhegodnik–2015 / IGG UrO RAS. Ekaterinburg, 2016. P. 129–133. (Publication IGG UrO RAS; Is. 163). (In Russian).

Interpretaciya geohimicheskih dannyh [Interpretation of geochemical data]: Uchebnoe Posobie / *E.V. Sklyarova (ed.)*. M: Intermet Inzhiniring, 2001. 288 p. (In Russian).

*McDonough W.F., Sun S., Ringwood A.E., Jagoutz E., Hofmann A.W.* K, Rb and Cs in the Earth and Moon and the evolution of the Earth's mantle // Geochim. and Cosmochim. Acta. 1991. V. 56. P. 1001–1012.

Sharipova A.A., Michurin S.V., Krupenin M.T., Garaeva A.A., Kanipova Z.A. Zhil'nyi kvarts iz rudoproyavlenii zolota v rifeiskih otlozheniyah Avzyanskogo rudnogo raiona (Yuzhnyi Ural): mineralogicheskie i termokriometricheskie osobennosti [Quartz veins from Gold Occurrences in Riphean Deposits of the Avzyan Ore Region (South Urals): mineralogical and thermocryometric features] // Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 2017. T. 16, № 3. P. 216–232. (In Russian). Sharipova A.A., Michurin S.V., Nikonov V.N., Kalistratova E.O., Gorozhanin V.M. Geohimicheskie osobennosti i raspredelenie RZE v gabbro-doleritah Avzyanskogo rudnogo raiona (Juzhnyi Ural) [Geochemical features and distribution of REE in gabbro-dolerites of Avzyansky ore district (Southern Urals)] // Geologiya, geoekologiya i resursnyi potentsial Urala i sopredel'nyh territorii: Sbornik statei VI Vserossiiskoi molodezhnoi geologicheskoi konferencii, Ufa, 25–29 sent. 2018 g. [Geology, geoecology and resource potential of the Urals and adjacent territories: Collection of articles of the VI All-Russian Youth Geological Conference, Ufa, September 25–29, 2018]. Saint-Peterburg: Svoe izdatel'stvo, 2018. P. 144–148. (In Russian).

*Sun S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication. 1989. No. 42. P. 313–345.

## Сведения об авторах:

Шарипова Айсылу Азатовна, Институт Геологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: aysyluazatovna@mail.ru

Мичурин Сергей Васильевич, канд. геол.-мин. наук, Институт Геологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: s\_michurin@mail.ru

Никонов Владимир Николаевич, Индивидуальный Предприниматель Бобров Александр Георгиевич (ИП Бобров А.Г.), г. Уфа. E-mail: nikon-ufa@mail.ru

Калистратова Евгения Олеговна, общество с ограниченной ответственностью «РН-Башкирский научно-исследовательский и проектный институт нефти» (ООО РН-БашНИПИнефть), г. Уфа. E-mail: pindyurinaevgeniya@mail.ru

**Горожанин Валерий Михайлович,** канд. геол.-минер. наук, Институт Геологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: Gorozhanin@ufaras.ru

Захарова Анна Геннадиевна, Башкирский государственный университет (БашГУ), г. Уфа; Институт Геологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: anna\_zakharova.ig@mail.ru

### About the authors:

Sharipova Aisylu Azatovna, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: aysyluazatovna@mail.ru

**Michurin Sergey Vasil'evich**, candidate of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: s michurin@mail.ru

Nikonov Vladimir Nikolaevich, individual entrepreneur Bobrov Alexander Georgievich (IP Bobrov A.G.), Ufa. E-mail: nikon-ufa@mail.ru

Kalistratova Evgeniya Olegovna, Limited Liability Company "RN-Bashkir Research and Design Institute of Petroleum" (LLC "RN-BASHNIPINEFT"), Ufa. E-mail: pindyurinaevgeniya@mail.ru

**Gorozhanin Valerii Mihailovich**, candidate of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: Gorozhanin@ufaras.ru

**Zakharova Anna Gennadievna**, Bashkir State University (BSU), Ufa; Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: anna\_zakharova.ig@mail.ru

УДК 552.086

DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-8

## МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ БОЛЬШЕИНЗЕРСКОЙ И СУРАНСКОЙ СВИТ НИЖНЕГО РИФЕЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ШЛИХОВОГО ОПРОБОВАНИЯ

## © 2018 г. А.Г. Захарова, С.В. Мичурин, А.А. Шарипова

Реферат. Приводятся результаты минералогического и геохимического изучения аллювиальных отложений большеинзерской (руч. Бзяк) и суранской свит (руч. Караелга). В минеральном составе установлен кварц (преобладает), полевой шпат, эпидот, каолинит, мусковит, доломит и акцессорные минералы (гетит, гематит, рутил, титанит, магнетит, пирит, монацит, циркон, флюорит). Сравнительный анализ геохимических особенностей цирконов различных типов из суранской и большеинзерской свит показывает, что они гетерогенны. Наиболее обогащены Th и U округлые цирконы красного цвета из аллювиальных отложений суранской свиты. Величина Th/U отношения в них изменяется от 0.13 до 0.50, в цирконах гиацинтового типа — 0.47-1.78. Вместе с тем полученные немногочисленные данные по цирконам красного цвета из отложений большеинзерской свиты показывают, что они геохимически (отсутствие U, Y, низкие концентрации Th) отличаются от цирконов красного цвета из аллювиальных отложений суранской свиты. В аллювиальных отложениях суранской свиты выявлены сравнительно высокие содержания Zr, Co, Cr, Ni, Zn, Pb, Y, а также РЗЭ, которые в сумме составляют около 600 г/т. Наиболее вероятными минералами концентраторами лантаноидов являются апатит и монацит. В аллювиальных отложениях руч. Караелга впервые обнаружено золото, в котором установлена высокая пробность (около 940) и Аи/Аg отношение, в среднем равное 16.5, что несколько отличается от состава золота из коренных месторождений и рудопроявлений Авзянского рудного района в Ямантауском антиклинории.

Ключевые слова: большеинзерская свита, суранская свита, минералогический состав, циркон, элементы-примеси, золото

## MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF THE BOLSHEINZER AND SURAN FORMATIONS OF THE LOWER RIPHEAN (SOUTHERN URALS) ON THE RESULTS OF SCHLICH SAMPLING

## A. G. Zakharova, S. V. Michurin, A. A. Sharipova

Abstract. The results of the mineralogical and geochemical study of alluvial deposits of the Bolsheinzer (Bzyak stream) and Suran Formations (Karaelga stream) are presented. Quartz (predominant), feldspar, epidote, kaolinite, muscovite, dolomite and accessory minerals (goethite, hematite, rutile, titanite, magnetite, pyrite, monazite, zircon, fluorite) are found in the mineral composition. A comparative analysis of the geochemical characteristics of various types of zircons from the Suran and the Bolsheinzer Formations shows that they are genetically heterogeneous. The most rich in Th and U are rounded red zircons from the alluvial deposits of the Suran Formation. The Th/U ratio in them varies from 0.13 to 0.50, and in zircons of hyacinth colour -0.47-1.78. At the same time, the few data obtained on red zircons from the deposits of the Bolsheinzer Formation show that they are geochemically (absence of U, Y, low Th concentrations) differ from the red zircons from the alluvial deposits of the Suran Formation. In the alluvial sediments of the Suran Formation, relatively high contents of Zr, Co, Cr, Ni, Zn, Pb, Y, and also REE, which in total amount make up about 600 g/t, were revealed. The most likely minerals for lanthanide concentrators are apatite and monazite. Gold was first found in alluvial sediments of the Karaelga stream, in which a high assay (about 940) and Au/Ag ratio was found, on average equal to 16.5, which is slightly different from the composition of gold from primary deposits and ore manifestations of the Avzyan ore region in the Yamantau anticlinorium.

Keywords: Bolsheinzer suite, Suran suite, mineralogical composition, zircon, impurity elements, gold

Для цитирования: Захарова А.Г., Мичурин С.В., Шарипова А.А. Минералогия и геохимия большеинзерской и суранской свит нижнего рифея (Южный Урал) по результатам шлихового опробования // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 101—112. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-8.

**For citation:** Zakharova A.G., Michurin S.V., Sharipova A.A. Mineralogy and geochemistry of the Bolsheinzer and Suran Formation of the lower Riphean (Southern Urals) on the results of schlich sampling // Geologicheskii vestnik. 2019. No. 1. P. 101–112. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-8.

## Введение

Нижнерифейские образования широко распространены на Южном Урале. В южной части Башкирского мегантиклинория в составе нижнего рифея выделяют (снизу вверх) большеинзерскую, суранскую и юшинскую свиты, являющиеся возрастными аналогами соответственно айской, саткинской и бакальской свит, развитых в его северной части [Козлов и др., 1989]. Породы нижнерифейских свит простираются в субмеридиональном направлении и занимают обширную территорию свыше 1000 км<sup>2</sup>. Вместе с тем, несмотря на их значительную мощность и площадь выходов, только в единичных публикациях с той или иной степенью детальности затрагиваются вопросы их минералогии и геохимии [Сергеева, 1982; Гареев, 1989; Ларионов, 1990; Мичурин и др., 2014]. Большинство этих работ было опубликовано около 20-30 лет назад на основе приближенно-количественного спектрального анализа, значительно уступающего по точности современным аналитическим методам.

Мы провели минералогическое и геохимическое изучение шлиховых проб, отобранных из аллювиальных отложений ручьев Бзяк и Караелга, которые дренируют породы большеинзерской свиты и отложения бердагуловской подсвиты суранской свиты соответственно. Ручьи являются правыми притоками р. Бол. Авзян и протекают севернее д. Исмакаево. Целью исследований являлось сопоставление минералого-геохимических особенностей аллювиальных отложений большеинзерской и суранской свит нижнего рифея на основе современных методов исследования. Кроме того, одной из задач являлась оценка золотоносности аллювиальных отложений ручьев, поскольку они впадают в р. Бол. Авзян, известную своими золотоносными россыпями, расположенными к югу от д. Исмакаево.

## Геологическое положение

Большеинзерская свита подразделяется на нижнюю, среднюю и верхнюю подсвиты [Козлов и др., 1989; Маслов и др., 1998]. Нижняя подсвита (мощность 220 м) представлена кварцевыми мелкозернистыми песчаниками с прослоями доломитов, известняков и углеродисто-глинистых сланцев. Средняя подсвита (мощность 1150 м) сложена кварцевыми и полевошпат-кварцевыми среднезернистыми песчаниками с прослоями (0.1–0.2 м) углеродисто-глинистых сланцев, кварцевых алевролитов и мелкогалечных конгломератов. Верхняя подсвита (мощность 780 м) представлена переслаиванием кварцевых песчаников, доломитов и углеродисто-глинистых сланцев.

Суранская свита в нижней и верхней частях разреза сложена карбонатными породами, в средней — сланцами, алевролитами и песчаниками. Она подразделяется (снизу вверх) на миньякскую, бердагуловскую, ангастакскую, сердаукскую и лапыштинскую подсвиты [Козлов и др., 1989; Маслов и др., 1998]. Миньякская подсвита (мощность 300-400 м) сложена преимущественно доломитами и известняками с маломощными прослоями низкоуглеродисто-глинистых и глинистых сланцев. Бердагуловская подсвита (мощность 400-550 м) представлена глинистыми, низкоуглеродисто-глинистыми и карбонатно-низкоуглеродисто-глинистыми сланцами с прослоями известняков и доломитов. Ангастакская подсвита (мощность 200-650 м) сложена кварцевыми алевролитами, глинистыми и серицит-кварцевыми сланцами, мергелями с прослоями известняков и доломитов. Сердаукская подсвита (мощность 200-600 м) представлена преимущественно глинистыми и низкоуглеродистоглинистыми сланцами, алевролитами с прослоями известняков и доломитов. Лапыштинская подсвита (мощность 200-550 м) сложена известняками и доломитами с прослоями алевролитов, мелкозернистых песчаников и низкоуглеродисто-глинистых сланцев (рис. 1).

### Методы исследования

Пробы М-1001 (руч. Бзяк) и М-1008 (руч. Караелга) отобраны из неглубоких закопушек в местах отмели. Вес отобранных и просеянных (-5 мм) проб составлял около 20–25 кг. После этого они были промыты в лотках до серого шлиха весом около 0.4–0.5 кг. Затем их разделили на две части, одну из которых подвергли минералогическому анализу, а другую истерли и отправили на геохимическое изучение.

Минералогический анализ проводился по стандартной методике и включал выделение отдельных классов [Бакулина, 2014]. После разделения в бромоформе проб М-1001 (200.3 г) и М-1008 (177.7 г) выделены легкая и тяжелая фракции. Легкая фракция преобладает в обеих пробах и составляет 97.4 и 70.5 мас. % соответственно. В тяжелой фракции выделены магнитная и немагнитная части. В результате разделения



## Рис. 1. Геологическая схема отложений нижнего рифея в районе д. Исмакаево (по [Ларионов, 2003]) и места отбора шлиховых проб из ручьев Бзяк и Караелга

*Условные обозначения*: 1-7 -отложения нижнего рифея, свиты: 1-2 -большеинзерская, подсвиты: 1 -средняя ( $\mathbf{RF}_1 bi_2$ ), 2 -верхняя ( $\mathbf{RF}_1 bi_3$ ); 3-5 -суранская, подсвиты: 3 -миньякская ( $\mathbf{RF}_1 sr_1$ ), 4 -бердагуловская ( $\mathbf{RF}_1 sr_2$ ), 5 -ангастакская ( $\mathbf{RF}_1 sr_3$ ); 6-7 -юшинская, подсвиты: 6 -вязовская ( $\mathbf{RF}_1 js_1$ ), 7 -багарыштинская ( $\mathbf{RF}_1 js_2$ ); 8-12 -отложения среднего рифея, свиты: 8-11 -машакская, подсвиты: 8 -кузъелгинская ( $\mathbf{RF}_2 m \breve{s}_1$ ), 9 -казавдинская ( $\mathbf{RF}_2 m \breve{s}_2$ ), 10 -быковская ( $\mathbf{RF}_2 m \breve{s}_3$ ), 11 -верхняя ( $\mathbf{RF}_2 m \breve{s}_{4-8}$ ); 12 -зигальгинская ( $\mathbf{RF}_2 q \breve{s}_1$ ); 13 -четвертичные отложения (Q); 14 -дайки магматических пород; 15 -границы свит; 16 -тектонические нарушения разного порядка; 17 -места отбора проб; 18 -реки и ручьи; 19 -д. Исмакаево.

## Fig. 1. Geological scheme of sediments of the Lower Riphean in the area of the Ismakaevo village (after [Larionov, 2003]) and the place of selection of schlich samples from the Bzyak and Karaelga streams

*Legend*: 1–7 – sediments of the Lower Riphean, Formations: 1–2 – Bolsheinzer, Subformations: 1 – Middle  $(RF_1bi_2)$ , 2 – Upper  $(RF_1bi_3)$ ; 3–5 – Suran, Subformations: 3 – Minyak  $(RF_1sr_1)$ , 4 – Berdagulov  $(RF_1sr_2)$ , 5 – Angastak  $(RF_1sr_3)$ ; 6–7 – Yusha, Subformations: 6 – Vyazov  $(RF_1js_1)$ , 7 – Bagaryshta  $(RF_1js_2)$ ; 8–12 – deposits of the Middle Riphean, Formations: 8–11 – Mashak, Subformations: 8 – Kuzjelga  $(RF_2ms_1)$ , 9 – Kazavda  $(RF_2ms_2)$ , 10 – Bykov  $(RF_2ms_3)$ , 11 – Upper  $(RF_2ms_{4-8})$ ; 12 – Zigalga  $(RF_2zg_1)$ ; 13 – Quaternary sediments (Q); 14 – dikes of igneous rocks; 15 – boundaries of the Formations; 16 – tectonic disturbances of different orders; 17 – sampling sites; 18 – rivers and streams; 19 – Ismakaevo village.

на электромагните немагнитной фракции были получены электромагнитная и неэлектромагнитная фракции (табл. 1).

Геохимическое изучение включало следующие виды анализов: рентгенофлуоресцентный (РФА), атомно-абсорбционный, рентгеноспектральный с индуктивно связанной плазмой (ИСП АЭС) и определение химического состава минералов рентгено-спектральным микроанализом на растровом электронном микроскопе с энергодисперсионным спектрометром (JEOL JSM 7100F). Более подробно методика исследований описана нами ранее [Захарова и др., 2018а].

Среди новых методик следует отметить изучение монофракций рентгенофазовым анализом и микроскопические исследования с применением электронного микроскопа.

## Результаты и их обсуждение

По результатам рентгенофазового анализа определены следующие минералы (в %) в шлиховой пробе М-1001 (большеинзерская свита): кварц (90–95), анортит (2–2.5), ортоклаз — 1–1.5, каолинит — 0.9–1.3, мусковит (0.8–1.3), титанит (1–1.2) гетит (0.5–1), рутил (0.4–0.8); в пробе М-1008 (бердагуловская подсвита суранской свиты): кварц (65.0–75.0), анортит (4.0), альбит (2.0), эпидот (2–2.5), доломит (0.5–0.7), мусковит (2–2.5), монацит (0.5–0.9), флюорит (0.2–0.4), циркон (0.2–0.4), гетит (5.0), гематит (2–2.5), рутил (1–1.2), титанит (1–1.2), магнетит (0.7–1), пирит (0.5–0.7).

Общими минералами в тяжелой фракции шлиховых проб большеинзерской и суранской свит являются: циркон, рутил, пирит, флюорит, апатит, эпидот. В большеинзерской свите установлены еще ильменит и актинолит. Рентгенофазовый анализ этих минералов показал, что в составе сростков актинолита присутствуют (в %) актинолит (35–40), клинохлор (23–27), кварц (15–20), титанит (10–15), рутил (4–7), а в сростках ильменита — ильменит (70–75), хлоритоид (9–11), гематит (5–6), рутил (4–5), гетит (3–4), кварц (3–4).

В тяжелой фракции шлиховой пробы из суранской свиты установлены гетит, магнетит, гранат и золото. Описание минералов было приведено нами ранее [Захарова и др., 2018]. В количественном отношении основными акцессорными минералами в суранской свите за исключением железосодержащих минералов являются по мере увеличения содержания в пробе монацит, циркон, рутил.

Рутил в обеих свитах наблюдается в виде зерен удлиненной (столбчатой) формы с вертикальной штриховкой на гранях (призмы «карандашики»), в суранской свите иногда в коленчатых двойниках. Цвет рутилов в основном темный до черного (нигрин), реже коричневый. Размеры зерен в большеинзерской свите от  $0.18 \times 0.31$  до  $0.21 \times 0.85$  мм (преобладают  $0.52 \times 0.60$  мм); в суранской свите —  $0.19 \times 0.28$  до  $0.48 \times 0.96$  мм, преобладают зерна размером  $0.31 \times 0.69$  мм. Анализ зерен рутила в суранской свите на растровом электронном микроскопе показывает, что в его составе часто отмечается примесь Cr (0.12-0.75 мас. %), в одном случае установлена примесь Mn (0.07 мас. %).

Циркон в большеинзерской свите встречается в основном темно-красного и светло-розового цвета присутствуют редкие зерна серого цвета. Зерна округлой и сфероидальной формы с хорошей степенью окатанности. Встречаются прозрачные и полупрозрачные разности. Размер темно-красных зерен колеблется от 0.10×0.16 до 0.12×0.43 мм, преобладают зерна размером 0.16×0.19 мм. Размер светло-розовых зерен от 0.12×0.15 до 0.23×0.33 мм, преимущественно 0.15×0.23 мм.

В суранской свите циркон присутствует преимущественно в виде окатанных и полуокатанных зерен, округлой и сфероидальной формы. Размер зерен колеблется от 0.12×0.16 до 0.36×0.60 мм, преобладают зерна размером 0.24×0.31 мм. Большей частью встречаются цирконы розового и красного цвета. Изредка присутствуют цирконы темно-

Таблица 1

## Вес выделенных классов в составе тяжелой фракции проб M-1001 и M-1008 Table 1 The weight of the selected classes in the composition of the heavy fraction

of samples M-1001 and M-1008

No official	Nonversion of	немагнитная				
л⊎ ооразца	магнитная	электромагнитная	неэлектромагнитная			
М 1001 (р. Бзяк)	0.3 г (5.9 мас. %)	4.5 г (93.8 мас. %)	0.3 г (6.2 мас. %)			
М 1008 (р. Караелга)	1.6 г (3.1 мас. %)	49.0 г (96.8 мас. %)	1.6 г (3.2 мас. %)			

красного и серого цвета, иногда с лиловым оттенком. Встречаются прозрачные и полупрозрачные разности. В некоторых кристаллах наблюдаются газово-жидкие включения. В отдельных зернах отмечаются включения других минералов. Только в аллювиальных отложениях суранской свиты нами встречены призматические кристаллы циркона, которые по сравнению с окатанными цирконами встречаются реже и, вероятно, относятся к гиацинтовому типу. Подобный тип цирконов в большеинзерской свите ранее описывала Н.Д. Сергеева [1982]. Их размер колеблется от  $0.11 \times 0.26$  до  $0.17 \times 0.42$  мм. В этих удлиненных зернах просматриваются грани и в тоже время они в достаточной мере окатаны.

Изученные цирконы в свитах различаются между собой тем, что в аллювиальных отложениях суранской свиты они встречаются в большом количестве, имеют в среднем больший размер и отличаются многообразием форм и цвета по сравнению с таковыми большеинзерской свиты. Среди цирконов суранской свиты часто встречаются разновидности от темно-красного до серого цвета, среди которых присутствуют цирконы удлиненной формы со слабо выраженной огранкой. Последние отнесены нами к гиацинтовому типу.

По результатам геохимического изучения рентгенофлуоресцентным и рентгеноспектральным методами в обеих пробах выявлены высокие содержания Zr (табл. 2). Кроме того, в пробе М-1008 (суранская свита) установлены сравнительно высокие содержания Cr, Co, Ni, Zn, Pb, Y, а также редкоземельных элементов (РЗЭ), концентрация которых в сумме составляет около 600 г/т. Судя по установленному минералогическому составу шлиховой пробы, наиболее вероятными минералами концентраторами лантаноидов являются апатит и монацит. Со и Ni, как сидерофильные элементы, имеющие высокое сродство с железом, вероятнее всего, связаны с железосодержащими минералами, гетитом, гематитом и магнетитом, содержание которых, как и Fe<sub>2</sub>O<sub>зобш</sub>, в пробе довольно высокое. Исходя из результатов энергодисперсионного анализа химического состава рутила, высокие концентрации Cr в пробе могут быть связаны с этим минералом.

Нами были проанализированы зерна циркона на растровом электронном микроскопе с определением Mg, Al, Si, Cl, Ti, K, P, Ca, Sc, Mn, Fe, Se, Y, Zr, Nb, La, Ce, Nd, Hf, Ta, Th, U. В шлиховой пробе M-1008 (суранская свита) изучены удлиненные зерна циркона, отличающихся от других Химический состав шлиховых проб М-1001 и М-1008 (мас. %), содержание в них редких и редкоземельных элементов (г/т) Table 2

The chemical composition of schlich samples M-1001 and M-1008 (wt.%), the content of rare and rare earth elements (g/t)

	M-	1001	M-1008			
Окисел,		ИСП		ИСП		
элемент	ΡΦΑ	АЭС	ΡΦΑ	АЭС		
SiO <sub>2</sub>	87.60	_	73.28	_		
TiO <sub>2</sub>	0.53	0.37	1.33	0.93		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.34	2.5	4.43	3.90		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.11	2.66	11.71	17.84		
MnO	0.03	0.02	0.07	0.07		
MgO	2.08	0.52	2.46	0.82		
CaO	0.35	0.07	1.55	1.43		
Na <sub>2</sub> O	0.27	0.09	0.27	0.20		
K <sub>2</sub> O	0.54	_	0.55	_		
$P_2O_5$	0.03	0.06	0.17	0.14		
Soom	0.01	_	0.03	_		
ППП	1.09	_	3.55	_		
сумма	99.96	_	99.39	_		
Li		4.8	_	3.6		
Be			_	1.5		
Cl	30.5	_	_	_		
Sc	14.4	2.0	15.7	6.4		
V	57.2	33.3	164.3	138.8		
Cr	40.1	43.0	112.6	202.6		
Со	11.3	13.3	103.5	79.7		
Ni	_	17.7	33.0	151.8		
Cu	41.8	16.0	58.2	79.6		
Zn	7.9	4.9	77.0	97.5		
As	12.1	-	107.5	_		
Rb	37.2	-	21.1	_		
Sr	49.3	23.2	37.8	105.4		
Y	20.4	18.7	33.0	35.5		
Zr	400.3	-	654.8	—		
Nb	11.8	2.8	5.0	17.8		
Мо	—	0.7	-	0.7		
Ba	177.5	127.0	458.3	246.7		
La	_	46.1	-	146.0		
Ce	_	86.6	-	306.2		
Pr	_	10.2	_	21.8		
Nd	_	44.5	_	114.9		
Eu	_	2.5	_	7.4		
Dy	_	5.3	-	8.4		
Yb	_	0.7	_	3.9		
Pb	47.4	6.8	48.5	46.2		
∑REE	_	123.5	_	596.3		

## Геологический вестник. 2019. №1

Таблица 2

разновидностей наличием граней, которые мы условно отнесли к цирконам гиацинтового типа и цирконы красного цвета округлой формы; в пробе М-1001 (большеинзерская свита) — цирконы красного цвета.

По распределению элементов-примесей в цирконах гиацинтового типа не выявлено геохимической зональности разной направленности в отдельных зернах, что позволяет рассматривать эту разновидность цирконов как генетически единую (рис. 2 и табл. 3).

От центральной части зерен к краевой в них происходит уменьшение концентраций U и Th, увеличение содержаний Hf, Ta, Ce, а также не четко выраженное увеличение (проявленное не во всех зернах) — Nb, Nd и Y. В случае с последними двумя элементами из общей выборки выпадает одно зерно циркона, в котором наблюдается противоположная тенденция — в центральной части по сравнению с краевой он обогащен Nd и Y. Причем только в этом зерне отмечаются максимальные содержания иттрия, составляющие 1.91–3.37 мас. %. Возможно, такие большие концентрации иттрия обусловлены микровключениями ксенотима, который в качестве изоструктурной примеси довольно часто отмечается в цирконах [Краснобаев, 1986]. Отметим при этом, что Y и Nd являются единственными элементами из изученной выборки, которые обнаруживают сравнительно высокие коэффициенты корреляции с Zr, равные 0.53 и 0.48 соответственно. По содержанию La в отдельных зернах обнаруживается и прямая (увеличение содержания от ранних к поздним зонам роста кристалла) и обратная геохимическая зональность, хотя в целом он обнаруживает сильную связь с Ce (коэффициент корреляции равен 0.83), у которого фиксируется обратная зональность.

Распределение элементов-примесей в красных зернах немного отличается от цирконов гиацинтового типа (рис. 3, табл. 4). По мере роста зерна в красных зернах увеличиваются содержания Hf, Ce, Nb, Nd, La и U, что наблюдается и в цирконах гиацинтового типа, за исключением U, pacпределение которого противоположно. Отметим, что U показывает сильную связь с Се и La, коэффициенты корреляции с которыми равны соответственно 0.67 и 0.74. Распределение Th, Ta, и Y в красных зернах отвечает обратной геохимической зональности, обусловленной обеднением этих элементов в поздних генерациях циркона. Поведение двух последних элементов в красных зернах отличается от их поведения в цирконах гиацинтового типа, где наблюдается прямая геохимическая зональность. У обнаруживает высокие коэффициенты



Рис. 2. Изображение зерен цирконов гиацинтового типа под растровым электронным микроскопом и точки анализа Fig. 2. Image of grains of zircons of hyacinth type under a scanning electron microscope and points of analysis

## Таблица 3

# Состав зерен цирконов гиацинтового типа по данным изучения на растровом электронном микроскопе (мас. %)

Table 3

# The composition of grains of zircons of hyacinth type according to the study on a raster electron microscope (wt. %)

Base	1 2					3					
Точки	pt1	pt2	pt5	pt1	pt4	pt4	pt5	pt6	pt7	pt8	pt9
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.74	1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Si	11.55	11.74	11.40	21.94	22.72	22.95	23.71	23.17	23.85	20.46	24.43
0	33.29	34.08	33.90	30.94	30.21	30.43	29.46	31.23	29.37	29.63	28.75
Ca	0.00	0.00	0.00	0.03	0.50	0.11	0.06	0.16	0.13	0.00	0.01
Sc	0.08	0.00	0.14	0.12	0.10	0.09	0.13	0.00	0.08	0.24	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.14	0.35	0.00	0.04	0.06	0.23
Fe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Se	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Y	3.37	1.91	2.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	0.00
Zr	47.43	48.57	48.07	43.97	43.02	43.18	41.81	42.74	42.69	42.92	41.75
Nb	0.31	0.47	0.65	0.97	0.00	0.51	0.45	0.00	0.97	1.71	1.04
La	0.19	0.00	0.68	0.00	0.32	0.08	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00
Ce	0.42	0.00	0.65	0.00	0.20	0.20	0.00	0.02	0.15	0.00	0.16
Nd	0.05	0.56	0.00	0.00	0.12	0.01	0.00	0.15	0.16	0.45	0.00
Hf	0.43	0.49	0.81	1.62	0.80	2.12	2.14	1.03	1.85	2.97	2.33
Та	1.11	0.00	0.53	0.22	0.00	0.00	0.00	0.36	0.00	0.30	0.08
Th	0.65	0.00	0.15	0.00	0.89	0.00	1.88	0.34	0.00	0.00	0.52
U	0.37	0.94	0.31	0.15	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σ	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Base		4			5		6			
Точки	pt1	pt4	pt5	pt1	pt2	pt5	pt1	pt2	pt4	pt5
Mg	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	2.06	1.00	1.31
Si	13.71	18.36	21.05	18.22	18.97	17.63	21.57	19.45	20.47	19.98
0	34.17	29.82	29.98	32.51	32.07	32.44	29.99	31.27	31.34	31.32
Ca	0.00	1.56	1.39	0.32	1.12	0.61	0.05	0.05	0.00	0.20
Sc	0.00	0.00	0.05	0.13	0.00	0.00	0.22	0.00	0.08	0.00
Mn	0.00	0.68	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.14	0.13	0.00
Fe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Se	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Y	0.00	1.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.00	0.00
Zr	48.60	42.15	42.63	46.20	45.65	46.15	42.52	44.50	44.52	44.53
Nb	1.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.05	0.00	0.00
La	0.11	0.00	0.84	0.00	0.00	0.55	0.21	0.14	0.27	0.00
Ce	0.09	0.00	1.18	0.00	0.00	0.89	0.12	0.67	0.00	0.36
Nd	0.82	0.00	0.00	0.26	0.18	0.00	0.14	0.00	0.00	0.35
Hf	1.42	3.43	1.37	1.72	0.87	1.31	2.28	1.14	1.88	1.41
Ta	0.00	2.65	1.23	0.63	0.52	0.00	0.00	0.00	0.31	0.52
Th	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.92	0.00	0.00	0.00
U	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.83	0.04	0.00	0.00
Σ	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Геологический вестник. 2019. №1

107


Рис. 3. Изображение зерен цирконов красного цвета под растровым электронным микроскопом шлиховых проб из ручьев Караелга (а) и Бзяк (б)

Fig. 3. Image of red zircon grains under a scanning electron microscope of schlich samples from the Karaelga (a) and Bzyak (b) streams

Таблица 4

Состав зерен цирконов красного цвета шлиховых проб М-1008 и М-1001 по данным изучения на растровом электронном микроскопе (мас. %)

Table 4

# Composition of red zircon grains of schlich samples M-1008 and M-1001 according to data obtained on a scanning electron microscope (wt. %)

Проба	M-1008	M-1001	M-1001	M-1001						
Base	4			5				1		
Точки	pt1	pt2	pt5	t4	pt5	pt6	pt7	pt1	pt2	pt3
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.18	0.09	0.28	0.11	0.00	0.00	0.00	0.07	0.41	0.25
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.62
Si	16.63	23.08	23.51	21.40	21.28	21.29	17.34	14.53	12.40	14.22
Р	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	29.39	28.86	29.71	29.87	29.80	31.38	31.84	30.64	41.75	34.41
Ca	2.27	0.31	0.37	0.17	0.00	0.06	0.07	0.00	0.00	0.00
Sc	0.00	0.00	0.13	0.03	0.00	0.00	0.05	0.30	0.09	0.07
Ti	—	—	—	—	—	—	—	0.05	0.00	0.07
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.09	0.02	0.03	0.02
Fe	4.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.04	0.03
Se	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.43	0.00
Y	0.00	0.00	0.00	1.07	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zr	41.72	41.02	42.14	42.40	42.27	44.60	44.60 45.26		42.23	48.97
Nb	0.00	0.00	1.12	0.00	0.00	0.00	0.90	2.97	0.00	0.00
La	0.15	0.33	0.00	0.09	0.43	0.00	0.42	0.40	0.17	0.05
Ce	0.00	0.55	0.00	0.34	0.41	0.00	0.01	0.14	0.12	0.00
Nd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.16	0.47	0.17	0.00	0.00
Hf	2.05	1.53	2.26	1.99	2.30	1.74	1.76	0.81	2.35	0.96
Та	1.33	0.00	0.50	0.18	0.00	0.08	0.05	_	-	_
Th	0.68	0.48	0.00	2.36	0.00	0.00	0.46	0.22	0.00	0.34
U	1.38	3.76	0.00	0.00	2.68	0.69	1.27	0.00	0.00	0.00
Σ	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

корреляции с Th (0.65) и Ce (0.52), у которого фиксируется прямая геохимическая зональность.

Цирконы обоих сравниваемых типов из отложений суранской свиты обогащены Th и U, которые распространены в кристаллах неравномерно. Содержание Th варьирует в красных зернах от 0.46 до 2.36 мас. %, в цирконах гиацинтового типа этот диапазон несколько меньше и составляет 0.15-1.88 мас. %. Содержание U колеблется в красных цирконах от 0.69 до 3.76 мас. %, в призматических кристаллах урана содержится гораздо меньше — 0.04-1.05 мас. %. Таким образом, в суранской свите наиболее обогащены Th и U округлые цирконы красные цвета. Величина Th/U отношения в них изменяется от 0.13 до 0.50, в цирконах гиацинтового типа — 0.47—1.78, что свидетельствует о генетическом различии сравниваемых типов цирконов.

Содержания Y в цирконах гиацинтового типа составляет в среднем 0.5 мас. %, в красных зернах — 0.26 мас. %.

По распределению содержаний элементовпримесей в цирконах красного цвета из аллювиальных отложений большеинзерской свиты (M-1001) обнаруживается и прямая и обратная геохимическая зональность (см. рис. 3, табл. 4). Содержания Th и Hf увеличиваются от центра кристаллов к их краю, содержания Nb, La, Ce, Nd по мере роста кристалла уменьшаются, при этом они хорошо коррелируются друг с другом. Отметим, что Y и U присутствуют в крайне низких концентрациях, как правило, на уровне предела обнаружения, вследствие чего отношение Th/U рассчитать затруднительно. Наиболее сильная связь в цирконах красного цвета из аллювиальных отложений большеинзерской свиты отмечается между Zr и Th с коэффициентом корреляции, равным 0.96.

Вместе с тем полученные немногочисленные данные по цирконам красного цвета из отложений большеинзерской свиты показывают, что они геохимически (отсутствие U, Y, низкие концентрации Th) отличаются от цирконов красного цвета из аллювиальных отложений суранской свиты. Поскольку содержания элементов-примесей напрямую связаны с коэффициентами распределения концентраций элементов в расплаве, на данном этапе исследования полученные данные позволяют сделать вывод о том, что цирконы красного цвета из аллювиальных отложений в суранской и большеинзерской свитах имеют различный генезис.

В аллювиальных отложениях суранской свиты (обр. М-1008, руч. Караелга) найдены две пластин-

ки золота, размерами  $0.06 \times 0.18$  и  $0.07 \times 0.31$  мм. Поверхность золотин неровная, ямчатая, слабоокатанная, ноздреватая и участками дендритообразная. Состав золота: Au — 93.25—95.50 мас. % (ср. 94.27 мас. %, n=7), Ag — 4.49—6.75 мас. % (ср. 5.73 мас. %) Au/Ag отношение в среднем равно 16.5.

По химическому составу найденные пластинки Аи отличаются от золота Исмакаевской рудной зоны, от которой руч. Караелга протекает в нескольких км северо-восточнее. В золоте этой зоны, встречающемся в коренных породах, отношение Au/Ag находится стабильно на уровне 5-8 [Мичурин и др., 2018], а в золоте, найденном в коре выветривания — 27-28 [Ковалев и др. 2001]. В Горноприисковой рудной зоне, расположенной в ~10−15 км южнее исследуемого участка, отношение Au/Ag составляет более 21 [Мичурин и др., 2018], что также отличается от фиксируемого в золоте из руч. Караелга. Из приведенных материалов следует, что найденное золото по химическому составу отличается от золота из коренных рудопроявлений Авзянского рудного района и этот факт требует дополнительного изучения с привлечением большего количества аналитических данных. Измеренное Au/Ag отношение наиболее близко к таковому в золоте руч. Черный ключ или р. Сухая Кургашля [Ковалев и др., 2001], которые, однако, находятся довольно далеко за пределами района исследований (рис. 4).

### Выводы

Минералогически шлиховые пробы, отобранные из ручьев Бзяк и Караелга, которые дренируют породы большеинзерской и суранской свит нижнего рифея, представлены кварцем (преобладает), полевыми шпатами, эпидотом, каолинитом, мусковитом, доломитом и акцессорными минералами, к которым относятся гетит, гематит, рутил, титанит, магнетит, пирит, монацит, циркон, флюорит.

По результатам нашего исследования преобладающими минералами в тяжелой фракции, за исключением железосодержащих минералов, являются по мере увеличения флюорит – циркон – рутил. Однако, по данным Н.Д. Сергеевой [1989], породы нижнего рифея характеризуются турмалинрутил-циркон-апатитовой ассоциацией. Вероятно, расхождение результатов связано с тем, что мы изучали не пробы-протолочки коренных пород, а аллювиальные отложения, в которые попали акцессорные минералы не только осадочных,



Рис. 4. Химический состав Au и Ag из руч. Караелга, россыпи р. Сухая Кургашля, руч. Черный Ключ, рудопроявления Богряшка, Верхне-Авзянской россыпи и месторождения Горный Прииск

Fig. 4. The chemical composition of Au and Ag Karaelga stream, placer Suhaya Kurgashlya river, Chernyi Klyuch stream, Bogryashka ore occurrences, Verkhne-Avzyan alluvial deposit and the Gornyi Priisk deposit

но и магматических пород. На это указывает присутствие в аллювиальных отложениях суранской свиты цирконов гиацинтового типа, а также сходство геохимических трендов распределения элементов в изученных пробах с габбро-долеритами Исмакаевской рудной зоны [Захарова и др., 2018а].

Сравнительный анализ геохимических особенностей цирконов различных типов из суранской и большеинзерской свит показывает, что они гетерогенны. Наиболее обогащены Th и U округлые цирконы красного цвета из аллювиальных отложений суранской свиты. Величина Th/U отношения в них изменяется от 0.13 до 0.50, в цирконах гиацинтового типа — 0.47—1.78. Вместе с тем полученные немногочисленные данные по цирконам красного цвета из отложений большеинзерской свиты показывают, что они геохимически (отсутствие U, Y, низкие концентрации Th) отличаются от цирконов красного цвета из аллювиальных отложений суранской свиты.

По результатам геохимического изучения в пробах выявлены сравнительно высокое содержание Zr. В аллювиальных отложениях ручья Караелга обнаружено золото, в котором установлена высокая пробность (около 940) и Au/Ag отношение, в среднем равное 16.5, что несколько отличается от золота из коренных месторождений и рудопроявлений Авзянского рудного района в Ямантауском антиклинории. Находка золота севернее известных золотоносных россыпей района диктует необходимость проведения дальнейших исследований. Здесь же установлены относительно большие концентрации Co, Cr, Ni, Zn, Pb, Y, а также РЗЭ, которые в сумме составляют около 600 г/т. Наиболее вероятными минералами концентраторами лантаноидов являются апатит и монацит. Со и Ni, вероятнее всего, связаны с железосодержащими минералами (гетит, гематит, магнетит), Y — с цирконом, Cr с рутилом, в котором установлена постоянная примесь хрома на уровне 0.12–0.75 мас. %.

Исследования выполнены в рамках темы № 0252-2016-0005 государственного задания ИГ УФИЦ РАН.

### Список литературы:

Бакулина Л.П. Шлиховое опробование и анализ шлиховых проб. – Ухта: Изд-во УГТУ, 2014. – 126 с.

Гареев Э.З. Геохимия осадочных пород стратотипического разреза рифея: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / ГЕОХИ АН СССР. – М., 1989. – 24 с. Захарова А.Г., Мичурин С.В., Шарипова А.А. Минералогические и геохимические особенности отложений бердагуловской подсвиты суранской свиты нижнего рифея по результатам шлихового опробования (Южный Урал). // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Сб. статей 12-ой Межрег. науч.-практ. конф., Уфа, 21–23 мая 2018 г. – Спб: Свое издательство, 2018. – С. 227–237.

Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. Геохимия золота западного склона Южного Урала // Геология и перспективы расширения сырьевой базы Башкортостана и сопредельных территорий: Матер. IV Республ. геол. конф. – Уфа, 2001. – Т. 2. – С. 134–140.

Козлов В.И., Краснобаев А.А., Ларионов Н.Н., Маслов А.В., Сергеева Н.Д., Бибикова Е.В., Генина Л.А., Ронкин Ю.Л. Нижний рифей Южного Урала. – М.: Наука, 1989. – 81 с.

*Краснобаев А.А.* Циркон как индикатор геологических процессов. — М.: Наука, 1986. — 147 с.

Ларионов Н.Н. Карбонаты суранской свиты нижнего рифея юга Башкирского мегантиклинория // Геология докембрия Южного Урала и востока Русской плиты: Сб. статей / БНЦ УрО АН СССР. – Уфа, 1990. – С. 63–72.

Ларионов Н.Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М. 1:200000. Южно-Уральская сер. N-40-XXII (Тукан). СПб.: МПР РФ, 2003.

Маслов А.В., Гареев Э.З. Крупенин М.Т. Осадочные последовательности рифея типовой местности (ретроспективный обзор седиментологических, палеогеографических, литолого-минералогических и петрогеохимических исследований). — Уфа: Принт, 1998. — 225 с.

Мичурин С.В., Биктимерова З.Р., Канипова З.А., Даниленко С.А. Цинк в карбонатных породах суранской свиты нижнего рифея (Южный Урал) // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Матер. и докл. / 10-я Межрег. науч.-практ. конференция, Уфа, 13–15 мая, 2014 г. – Уфа: ДизайнПресс, 2014. – С. 150–154.

Мичурин С.В., Шарипова А.А., Крупенин М.Т., Замятин Д.А., Мусина А.М., Попов В.А. Сульфидная минерализация, самородное золото и его геохимические связи в рифейских отложениях Авзянского рудного района (Южный Урал) // Литосфера. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 61–81.

Сергеева Н.Д. Сопоставление айской и большеинзерской свит нижнего рифея Башкирского мегантиклинория Южного Урала по акцессорным минералам // Верхний докембрий и палеозой Южного Урала (стратиграфия и литология). – Уфа: БФАН СССР, 1982. – С. 20–26.

Сергеева Н.Д. Минералогическая корреляция верхнедокембрийских образований Южного Урала: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Свердловск, 1989. – 24 с.

### **References:**

*Bakulina L.P.* Shlihovoe oprobovanie i analiz shlihovyh prob [Schlich sampling and analysis of schlich samples]. Ukhta, Publishing house of the USTU, 2014. 126 p. (In Russian).

*Gareev E.Z.* Geohimiya osadochnyh porod stratotipicheskogo razreza rifeya [Geochemistry of sedimentary rocks of the stratotype section of Riphean] Abstract. dis. ... kand. geol.-min. sciences. Moscow: GEOKHI, 1989. 24 p. (In Russian). *Kovalev S.G., Vysotskii I.V.* Geohimiya zolota zapadnogo sklona Juzhnogo Urala [Geochemistry of gold from the western slope of the Southern Urals] // Geologiya i perspektivy rasshireniya syr'evoi bazy Bashkortostana i sopredel'nyh territorii: Materialy IV Respublikanskoi geologicheskoi konferencii [Geology and expansion prospects the raw material base of Bashkortostan and adjacent territories: Materials IV Republican Geological Conference]. Ufa, 2001. V. 2. P. 134–140. (In Russian).

Kozlov V.I., Krasnobaev A.A., Larionov N.N., Maslov A.V., Sergeeva N.D., Bibikova E.V., Genina L.A., Ronkin Ju.L. Nizhnii rifei Juzhnogo Urala [Lower Riphean of the Southern Urals]. M: Nauka, 1989. 81 p. (In Russian).

*Krasnobaev A.A.* Cirkon kak indikator geologicheskih processov [Zircon as an indicator of geological processes]. M.: Nauka, 1986. 21(147) p. (In Russian).

*Larionov N.N.* Karbonaty suranskoi svity nizhnego rifeya juga Bashkirskogo megantiklinoriya [Carbonates of the Suran suite of the Lower Riphean of the south of the Bashkir meganticlinorium] // Geologiya dokembriya Juzhnogo Urala i vostoka Russkoi plity [Geology of the Precambrian of the Southern Urals and the East of the Russian Plate]: Collection of articles / BNC Urals Academy of Sciences of the USSR. Ufa, 1990. P. 63–72. (In Russian).

*Larionov N.N.* Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj Federacii. M. 1:200000. Juzhno-Ural'skaja ser. N-40-XXII (Tukan) [State geological map of the Russian Federation. M 1:200000. South Urals ser. N-40-XXII (Tukan))]. Spb.: Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, 2003. (In Russian).

*Maslov A.V., Gareev E.Z. Krupenin M.T.* Osadochnye posledovatel'nosti rifeya tipovoi mestnosti (retrospektivnyi obzor sedimentologicheskih, paleogeograficheskih, litologo-mineralogicheskih i petrogeohimicheskih issledovanii) [Sedimentary sequences of Riphean typical terrain (retrospective review of sedimentological, paleogeographic, lithological, mineralogical and petrogeochemical studies)]. Ufa: Print, 1998. 225 p. (In Russian).

*Michurin S.V., Biktimerova Z.R., Kanipova Z.A., Danilenko S.A.* Cink v karbonatnyh porodah suranskoi svity nizhnego rifeya (Juzhnyi Ural) [Zinc in carbonate rocks of the Suran suite of the Lower Riphean (Southern Urals)] // Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredel'nyh territorii [Geology, minerals and geoecology problems of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories]: Materials and reports / 10th Interregional Scientific and Practical Conference. Ufa, May 13–15, 2014. Ufa: DesignPress, 2014. P. 150–154. (In Russian).

*Michurin S.V., Sharipova A.A., Krupenin M.T., Zamjatin D.A., Musina A.M., Popov V.A.* Sul'fidnaja mineralizacija, samorodnoe zoloto i ego geohimicheskie svjazi v rifejskih otlozhenijah Avzjanskogo rudnogo rajona (Juzhnyj Ural) [Sulphide mineralization, native gold and its geochemical relationships in the Riphean deposits of the Avzyan ore region (Southern Urals)] // Lithosphere. 2018. V. 18, No. 1. P. 61–81. (In Russian).

*Sergeeva N.D.* Sopostavlenie aiskoi i bol'sheinzerskoi svit nizhnego rifeya Bashkirskogo megantiklinoriya Juzhnogo Urala po akcessornym mineralam [Comparison of the Ai and Bolsheinzer suites of the Lower Riphean of the Bashkir Meganticlinorium of the Southern Urals along Accessory Minerals] // Verhnii dokembrii i paleozoi Juzhnogo Urala (stratigrafiya i litologiya) [Upper Precambrian and the Paleozoic of the Southern Urals (stratigraphy and lithology)]. Ufa: BFAN USSR, 1982. P. 20– 26. (In Russian).

*Sergeeva N.D.* Mineralogicheskaya korrelyaciya verhnedokembriiskih obrazovanii Juzhnogo Urala [Mineralogical Correlation of Upper Precambrian Formations of the Southern Urals]: Abstract of. dis. ... kand. geol.-miner sci. Sverdlovsk, 1989. 24 p. (In Russian).

Zaharova A.G., Michurin S.V., Sharipova A.A. Mineralogicheskie i geohimicheskie osobennosti otlozhenii berdagulovskoi podsvity suranskoi svity nizhnego rifeya po rezul'tatam shlihovogo oprobovaniya (Juzhnyi Ural) [Mineralogical and geochemical features of sediments of the Berdagul Subformation of the Suran Formation of the Lower Riphean according to the results of schlich sampling (Southern Urals)] // Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredel'nyh territorii: Sbornik statei 12-oi Mezhregional'noi nauchno-prakticheskoi konferencii, Ufa, 21–23 may 2018 g. [Geology, mineral resources and problems of geoecology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories: Collection of articles of the 12th Interregional Scientific and Practical Conference, Ufa, May 21–23, 2018]. Ufa, 2018. P. 227–237. (In Russian).

### Сведения об авторах:

Захарова Анна Геннадиевна, Башкирский государственный университет (БашГУ), г. Уфа; Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: anna\_zakharova.ig@mail.ru

Мичурин Сергей Васильевич, канд. геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: s michurin@mail.ru

Шарипова Айсылу Азатовна, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: aysyluazatovna@mail.ru

### About the authors:

Zakharova Anna Gennadievna, Bashkir State University (BSU), Ufa; Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: anna\_zakharova.ig@mail.ru

**Michurin Sergey Vasilyevich,** candidate of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: s\_michurin@mail.ru

Sharipova Aisylu Azatovna, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: aysyluazatovna@mail.ru

УДК: 550.384+537.621.4

DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-9

# ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ ИНТРУЗИВНЫХ ТЕЛ РУБЕЖА РАННЕГО – СРЕДНЕГО РИФЕЯ БАШКИРСКОГО МЕГАНТИКЛИНОРИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ): ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ПАЛЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

### © 2019 г. А.В. Латышев, М.Б. Аносова, А.О. Хотылев

Реферат. В работе изложены результаты палеомагнитных и петромагнитных исследований рифейских интрузивных тел Башкирского мегантиклинория. По 8 маломощным интрузиям рассчитан новый палеомагнитный полюс для рубежа раннего – среднего рифея Восточно-Европейской платформы (1349±11 млн лет): P<sub>lat</sub>=8.4°; P<sub>long</sub>=162.4°; A<sub>95</sub>=4.1°. Нами приводятся доводы в пользу первичности остаточной намагниченности и отсутствия значительных тектонических дислокаций в районе изученных интрузий. Также по 11 интрузивным телам рассчитан полюс позднепалеозойского синколлизионного перемагничивания. Сравнение средних палеомагнитных направлений, полученных по разным районам исследования, указывает на отсутствие значимых относительных перемещений блоков в регионе в позднепалеозойское время. Интерпретация результатов измерений анизотропии магнитной восприимчивости в интрузиях демонстрирует значительную роль зон разрывных нарушений при внедрении магматического расплава. Показано, что Бакало-Саткинский региональный разлом в конце раннего – начале среднего рифея действовал как долгоживущая магмоподводящая зона, контролируя формирование Бердяушского массива гранитоидов рапакиви и дайковых тел. Ключевые слова: палеомагнетизм, Башкирский мегантиклинорий, Южный Урал, рифей, дайковые комплексы, анизотропия магнитной восприимчивости, траектория кажущейся миграции полюса, палеотектонические реконструкции

# PALEOMAGNETISM OF THE EARLY-MIDDLE RIPHEAN INTRUSIONS FROM THE BASHKIRIAN MEGAZONE (THE SOUTHERN URALS): IMPLICATIONS FOR THE PALEOTECTONIC RECONSTRUCTIONS OF THE EAST EUROPEAN CRATON

### A.V. Latyshev, M.B. Anosova, A.O. Khotylev

Abstract. We present the results of the detailed paleomagnetic and rock-magnetic investigation of the Riphean intrusions from the Bashkirian meganticlinorium (Southern Urals). The new paleomagnetic pole for the boundary of the Lower and Middle Riphean of the East European Craton  $(1349\pm11 \text{ Ma})$  is calculated from 8 thin sheet intrusions.  $P_{lat}=8.4^\circ$ ;  $P_{long}=162.4^\circ$ ;  $A_{95}=4.1^\circ$ . Arguments in favor of the primary origin of the remanence and the absence of significant tectonic dislocations near the sampled intrusions are discussed. Besides, from 11 intrusive bodies we obtained the pole of Late Paleozoic syn-collisional remagnetization. The comparison of mean paleomagnetic directions for the different studied regions demonstrates the absence of any traces of essential rotation of blocks within the Bashkirian megazone in the Later Paleozoic. Analysis of the anisotropy of magnetic susceptibility revealed the significant role of the shear zones during the emplacement of intrusions. It was shown that the regional Bakal-Satka shear acted as the long-lived magma feeder zone and controlled the emplacement of the Berdyaush rapakivi pluton and dikes in the Lower – Middle Riphean.

**Keywords:** Paleomagnetism, Bashkirian meganticlinorium, Southern Urals, Riphean, dike swarms, anisotropy of magnetic susceptibility, apparent polar wander path, paleotectonic reconstructions

Для цитирования: Латышев А.В., Аносова М.Б., Хотылев А.О. Палеомагнетизм интрузивных тел рубежа раннего – среднего рифея Башкирского мегантиклинория (Южный Урал): значение для палеотектонических реконструкций Восточно-Европейской платформы // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 113–132. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-9.

**For citation:** Latyshev A.V., Anosova M.B., Khotylev A.O. Paleomagnetism of the Early-Middle Riphean intrusions from the Bashkirian megazone (the Southern Urals): Implications for the paleotectonic reconstructions of the East European craton // Geologicheskii vestnik. 2019. No. 1. P. 113–132. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-9.

### Введение

Исследование докембрийских магматических образований Башкирского мегантиклинория (Башкирской мегазоны) Южного Урала представляет исключительный интерес по нескольким причинам. Во-первых, именно на этой территории был выделен стратотип рифея, поэтому детальная расшифровка истории развития региона и уточнение возрастных границ основных стратиграфических подразделений имеет глобальное значение. Рифейские магматические комплексы, распространенные в пределах мегантиклинория, обеспечивают возможность возрастной привязки. Во-вторых, неоднократные проявления магматизма в рифее на западном склоне Урала связываются с этапами рифтогенеза на Восточно-Европейской платформе и маркируют периоды распада суперконтинентов [Ernst et al., 2006; Puchkov et al., 2013]. В связи с этим восстановление пространственно-временной эволюции каждого из магматических событий крайне важно для глобальных палеотектонических реконструкций. Наконец, для этой же цели необходима максимально детальная и надежная информация о положении Восточно-Европейской платформы в рифее. Многочисленные базитовые тела Башкирского мегантиклинория представляют собой потенциальные объекты для получения такой информации на базе палеомагнитных данных.

На настоящий момент в рифейской истории Башкирского мегантиклинория зафиксировано несколько магматических событий. Наиболее масштабным эпизодам магматизма в стратиграфической последовательности рифейских отложений отвечают айская свита, залегающая в основании нижнего рифея, а также машакская и кувашская свиты, маркирующие основание среднего рифея. Кроме того, на северо-востоке мегантиклинория распространены вулканиты терминального рифея [Пучков, 2010]. Помимо стратифицированных вулканитов, в пределах мегантиклинория известны многочисленные комагматичные им интрузивные тела, отнесенные к различным комплексам. Рифейские интрузии представлены, с одной стороны, крупными многофазными массивами (Бердяушский, Кусино-Копанский и др.), и с другой стороны, мелкими базитовыми дайковыми телами. Несмотря на длительную историю изучения дайковых комплексов [Алексеев, 1984; Носова и др., 2012; Ковалев и др., 2015; Хотылев и др., 2017], временные границы каждого из этапов магматической активности, а также пространственные масштабы их проявления требуют уточнения; кроме того, отнесение конкретных интрузивных тел к тому или иному комплексу часто является проблематичным.

Несмотря на обилие объектов, перспективных для палеомагнитных исследований, получение надежных палеомагнитных данных по западному склону Урала связано с рядом сложностей. Наиболее остро стоит проблема позднепалеозойского синколлизионного перемагничивания, широко проявленного по всей территории Башкирского мегантиклинория и Южного Урала в целом (например, [Шипунов, 1993; Свяжина и др., 2003; Иосифиди и др., 2012]). Кроме того, если учитывать, что породы мегантиклинория с рифейского времени претерпели по меньшей мере два этапа тектогенеза — вендский и позднепалеозойский [Пучков, 2010], при анализе палеомагнитных данных всегда следует иметь в виду возможность вращений отдельных блоков относительно друг друга. Это обуславливает сложности при доказательстве первичности остаточной намагниченности и возможности использования палеомагнитных результатов, полученных по породам Башкирского мегантиклинория, для Восточно-Европейской платформы, даже при наличии данных, отвечающих современным аппаратурно-методическим требованиям надежности [Павлов, Галле, 2009; Голованова и др., 2011; Levashova et al., 2015]. Что касается рифейских интрузивных тел, то авторам известно лишь одно определение, полученное с использованием современной методики палеомагнитных исследований [Лубнина, 2009]. Тем не менее, палеомагнитный полюс, приведенный в цитируемой работе, получен по ограниченному количеству пространственно удаленных и разнородных объектов с различным или вовсе не определенным изотопным возрастом. Учитывая все вышесказанное, на данный момент имеет место нехватка надежных палеомагнитных данных по рифейским магматическим телам региона.

В рамках данной работы решались следующие задачи:

1. Получение надежных палеомагнитных данных по рифейским базитовым интрузиям Башкирского мегантиклинория и анализ возможности их использования для разработки траектории кажущейся миграции полюса Восточно-Европейской платформы.

2. Измерения анизотропии магнитной восприимчивости для реконструкции направления движения магматического расплава и поиска локальных центров магматизма. 3. Изучение петролого-геохимических характеристик опробованных магматических тел для отнесения их к известным дайковым комплексам и определения условий формирования магм.

### Объекты исследования

Опробованные магматические тела расположены в трех районах: в окрестностях городов Бакал и Куса, а также пос. Бердуяш (западная часть Челябинской области). В тектоническом плане все изученные интрузии приурочены к осевой зоне северной части Башкирского мегантиклинория и локализованы к востоку от Бакало-Саткинского разлома (рис. 1). Интрузивные тела представлены маломощными (0.5–2 м) дайками, реже — более крупными телами неправильной формы и силлами (5–14 м), прорывающими нижнерифейские отложения бакальской и саткинской свит. На основании такой геологической позиции, а также петрографических, геохимических характеристик (см. ниже) и изотопных датировок большая часть интрузий отнесена нами к ранне-среднерифейскому машакскому этапу магматизма, хотя исключить возможность иного возраста отдельных тел полностью мы не можем. В Башкирском мегантикли-



Рис. 1. Геологическая схема района исследований

*Цифрами в легенде обозначены:* Стратифицированные нерасчлененные отложения: 1 — раннего палеозоя; 2 — перми; 3 — карбона; 4 — девона; 5 — силура – девона, 6 — рифея; 7 — протерозой; 8 — архейский тараташский комплекс. Рифейские свиты Башкирского мегантиклинория: 9 — зильмердакская; 10 — зигазино-комаровская; 11 — зигальгинская; 12 — бакальская; 13 — саткинская; 14 — айская. Плутонические комплексы: 15 — ордовикские ультрамафиты зоны ГУР; 16 — среднекаменноугольные гранитоиды, 17 — среднерифейские габброиды; 18 — среднерифейские гранитоиды; 19 — среднерифейские сиениты и нефелиновые сиениты.

### Fig. 1. The sketch geological map of the study area

*Legend:* Undifferentiated stratified deposits: 1 – Lower Paleozoic; 2 – Permian; 3 – Carboniferous; 4 – Devonian; 5 – Silurian-Devonian; 6 – Riphean; 7 – Proterozoic; 8 – Archean Taratash complex. Riphean Formations of the Bashkirian megazone: 9 – Zilmerdak; 10 – Zigazino-Komarovo; 11 – Zigalga; 12 – Bakal; 13 – Satka; 14 – Ai. Plutonic complexes: 15 – Ordovician ultramafic rocks of the Main Uralian fault; 16 – granites of the Middle Carboniferous; 17 – Middle Riphean gabbro; 18 – Middle Riphean granites; 19 – Middle Riphean syenites and nepheline-bearing syenites.

нории известны кургасский и юшинский базитовые дайковые комплексы [Алексеев, 1984; Хотылев и др., 2017]. Ниже в тексте при описании опробованных интрузий мы будем придерживаться названия «кургасский комплекс», следуя работе [Хотылев и др., в печати].

Возраст кургасского комплекса обоснован несколькими прецизионными датировками:

1. Дайка в районе пос. Бердяуш — 1349±11 млн лет (U-Pb, SHRIMP II, циркон; [Хотылев и др., в печати]).

2. Силл в г. Куса — 1360±9 млн лет (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, биотит; [Эрнст и др., 2008]).

3. «Главная Бакальская дайка» в г. Бакал — 1385.3±1.4 млн лет (U-Pb, ID TIMS, бадделеит; [Ernst et al., 2006]).

4. Шток в районе г. Куса — 1318±10 млн лет (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, биотит; [Хотылев и др., в печати]).

Подробному обсуждению этих данных будет посвящена специальная работа [Хотылев и др., в печати]. Нужно отметить, что первые две из указанных датировок получены по интрузиям, проанализированным в настоящей работе, а остальные — по телам, пространственно близким к нашим объектам.

В районе г. Бакал были опробованы 7 даек и тел неясной морфологии, прорывающих алевролиты, песчаники и доломиты нижнерифейской бакальской свиты (сайты 1–9 в табл. 1). Вмещающие породы близ контакта, как правило, смяты в пологие складки, однако в отдельных обнажениях близ г. Бакал залегают субвертикально. Большая часть интрузий характеризуется северо-восточными простираниями, что типично для дайковых комплексов Башкирской мегазоны [Хотылев и др., 2017].

В районе пос. Бердяуш объектами исследования явились 11 интрузивных тел, секущих гранитоиды рапакиви восточной части Бердяушского массива и его экзоконтактовую зону. Ориентированные образцы отбирались из 9 даек в карьере к югу от пос. Бердяуш (сайты 16-1—16-9 в табл. 1), прорывающих мраморизованные доломиты саткинской свиты и апофизы гранитоидов Бердяушского массива; кроме того, были опробованы дайка в рапакиви к северу от ж/д Москва—Челябинск (сайт 10) и субвертикально залегающий силл в кальцифирах экзоконтактовой зоны массива (сайт 11).

Мраморный карьер к югу от пос. Бердяуш заслуживает более подробного описания, поскольку именно по объектам из этой локации были получены ключевые палеомагнитные данные (см. ниже), а также уникальная геологическая информация. Карьер вскрывает экзоконтактовую зону восточной части Бердяушского массива. Вмещающие доломиты нижнерифейской саткинской свиты здесь смяты в реидные складки, мраморизованы, местами превращены в кальцифиры. В доломитах встречаются апофизы гранитоидов мощностью 30-70 см, деформированные с образованием птигматитовых складок вместе с вмещающими породами. Гранитоиды подверглись существенной метасоматической переработке; на контакте с доломитами часто обнаруживаются скарноиды. И доломиты, и апофизы гранитоидов прорываются серией из 8 параллельных маломощных субвертикальных даек долеритов ЗСЗ простирания (Аз пр 270-300°; сайты 16-1-16-8 в табл. 1). Дайки имеют ровные прямолинейные контакты, не подвержены пластическим деформациям, затронувшим вмещающие породы; в них фиксируются лишь отдельные смещения по малоамплитудным сдвигам северо-восточного простирания. Кроме того, в мраморизованных доломитах встречена еще одна дайка, существенно более измененная по сравнению с остальными и, в отличие от них, полого падающая на восток (Аз пд 71°, угол 46°). По одной из опробованных даек (сайт 16-1) недавно был получен U-Pb возраст 1349±11 млн лет, указанный выше.

В районе г. Куса были опробованы 3 силлоподобных тела, полого падающих на юго-восток конформно вмещающим породам саткинской и айской свит нижнего рифея (сайты 19–21). Видимая мощность силлов 5–8 м. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar возраст в 1360±9 млн лет, приведенный выше [Эрнст и др., 2008], был получен по силлу в сайте 19-1.

### Методика

Отбор ориентированных образцов для палеомагнитных исследований производился вручную, их ориентировка в пространстве — с помощью магнитного компаса, с постоянным контролем возможного влияния сильномагнитных пород на стрелку компаса. Привязка каждой точки отбора осуществлялась с помощью GPS-приемника. Из каждого сайта было отобрано от 8 до 18 образцов. Общее количество ориентированных образцов из 21 сайта составило около 270. Величина местного магнитного склонения рассчитывалась по модели IGRF. Лабораторные палеомагнитные исследования и обработка результатов магнитных чисток выполнялись в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН. Все образцы были подвергнуты ступенчатой температурной чистке до полного размагничивания (8–17 шагов), которое достигалось в большинстве случаев при температурах 540-620°С. Для размагничивания образцов использовались немагнитные печи «ММТД-80» с величиной нескомпенсированного поля не более 5-10 нТл. Остаточная намагниченность образцов измерялась при помощи спин-магнитометра JR-6 AGICO или криогенного магнитометра 2G Enterprises. Обработку измерений остаточной намагниченности выполняли при помощи пакетов программ Enkin [Enkin, 1994] и Remasoft [Chadima, Hrouda, 2006], использующих при выделении компонент намагниченности метод компонентного анализа [Kirschvink, 1980]. Анализ полученных данных производился с использованием статистики Фишера [Fisher, 1953]. Измерения анизотропии магнитной восприимчивости проводились на каппометре MFK-1FA компании AGICO. Обработка измерений выполнялась в программе Anisoft 4.2 с использованием статистических методов, описанных в работе [Jelínek, 1978]. При анализе эллипсоида анизотропии магнитной восприимчивости использовались параметры Рі (корректированная степень анизотропии) и Т (параметр формы эллипсоида) [Jelínek, 1981].

### Петрографическая и геохимическая характеристика

Петрография. Большая часть исследованных тел по данным оптической микроскопии представлена габбро-долеритами и долеритами с пойкилоофитовой и долеритовой структурой (рис. 2а). По размеру кристаллов структура варьирует от мелко- до среднезернистой в зависимости от мощности интрузива и расстояния от контакта. В состав породы входят плагиоклаз (содержание в основном 40-55%), клинопироксен (30-50%) и рудные минералы, представленные магнетитом и/или титаномагнетитом (5-10%). В телах в районе г. Кусы встречается также первичномагматический биотит (5-10%). Вторичные изменения выражены типичными минералами зеленосланцевой фации метаморфизма: хлоритом, актинолитом и серицитом, а также биотитом, развивающимся по клинопироксену. В мелких дайках и эндоконтактовых зонах крупных силлов встречаются редкие миндалины, выполненные хлоритом, актинолитом и кальцитом. Наибольшая степень вторичных изменений проявлена в дайке из сайта 16-9, в которой исходные долериты практически полностью замещены

карбонатными минералами, по-видимому, в ходе взаимодействия с вмещающими доломитами саткинской свиты.

Чертами, характерными для кургасского комплекса, в изученных интрузиях являются: 1) относительно свежий облик пород и низкая степень развития вторичных минералов в сравнении с более древними комплексами; 2) слабый плеохроизм клинопироксена в бледно-розово-зеленоватых тонах; 3) пойкилоофитовые структуры с прорастанием субидиоморфных удлиненно-призматических кристаллов плагиоклаза через крупные ксеноморфные зерна клинопироксена [Хотылев и др., 2017; Хотылев и др., в печати]

Геохимия. Детальная геохимическая характеристика тел кургасского комплекса приведена в работе [Хотылев и др., в печати]. Следует отметить наличие среди опробованных интрузий как низко-, так и высокотитанистых габброидов (0.5-1.6% и 1.8–2.7% TiO<sub>2</sub> соответственно), при этом содержание титана в целом увеличивается с юга на север, от г. Бакал к г. Куса. Что касается распределения элементов-примесей, в интрузивах всех районов исследования обнаруживается обеднение Ta-Nb, обогащение Pb, а также менее четко выраженный минимум по Zr-Hf. При этом в районе г. Бакал большинство анализов по степени обогащения несовместимыми элементами близки к E-MORB, в районе г. Куса — к OIB, а в пос. Бердяуш присутствуют оба геохимических типа (рис. 2б). Важно подчеркнуть, что среди серии маломощных близкорасположенных параллельных даек в сайте 16 близ пос. Бердяуш присутствуют как базиты, близкие к E-MORB, так и OIB-подобные разности, без пород промежуточного состава. Таким образом, не только внутри одного комплекса, но даже в течение одного магматического события могли формироваться дайки, существенно различающиеся по спектрам элементов-примесей. Причины вышеописанной геохимической зональности в поле распространения кургасского комплекса обсуждаются в работе [Хотылев и др., в печати].

### Палеомагнетизм

Результаты компонентного анализа намагниченности. В образцах, представляющих интрузивные тела в районе пос. Бердяуш, качество палеомагнитного сигнала варьирует от отличного до практически неинтерпретируемого. Тем не менее характеристические компоненты намагниченности, позволяющие рассчитать средние по сайту палеомагнитные направления, были выделены во всех объектах. Во всех телах встречается низкотемпературная компонента, которая, как правило, разрушается к 250–300°С и имеет направления, часто близкие к современному магнитному полю, хотя и характеризующиеся значительным разбросом. Эта компонента, по нашему мнению, имеет вязкую природу и не обсуждается далее.

Во всех сайтах выделяется высокотемпературная характеристическая компонента остаточной



### Рис. 2. Петролого-геохимическая характеристика изученных интрузий

А — фото долеритов сайта 16 (пос. Бердяуш) в шлифе (слева — в скрещенных николях, справа — в одном николе). Pl — плагиоклаз; Срх — клинопироксен; Мt — магнетит, Chl — хлорит. Б — распределение элементов-примесей в исследованных интрузиях. Нормировано на примитивную мантию. Стандарты N-MORB, E-MORB, OIB — по [Sun, McDonough, 1989].

### Fig. 2. Petrographic and geochemical features of the studied intrusions

A - dolerites from the site 16 (Berdyaush settlement) in the thin section (on the left – crossed nicols; on the right – parallel nicols). Pl – plagioclase; Cpx – clinopyroxene; Mt – magnetite; Chl – chlorite. B – Spectra of the trace elements in the studied intrusions. Normalized to primitive mantle; N-MORB, E-MORB, OIB standards from – [Sun, McDonough, 1989].

намагниченности (HT), которая имеет юго-западные склонения и низкие наклонения. Эта компонента, как правило, изолируется в температурном интервале 500–600°С (иногда до 620°С) в сайтах 16-1–16-8 (рис. 3а); в интервале 460–600°С в сайтах 10, 11. Образцы дайки из сайта 16-9, как правило, полностью размагничиваются к температурам 350–400°С (рис. 3в), либо при дальнейших нагревах начинаются новообразования магнитных минералов, которые делают невозможным интерпретацию палеомагнитной записи.

Кроме того, во многих образцах выделена также среднетемпературная компонента намагни-

ченности (МТ), которая разблокируется в диапазоне температур 350—500 °С, характеризуется югозападными склонениями, обратной полярностью и более высокими наклонениями по сравнению с высокотемпературной компонентой (рис. 3б). Несмотря на то, что эта компонента присутствует в отдельных образцах в большинстве тел, близость направлений к высокотемпературной компоненте, а также, возможно, частичное перекрытие спектров их деблокирующих температур затрудняют ее выделение. В связи с этим среднее направление компоненты МТ удалось надежно рассчитать только в сайте 16-6 (табл. 1).

Таблица 1

### Среднесайтовые палеомагнитные направления для опробованных интрузий

Table 1

Сайт	Координаты	n/N	Dg, °	Ig, °	K	$\alpha_{95}, ^{\circ}$					
Бердяушский район											
11	N55°09'14.00" E59°08'24.67"	12(15)	256.1	-10.5	16.4	11.1					
16-1	N55.12830° E59.12668°	9(15)	258.3	4.4	58.4	6.8					
16-2	N55.12830° E59.12668°	14(14)	248.8	14	31.7	7.2					
16-3	N55.12830° E59.12668°	7(10)	253.1	-14.1	53.3	8.3					
16-4	N55.12830° E59.12668°	6(8)	258.3	0.5	21.9	14.7					
16-5	N55.12830° E59.12668°	9(12)	252.2	5.6	44.6	7.8					
16-7	N55.12830° E59.12668°	8 (8)	250.3	2.5	93.4	5.8					
16-8	N55.12830° E59.12668°	6(8)	257.5	6.8	53.6	9.2					
Среднее направление по инт	рузиям Бердяушского района	8	254.3	1.2	66.4	6.8					
16-6	N55.12830° E59.12668°	9(10)	254.9	-23.9	27.6	10					
10	N55°09'23.51" E59°07'41.44"	14(16)	246.6	-32.1	36.5	6.7					
16-9	N55.12830° E59.12668°	5(10)	284.2	-7.2	52.1	10.7					
16-6MT	N55.12830° E59.12668°	7(10)	229.2	-38.6	57.4	8					
	Бакальский	район									
1	N54° 56' 58.80" E58° 47' 58.80"	15(15)	212.4	-18.2	71.1	4.6					
2	N54° 57' 22.90" E58° 52' 53.90"	8(15)	218.9	-30.5	10	18.4					
5	N54° 55' 40.84" E58° 54' 03.39"	11(12)	217.9	-34.4	28.8	8.7					
6	N54° 51' 20.60" E58° 57' 38.30"	13(13)	247.4	-43.8	28	8					
7	N54° 55' 32.10" E58° 59' 41.20"	3(8)	225.5	-46.2	86.6	13.3					
8	N54° 55' 44.30" E58° 59' 22.80"	13(14)	219.8	-46.2	28.8	7.9					
9	N54° 55' 41.70" E58° 58' 36.10"	9(12)	231.2	-40.6	53.3	7.1					
Среднее направление по инт	рузиям Бакальского района	7	223.9	-37.6	35.1	10.3					
	Кусинский район										
19-1	N55° 19' 19.07" E59° 26' 36.97"	13(18)	229.8	-44.8	12.5	12.2					
20	N55° 24' 24.16" E59° 27' 32.10"	5(13)	223.6	-34.5	17.4	18.8					
21	N55° 21' 27.10" E59° 30' 13.60"	4(15)	227.7	-45.6	40.5	14.6					
Среднее направление по инт	рузиям Кусинского района	3	226.9	-41.7	149.1	10.1					

### Site-mean paleomagnetic directions for the sampled intrusions

Примечания:  $n/N - количество образцов/сайтов, по которым рассчитано среднее (в скобках – общее количество образцов); Dg, Ig – склонение и наклонение в географической системе координат; К – кучность, <math>a_{95}$  – доверительный интервал. *Notes:* n/N – number of samples/sites used in the calculation (the total number of samples analyzed is shown in brackets); Dg, Ig – declination

*Notes*:  $n/N = number of samples/sites used in the calculation (the total number of samples analyzed is shown in brackets); Dg, Ig = declination and inclination in the geographic coordinate system; K = concentration parameter; <math>a_{95}$  = confidence ratio.



Рис. 3. Результаты температурной чистки: типичные стереограммы и диаграммы Зийдервельда [Zijderveld, 1967] А — образец 217, сайт 16-1, Бердяуш. Б — образец 284, сайт 16-6, Бердяуш. В — образец 307, сайт 16-9, Бердяуш. Г — образец 118, сайт 9, Бакал. На стереограммах: залитые кружки — нижняя полусфера, полые кружки — верхняя полусфера. Система координат географическая. М/Мтах — отношение магнитного момента при данной температуре к максимальному; Т — температура; NRM естественная остаточная намагниченность.

### Fig. 3. Results of the thermal demagnetization: the typical stereographic and Zijderveld diagrams [Zijderveld, 1967]

A – sample 217, site 16-1, Berdyaush. B – sample 284; site 16-6, Berdyaush. C – sample 307, site 16-9, Berdyaush. D – sample 118; site 9, Bakal. On the stereographic diagrams: filled circles – lower hemisphere; empty circles – upper hemisphere. Geographic coordinate system. M/Max – magnetic moment at the given temperature/maximal magnetic moment ratio; T – temperature; NRM – natural remanent magnetization.

Средние палеомагнитные направления по сайтам 11, 16-1-16-5, 16-7, 16-8 образуют тесный кластер (рис. 4а), что свидетельствует о формировании намагниченности соответствующих даек, а также силла из сайта 11 в течение одного кратковременного эпизода. Среднее направление по дайке 16-9 также характеризуется низким наклонением, однако значимо отличается по склонению от основной группы направлений. Этот факт указывает на иное время образования остаточной намагниченности в дайке 16-9 и отсутствие перемагничивающего события, которое повлияло бы одновременно на все тела в данном карьере. Следовательно, различие направлений в сайтах 16-9 и 16-1-16-8 является аргументом в пользу первичности намагниченности в данных интрузиях.

Направление среднетемпературной компоненты в сайте 16-6 (16-6МТ на рис. 4а) также существенно отличается от основной группы и близко к распространенным позднепалеозойским направлениям западного склона Урала [Шипунов, 1993; Иосифиди и др., 2012]. Мы рассматриваем среднетемпературную компоненту как наложенную, сформировавшуюся в период позднепалеозойской Уральской коллизии. Следует отметить, что направления высокотемпературной компоненты намагниченности в сайтах 10 и 16-6, хотя и близки к основному кластеру, тяготеют к направлению 16-6МТ (рис. 4а), что может быть связано с частичным вкладом наложенной компоненты.

В интрузивных телах в районах гг. Бакал и Куса качество палеомагнитной записи, как правило, довольно низкое. Несмотря на это, во всех рассматриваемых сайтах были изолированы характеристические высокотемпературные компоненты намагниченности (рис. 3г) и рассчитаны среднесайтовые палеомагнитные направления (4б, в). В обоих районах все направления имеют обратную полярность, юго-западные склонения и умеренные наклонения. В географической системе координат направления сгруппированы в одной и той же области стереограммы и близки к направлению 16-6MT (табл. 1). Указанные факты свидетельствуют в пользу позднепалеозойского возраста намагниченности в интрузиях районов Бакала и Кусы.

Средние направления по бакальским и кусинским интрузивным телам значимо отличаются от среднего направления, рассчитанного по дайкам в районе пос. Бердяуш, и в то же время статистически неразличимы друг от друга (рис. 4г). Следовательно, в изученных интрузиях нами зафиксирована остаточная намагниченность двух возрастов: 1) первичная, с возрастом около 1349 млн лет (рубеж раннего – среднего рифея), записанная в дайках в районе пос. Бердяуш; 2) наложенная позднепалеозойская, которая повсеместно присутствует



Рис. 4. A–B — распределение средних палеомагнитных направлений по сайтам в изученных районах: A — Бердяуш, Б — Бакал, В — Куса; стереографическая проекция, географическая система координат; полые кружки — верхняя полусфера, залитые кружки — нижняя полусфера. Г — средние направления по районам: 1 — Бердяуш; 2 — Бакал; 3 — Куса; синий кружок — нижняя полусфера, красные кружки — верхняя полусфера.

Fig. 4. A–B – The site-mean paleomagnetic directions in the studied regions: A – Berdyaush; B – Bakal; C – Kusa; stereographic projection, geographic coordinate system; empty circles – the upper hemisphere, filled circles – the lower hemisphere.  $\Gamma$  – mean directions for the studied regions; blue circle – lower hemisphere; red circles – upper hemisphere.

в телах в районах гг. Бакал и Куса, а также встречается в бердяушских дайках.

Расчет палеомагнитных полюсов и обсуждение результатов. По 8 сайтам в районе пос. Бердяуш, для которых были выделены высокотемпературные компоненты остаточной намагниченности, был рассчитан палеомагнитный полюс для рубежа раннего – среднего рифея Восточно-Европейской платформы (табл. 2). Средние направления по сайтам 16-6 и 10 были исключены из расчета из-за возможной их контаминации компонентой МТ (см. выше). При выборе полярности мы располагаем полученный полюс в северном полушарии, так же, как это было сделано в большинстве предшествующих исследований [Buchan et al., 2000; Salminen, Pesonen, 2007; Лубнина, 2009]. Рассчитанный нами полюс («Бердяуш» на рис. 5) находится между полюсами с близкими возрастами для Восточно-Европейской платформы, полученными по интрузиям Балтийского щита: 1458 млн лет [Salminen, Pesonen, 2007] и 1265 млн лет [Buchan et al., 2000] и хорошо дополняет существующую траекторию кажущейся миграции полюса для этого временного интервала.

Учитывая сложности при получении валидных палеомагнитных данных по западному склону Урала, рассмотренные во Введении, для оценки надежности рассчитанного нами полюса требуется обсуждение двух аспектов: 1) доказательства первичности остаточной намагниченности; 2) отсутствие неучтенных тектонических движений,



### Рис. 5. Сравнение полученных полюсов с опубликованными данными по мезопротерозою и позднему палеозою Восточно-Европейской платформы

Синие кружки с овалами доверия — полюсы, полученные в данной работе: «Бердяуш» — ранне-среднерифейский полюс по Бердяушским дайкам; БК полюс позднепалеозойского перемагничивания по Бакальским и Кусинским телам. Цифры возле полюсов — возраст в млн лет. На рис. показаны полюсы из работ: 1265 — [Buchan et al., 2000]; 1384 — [Лубнина, 2009]; 1452 — [Lubnina et al., 2010]; 1458 — [Salminen, Pesonen, 2007]. Оранжевая линия — среднепозднекаменноугольный фрагмент ТКМП для Балтики [Torsvik et al., 2012].

# Fig. 5. Comparison of the obtainerd poles with the published data for the Mesoproterozoic and Later Paleozoic of the East European craton

Blue dots with the confidence ellipses are the poles obtained in this work: "Berdyaush" is the Lower-Middle Riphean pole for the Berdyaush dikes; BK — is the pole of the Later Paleozoic remagnetization for the Bakal and Kusa intrusions. Numbers near the poles are the ages in Ma. Published paleomagnetic poles: 1265 — [Buchan et al., 2000]; 1384 — [Лубнина, 2009]; 1452 — [Lubnina et al., 2010]; 1458 — [Salminen, Pesonen, 2007]. Orange line is the Middle-Late Carboniferous part of the APWP for Baltica [Torsvik et al., 2012].

Таблица 2

### Рассчитанные полюсы по интрузиям Башкирского мегантиклинория

### Table 2

### Calculated poles for the intrusions of the Bashkirian meganticlinorium

Полюс	N	P <sub>long</sub> , °	P <sub>lat</sub> , °	A <sub>95</sub> , °
Средний полюс по рифейской компоненте ЕОН	8	162.4	8.4	4.1
Средний полюс позднепалеозойского перемагничивания	11	174.5	43	5.8

*Примечания*: N — количество сайтов;  $P_{long}$ ,  $P_{lat}$  — долгота, широта полюса;  $A_{95}$  — доверительный интервал. Пояснения см. в тексте. *Notes:* N — number of sites;  $P_{long}$ ,  $P_{lat}$  — longitude, latitude of the paleomagnetic pole;  $A_{95}$  — confidence interval. For explanation see the text.

которые могли бы привести к наклону или вращению исследованного блока. Основными доводами в пользу первичности намагниченности являются: 1) близость полученного полюса к имеющимся для этого времени полюсам для Восточно-Европейской платформы; 2) его отличие от позднепалеозойских полюсов, что свидетельствует об отсутствии широко проявленного на Урале синколлизионного перемагничивания; 3) значимо различающиеся палеомагнитные направления в разновозрастных дайках сайта 16, что указывает на отсутствие перемагничивающих событий в этой локации, которые повлияли бы сразу на все интрузии.

При этом следует отметить, что рассчитанный полюс «Бердяуш», как и упомянутые выше полюсы, полученные по интрузиям Балтийского щита, расположен достаточно близко к позднесилурийскому участку траектории кажущейся миграции полюса ВЕП, предлагаемой в работе [Torsvik et al., 2012]. Этот факт свидетельствует, что возможность перемагничивания не может быть полностью исключена, и требует внимательного анализа всех полюсов ВЕП с близкими возрастами. В нашем случае дополнительным, хотя и недостаточным аргументом в пользу первичности намагниченности может служить тот факт, что эндогенные события в данной части Башкирского мегантиклинория, которые могли бы привести к перемагничиванию в позднесилурийское время, авторам не известны.

Учет возможного наклона блоков после образования исследованных интрузий представляет собой существенную проблему, поскольку складчатые деформации вмещающих пород, очевидно, произошли в ходе формирования Бердяушского массива, то есть до внедрения даек. Хотя полностью исключить возможность наклона опробованного блока не представляется возможным, есть свидетельства того, что эти дислокации, если и имели место, были не слишком значительны. Во-первых, на удалении от непосредственного контакта Бердяушского массива (в 1 км к востоку от сайта 16) доломиты саткинской свиты смяты в пологие складки, углы падения крыльев которых нигде не превышают 15-20°. Во-вторых, рассмотренные дайки имеют субвертикальное залегание и, согласно нашей модели, выполняют трещины отрыва в присдвиговой зоне (см. раздел «Анизотропия магнитной восприимчивости»). Эти факты показывают, что возможные дислокации блока, которые могли привести к его наклону, скорее всего, были относительно невелики.

Вопрос о возможном горизонтальном вращении фрагментов Башкирского мегантиклинория в период позднепалеозойской коллизии обсуждался и ранее. В работе [Павлов и др., 2010] приводятся результаты анализа палеомагнитных направлений, полученных по породам верхнерифейской катавской свиты в разных частях Башкирского мегантиклинория. Сравнение палеомагнитных направлений показало, что, хотя отдельные блоки в пределах мегантиклинория испытывали вращение, в целом его основные структурные элементы не обнаруживают следов перемещений относительно друг друга и Восточно-Европейской платформы. Палеомагнитные данные по палеозойским и позднепротерозойским толщам поднятия Каратау (самая западная часть Уральского складчатого сооружения), приведенные в работе [Голованова и др., 2017], также свидетельствуют в пользу отсутствия поворотов данного блока относительно других структур Урала и ВЕП. В работе [Levashova et al., 2013] авторы также приходят к выводу о возможности использования палеомагнитных данных по западному склону Урала для платформы на основании анализа результатов, полученных по вендской зиганской свите. Тем не менее очевидно, что такое обоснование не является достаточным, чтобы исключить возможность вращения, поэтому мы приводим дополнительные доводы в пользу этого (см. ниже).

В дополнение следует отметить, что полученные нами палеомагнитные направления по дайкам района пос. Бердяуш демонстрируют высокую кучность и, скорее всего, отвечают единому кратковременному магматическому событию. Недавние результаты исследования интрузивных комплексов Крупных магматических провинций показывают, что такого набора данных далеко не всегда достаточно для усреднения вековых вариаций геомагнитного поля [Konstantinov et al., 2014; Latyshev et al., 2018], поэтому поиск новых интрузий кургасского комплекса, несущих первичную компоненту намагниченности, и их палеомагнитное изучение являются крайне желательными.

По объектам, где была выделена позднепалеозойская компонента естественной остаточной намагниченности, нами также был рассчитан полюс (табл. 2). В выборку вошли 11 сайтов, представляющие 7 интрузий Бакальского района, 3 силла близ г. Куса и дайка 16-6 у пос. Бердяуш (компонента МТ). Полученный полюс (БК на рис. 5) значимо отличается от рассчитанного для возраста 1349 млн лет и близок к средне-позднекаменноугольному фрагменту кривой кажущейся миграции полюса ВЕП по [Torsvik et al., 2012]. Это подтверждает версию о позднепалеозойском возрасте данных компонент намагниченности.

Для оценки возможных относительных перемещений блоков в пределах Башкирского мегантиклинория нами было проведено сравнение средних палеомагнитных направлений, рассчитанных по интрузиям гг. Бакал и Куса (расстояние между крайними точками 75 км). В случае относительных горизонтальных смещений этих районов после приобретения намагниченности (то есть, скорее всего, в посткаменноугольное время) следовало бы ожидать, что средние направления по бакальским и кусинским интрузиям будут значимо различаться. Сравнение, выполненное по методике [McFadden, McElhinny, 1990], показало, что эти направления статистически неразличимы:  $\gamma/\gamma_{\rm kp} = 4.7^{\circ}/16.3^{\circ}$ . Поскольку основная фаза тектонических деформаций в западной части Урала имела место в перми [Пучков, 2000], скорее всего, это произошло после перемагничивания интрузивных тел. Это можно рассматривать как дополнительный аргумент в пользу жесткости Башкирского мегантиклинория в позднепалеозойское время и возможности использования палеомагнитных данных по этому району для Восточно-Европейской платформы.

### Анизотропия магнитной восприимчивости

Для реконструкции направлений транспорта магмы при внедрении исследованных интрузий и поиска закономерностей в пространственном распределении направлений течения нами были проведены измерения анизотропии магнитной восприимчивости (AMB). В данной работе приведены результаты измерений по 9 дайкам и субвертикальному силлу в районе пос. Бердяуш и трем силлам в районе г. Куса.

Бердяушский район. Величина магнитной восприимчивости в долеритах даек Бердяушского района в большинстве тел варьирует в диапазоне  $5 \times 10^{-3} - 3.3 \times 10^{-2}$  ед. СИ, указывая, что основной вклад в магнитную анизотропию вносит ферримагнитная составляющая [Tarling, Hrouda, 1993]. Исключение составляют сайты 11 и 16-6, где значения магнитной восприимчивости существенно ниже (табл. 3). Таким образом, в этих сайтах парамагнитные минералы также могут влиять на общую анизотропию магнитной восприимчивости наряду с ферримагнитными.

Для определения состава магнитной фракции на типичных образцах из разных сайтов были сняты кривые зависимости магнитной восприимчивости от температуры. По данным термокаппаметрии, основным минералом — носителем намагниченности в изучаемых интрузиях является магнетит с температурами Кюри 570–600°С (рис. 6а). Во многих образцах также обнаруживается фаза с блокирующими температурами 300–400°С, вероятно, отвечающая титаномагнетиту. Наконец, по отдельным кривым можно зафиксировать наличие гематита, который характеризуется температурами Кюри выше 650°С.

Значения параметра Рј, показывающего степень анизотропии, в интрузиях района пос. Бердяуш варьируют от 1.005 до 1.06. Такие величины этого параметра характерны для базитов с первично магматической магнитной текстурой, не претерпевших значительной метаморфической и тектонической переработки [Tarling, Hrouda, 1993]. Параметр Т, характеризующий форму эллипсоида АМВ, в 5 сайтах из 9 положителен, что соответствует вытянутому эллипсоиду, в 4 сайтах — отрицателен (сплюснутый эллипсоид). При этом следует отметить, что сайты с T >0, как правило, демонстрируют более высокие значения степени анизотропии (Рј= 1.04–1.06) по сравнению с сайтами с Т < 0 (Pj < 1.02, за единственным исключением). Очевидной зависимости параметров Т и Рј от величины магнитной восприимчивости не прослеживается.

В 3 сайтах из 9 наблюдается так называемый «нормальный» тип магнитной текстуры (N-тип), при котором минимальная ось эллипсоида K3 перпендикулярна контакту интрузии, а две другие оси лежат в плоскости дайки или силла (рис. 66, табл. 3). 2 сайта обладают обратным типом магнитной текстуры (R-тип, [Rochette et al., 1991]), который характеризуется максимальной осью K1, ориентированной перпендикулярно контакту, и осями K2 и K3, лежащими в плоскости дайки. Наконец, 4 сайта демонстрируют промежуточный тип эллипсоида (I-тип), при котором средняя ось анизотропии K2 ортогональна контакту (рис. 6в).

Причины «инверсии» эллипсоида AMB, приводящей к формированию магнитной текстуры R-типа, на настоящий момент не ясны. Одна из наиболее распространенных в литературе гипотез, объясняющих данный феномен — это преобладание в составе магнитной фракции однодоменных зерен магнетита или маггемита [Potter, Stephenson, 1988]. Для тестирования этой версии мы планируем провести анализ доменного состава образцов с различным типом эллипсоида. В свою очередь, универсального объяснения обнаруженному I-типу

имчивости	
гнитной воспри	
изотропии ма	
измерения ан	
Результаты	

Table 3

Таблица 3

# Results of the measurement of anisotropy of magnetic susceptibility

Контакт	∠ пд,°		87	87	78	78	80	73	73	06	75		22	47	27				
	Аз пд,°							282	182	198	206	13	183	193	359	218		148	112
	Ci				38.4/28.8	18.1/3.8	27.9/12.3	15.6/11.9	68.4/23.7	20.1/12.7	16.5/8.0	17.5/8.6	21.3/1.5		41.9/17.3	19.7/9.3	27.3/12.6		
K3	Ι		8.1	61.3	49.4	5.3	77.1	59.3	9.6	59.6	29.9		70.6	53.1	52.5				
	D		295.2	98.9	157	11.1	307.9	119.8	22.4	138.2	95.6		110.3	310.8	359.3				
	Ci		39.2/26.0	14.8/3.1	33.1/24.9	15.4/11.8	68.4/9.8	41.8/12.0	16.1/9.0	19.1/14.5	23.4/11.7		46.5/39.8	43.9/19.0	27.8/24.4				
K2	I		49.8	5.7	30.3	41.8	3	22.7	66.7	10.7	24.8		19	36.2	36.8				
	D	район	34.8	199.4	24.1	105.9	204.6	254.6	269.2	246.9	201	айон	278.1	117.2	166.6				
	Ci	Бердяушский	30.9/29.5	20.8/10.0	31.5/12.0	15.6/7.3	32.5/13.8	42.1/11.8	9.4/8.7	16.5/8.6	15.8/2.7	нский р	47.0/21.5	43.9/10.1	25.4/13.0				
K1	Ι		Бердя	Бердя	39	28	24.3	47.7	12.5	19.5	21	28.1	49.4	Куси	3.8	6.6	6.1		
	D		198.6	292.5	278.8	275.3	113.9	353.1	116.1	342.7	323.5		9.4	212	261.2				
	L		-0.019	0.256	0.145	-0.115	-0.093	0.042	0.472	-0.111	0.425		-0.024	0.451	0.227				
	Pj					1.004	1.06	1.047	1.018	1.011	1.04	1.045	1.054	1.058		1.032	1.027	1.037	
	K							6.22E-04	4.69E-03	9.98E-03	1.52E-02	5.35E-03	8.47E-03	2.46E-04	1.34E-02	3.29E-02		1.24E-02	7.51E-03
	Z		15	5	13	9	7	9	9	8	5		18	13	15				
Тип	эллип- соида		z	Ι	Ι	Z	Ι	R	Z	R	Ι		Z	Z	Z				
Объект			силл	дайка		силл	силл	силл											
Сайт			11	16-1	16-2	16-3	16-4	16-5	16-6	16-7	16-8		19	20	21				

*Примечания:* К – общая магнитная восприимчивость, ед СИ; N – количество образцов; Рј – корректированная степень анизотропии; Т – параметр формы эллипсоида АМВ; Кl – максимальная ось эллипсоида; K2 – средняя ось; K3 – минимальная ось. D – склонение, °; I – наклонение, °; Ci – радиусы овалов доверия, °. Для K, Pj, T, D, I – приведены

средние значения по сайтам. Типы эллипсоида AMB: N – нормальный; R – обратный; I – промежуточный. Notes: K – average magnetic susceptibility, SI units; N – number of samples; Pj – corrected degree of anisotropy; T – shape parameter; K1 – maximal axis of AMS ellipsoid; K2 – intermediate axis; K3 – minimal axis. D – declination, °; I – inclination, °; Ci – confidence ellipse ratios, °. For K, Pj, T, D, I the site-mean values are given. Types of the magnetic fabric: N – normal; R - reverse; I - intermediate.

### Палеомагнетизм интрузивных тел рубежа раннего – среднего рифея...

магнитной текстуры также не существует. В качестве возможных причин этого явления предлагались: 1) вертикальное сжатие при остывании дайки и консолидации статичной магматической колонны, если ось К3 вертикальна [Park et al., 1988]; 2) сочетание многодоменных и однодоменных зерен магнетита или титаномагнетита [Ferré, 2002]; 3) наложение различных факторов, формирующих магнитную текстуру, например, течения расплава и напряжений при остывании интрузива [Dragoni et al., 1997].

В случае N-типа магнитной текстуры в плоскостных базитовых интрузиях ориентировку максимальной оси K1, как правило, интерпретируют как соответствующую направлению течения расплава [Ernst, Baragar, 1992]. В сайтах 16-3 и 16-6





A — кривая зависимости магнитной восприимчивости от температуры. Красная линия — нагрев, синяя — охлаждение. Б–Г — примеры AMB в изученных интрузивных телах. Стереографическая проекция, нижняя полусфера. К1, К2, К3 — соответственно максимальная, средняя и минимальная оси эллипсоида AMB. Плоскость тела и нормаль к ней показаны оранжевой линией и точкой соответственно. Б — сайт 16-3, дайка в районе пос. Бердяуш, N-тип магнитной текстуры. В — сайт 16-2, дайка в районе пос. Бердяуш, I-тип магнитной текстуры. Г — Сайт 20, силл в районе г. Куса, N-тип магнитной текстуры.

### Fig. 6. Results of the measurements of the anisotropy of magnetic susceptibility and thermomagnetic analysis

A – temperature dependence of the magnetic susceptibility. Red line is heating, blue line is cooling.  $\overline{b}-\Gamma$  – examples of AMS in the studied intrusions. Stereographic projection, lower hemisphere. K1, K2, K3 – maximal, intermediate and minimal axes of the AMS ellipsoid, respectively. The intrusion plane and its pole are shown as the orange line and dot, respectively.  $\overline{b}$  – site 16-3, dike near Berdyaush settlement, N-type of the magnetic fabric. B – site 16-2, dike near Berdyaush settlement, I-type of the magnetic fabric.  $\Gamma$  – site 20, sill near Kusa town, N-type of the magnetic fabric.

ось К1 лежит в плоскости интрузии, полого падая на северо-запад и юго-восток соответственно (табл. 3), что указывает на латеральные перемещения расплава. В сайте 11, представляющем субвертикальный силл, максимальная ось демонстрирует пологое падение на юг. Если рассмотреть дополнительно 4 дайки с І-типом магнитной текстуры, то в 3 из них ось К1 также погружается на северозапад под углами 25–50°, и в одном случае имеет субгоризонтальную ориентировку.

Таким образом, во всех плоскостных интрузиях Бердяушского района, где максимальная ось эллипсоида AMB лежит в плоскости тела, она ориентирована относительно полого (углы падения не превышают 50°) или субгоризонтально. Из 6 параллельных даек в карьере к югу от пос. Бердяуш с N- и I-типом эллипсоида ось K1 в 4 случаях погружается на северо-запад под углами 25–50°, а в 2 сайтах полого падает на юго-восток (углы падения  $12-21^{\circ}$ ). Это свидетельствует в пользу внедрения даек с северо-запада на юго-восток под относительно небольшими углами.

Кусинский район. Силлы в районе г. Кусы характеризуются величиной магнитной восприимчивости в диапазоне  $7.5 \times 10^{-3} - 1.35 \times 10^{-2}$  и низкой степенью анизотропии (Pj=1.027–1.037). Таким образом, магнитная текстура в этих интрузиях, скорее всего, имеет первично-магматическую природу и обусловлена распределением ферримагнитных минералов (магнетита и/или титаномагнетита). В 1 сайте наблюдается планарный тип эллипсоида AMB (T <0), в 2 остальных эллипсоид имеет вытянутую форму (табл. 3).

Все три интрузии обладают N-типом анизотропии, что выражается в субвертикальной или крутой ориентировке минимальной оси K3 и пологом залегании остальных осей. Учитывая низкую степень анизотропии, вариации параметра формы эллипсоида и нормальный тип магнитной текстуры, мы предполагаем, что AMB кусинских силлов сформирована под воздействием нескольких факторов: движения магматического расплава, локальных напряжений, связанных с остыванием тела [Tarling, Hrouda, 1993; Andersson et al., 2016], а также кристаллизационным осаждением магнитных частиц [O'Driscoll et al., 2015].

Во всех 3 силлах максимальная ось K1 ориентирована субгоризонтально, при этом в сайтах 19 и 20 эллипсоид вытянут в ССВ–ЮЮЗ направлении (рис. 6г), в то время как в сайте 21 ось K1 полого погружается на запад. Следовательно, для большинства интрузий Кусинского района можно предположить ССВ направление движения расплава, хотя для надежной реконструкции требуется исследование большего числа тел.

Интерпретация данных. Для интерпретации результатов измерения АМВ в дайках Бердяушского района мы проанализировали морфологию Бердяушского массива и ориентировку разрывных нарушений региона. Бердяушский массив с запада ограничен крупным Бакало-Саткинским разломом и имеет форму, в плане близкую к параллелепипедальной. Такую морфологию массива можно объяснить его внедрением в локальную область растяжения в присдвиговой зоне («сдвиговый магматический дуплекс» [Тевелев Ал.В., Тевелев Арк.В., 1999]). Большая часть опробованных нами даек обладает ЗСЗ простираниями, нетипичными для дайковых комплексов Башкирского мегантиклинория. Рассматривая ориентировку даек в рамках той же модели, мы предполагаем, что их внедрение происходило по трещинам отрыва в присдвиговой зоне (рис. 7а). Учитывая падения максимальной оси эллипсоида АМВ на северо-запад в большинстве сайтов, мы предполагаем, что распространение магмы происходило с СЗ на ЮВ, то есть от Бакало-Саткинского разлома. Таким образом, в конце раннего – начале среднего рифея Бакало-Саткинский разлом действовал как долгоживущая магмоподводящая зона, контролирующая внедрение как Бердяушского массива (возраст около 1370 млн лет [Ронкин и др., 2016]), так и секущих его дайковых тел (возраст 1349±11 млн лет).

В районе г. Куса северо-восточная ориентировка максимальной оси AMB в силлах (сайты 19, 20) конформна простиранию большинства дайковых тел в этом районе. Более того, разрывные нарушения к западу от г. Кусы, включая Бакало-Саткинский разлом, также характеризуются близкими простираниями. Таким образом, движение магмы в кусинских силлах было параллельным региональной зоне растяжения, контролировавшей формирование дайковых тел в этом районе (рис. 76). Что касается расположенного восточнее сайта 21, то ось К1 для него параллельна близлежащим разрывным нарушениям и, вероятно, определяется локальной тектоникой.

### Выводы

1. Исследованные интрузии Башкирского мегантиклинория в основном принадлежат к кургасскому комплексу рубежа раннего – среднего рифея. Анализ геохимических характеристик



Рис. 7. Интерпретация результатов измерения AMB. А — кинематическая модель формирования Бердяушского массива и даек кургасского комплекса. Б — реконструкция направлений течения магмы в интрузиях района г. Кусы Условные обозначения: 1 — разрывные нарушения; 2 — опробованные интрузии; 3 — направление падения оси К1 эллипсоида AMB

*Условные обозначения:* 1 — разрывные нарушения, 2 — опрооованные интрузии; 5 — направление падения оси КТ эллипсоида АМВ в Кусинских интрузиях; 4 — предполагаемое направление распространения магмы. Прочие условные обозначения те же, что и на рис. 1.

Fig. 7. Interpretation of the AMS analysis. A — kinematic model of the emplacement of Berdyaush pluton and dikes of the Kurgassky complex. B — reconstruction of the magma flow directions in the intrusions in Kusa region

Legend: 1 - faults and shears; 2 - sampled intrusions; 3 - dip direction of K1 axis of AMS ellipsoid in Kusa sills; 4 - suggested direction of the magma transport. For the explanatory other notes see Fig. 1.

интрузивных тел показывает, что степень обогащения несовместимыми элементами увеличивается с юга на север. При этом дайки, существенно различающиеся по спектрам элементов-примесей, могли формироваться в течение единого кратковременного магматического события.

2. По 8 маломощным интрузиям в районе пос. Бердяуш нами был рассчитан новый палеомагнитный полюс для границы раннего – среднего рифея Восточно-Европейской платформы (1349 млн лет). Надежность полученного результата подкреплена доводами в пользу отсутствия регионального перемагничивания и незначительности постмагматических дислокаций в пределах блока. Новый полюс хорошо соответствует полученным ранее для близких возрастов и вносит вклад в разработку траектории кажущейся миграции полюса ВЕП в рифее.

 По 11 интрузиям рассчитан полюс позднепалеозойского синколлизионного перемагничивания, близкий к средне-позднекаменноугольному участку кривой кажущейся миграции полюса ВЕП по [Torsvik et al., 2012]. Сравнение средних палеомагнитных направлений этой наложенной компоненты намагниченности в разных районах свидетельствует об отсутствии относительных вращений блоков Башкирского мегантиклинория в позднепалеозойское время.

4. Анализ результатов измерений анизотропии магнитной восприимчивости показывает, что схема транспорта магматического расплава в районах г. Куса и пос. Бердяуш в значительной степени определялась деятельностью зон разрывных нарушений. Региональный Бакало-Саткинский разлом в конце раннего — начале позднего рифея играл роль региональной магмоподводящей зоны, контролировавшей формирование Бердяушского массива гранитоидов рапакиви и даек кургасского комплекса.

Благодарности. Авторы благодарят Ал.В. Тевелева за полезные дискуссии при работе над статьей, В.М. Мосейчука за содействие при проведении поле-

вых исследований, а также анонимного рецензента за ценные комментарии и замечания, которые позволили улучшить статью.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-05-01121.

### Список литературы:

Алексеев А.А. Рифейско-вендский магматизм западного склона Южного Урала. — М.: Наука, 1984. — 136 с.

Голованова И.В., Данукалов К.Н., Кадыров А.Ф., Хидиятов М.М., Сальманова Р.Ю., Шакуров Р.К., Левашова Н.М., Баженов М.Л. Палеомагнетизм осадочных толщ и происхождение структур западного склона Южного Урала // Физика Земли. – 2017. – № 2. – С. 148–156.

Голованова И.В., Данукалов К.Н., Козлов В.И., Пучков В.Н., Павлов В.Э., Галле И., Левашова Н.М., Сирота Г.С., Хайрулин Р.Р., Баженов М.Л. Палеомагнетизм верхневендской басинской свиты башкирского мегантиклинория: результаты повторного исследования // Физика Земли. – 2011. – № 7. – С. 67–79.

Иосифиди А.Г., Михайлова В.А., Сальная Н.В., Храмов А.Н. Палеомагнетизм осадочных пород ашинской серии западного склона Южного Урала: новые данные // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7, № 4. – С. 1–17.

Ковалев С.Г., Высоцкий С.И., Ковалев С.С. Петрогеохимия магматических комплексов западного склона Южного Урала и востока Восточно-Европейской платформы // Геологический сборник № 15 / Под ред. В.Н. Пучкова, Р.Ф. Абдрахманова, И.Б. Серавкина / ИГ УрО РАН. – СПб.: Свое издательство, 2015. – С. 117–137.

*Лубнина Н.В.* Восточно-Европейский кратон в неопротерозое: новые ключевые палеомагнитные полюсы // Докл. РАН. – 2009. – Т. 428, № 2. – С. 252–257.

Носова А.А., Сазонова Л.В., Каргин А.В., Ларионова Ю.О., Горожанин В.М., Ковалев С.Г. Мезопротерозойская внутриплитная магматическая провинция Западного Урала: основные петрогенетические типы пород и их происхождение // Петрология. – 2012. – Т. 20, № 4. – С. 392–428.

Павлов В.Э., Галле И. Известняки катавской свиты: уникальный пример перемагничивания или идеальный регистратор неопротерозойского геомагнитного поля? // Физика Земли. – 2009. – № 1. – С. 33–41.

Павлов В.Э., Крупенин М.Т., Кузнецов Н.Б. Новые палеомагнитные данные по катавской свите: к вопросу о блоковом строении Башкирского поднятия // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя: Матер. XLIII Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2010. – Т. 2. – С. 101–107.

*Пучков В.Н.* Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. – Уфа: Даурия, 2000. – 146 с.

*Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). — Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. — 280 с.

Ронкин Ю.Л., Тихомирова М., Маслов А.В. 1380 млн лет LIP Южного Урала: прецизионные U-Pb-ID-TIMS-ограничения // Докл. РАН. – 2016. – Т. 468, № 6. – С. 674–769. Свяжина И.А., Пучков В.Н., Иванов К.С., Петров Г.А. Палеомагнетизм ордовика Урала. – Екатеринбург: ИГ УрО РАН, 2003. – 136 с.

*Тевелев Ал.В., Тевелев Арк.В.* Сдвиговые магматические дуплексы. // Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма: Матер. 32-го Тектонич. совещ. — М.: ГЕОС, 1999. — Т. 1. — С. 189—193.

Хотылев А.О., Тевелев Ал.В., Мосейчук В.М., Бычков А.Ю., Девишева Н.Б. Суимский и кургасский рифейские дайковые комплексы: состав и петрологические особенности (Южный Урал, Башкирский мегантиклинорий) // Бюл. МОИП. Отд. геол. – 2017. – Т. 92, № 5. – С. 3–14.

Хотылев А.О., Тевелев А.В., Мосейчук В.М., Девишева Н.Б., Бычкова Я.В., Латышев А.В. Мезопротерозойский базитовый магматизм Башкирского мегантиклинория (Южный Урал): возрастные ограничения, петрологические и геохимические особенности // Геология и геофизика. – В печати.

Шипунов С.В. Основы палеомагнитного анализа: Теория и практика. – М.: Наука, 1993. – 159 с. – (Труды ГИН РАН; Вып. 487).

Эрнст Р.Э., Хейнс Дж.А., Пучков В.Н., Округин А.В., Арчибальд Д.А. Рекогносцировочное Ar-Ar датирование протерозойских долеритовых даек и силлов в Сибири и на Южном Урале: идентификация новых крупных магматических провинций и использование при реконструкции суперконтинента Нуна (Коламбия) // Матер. 41-го Тектонического совещания / Отв. ред. Ю.В. Карякин. – М.: ГЕОС, 2008. – Т. 2. – С. 492–496.

Andersson M., Almqvist B.S.G., Burchardt S., Troll V.R., Malehmir A., Snowball I., Kubler L. Magma transport in sheet intrusions of the Alnö carbonatite complex, central Sweden // Sci. Rep. – 2016. – V. 6, Article ID 27635. – doi: 10.1038/srep27635.

Buchan K.L., Mertanen S., Park R.G., Pesonen L.J., Elming S.-A., Abrahamsen N., Bylund G. Comparising the drift of Laurentia and Baltica in the Proterozoic: the importance of key palaeomagnetic poles // Tectonophysics. – 2000. – V. 319, Is. 3. – P. 167–198.

*Chadima, M., Hrouda, F.* Remasoft 3.0 a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer // Travaux Géophysiques. – 2006. – XXVII. – P. 20–21.

*Dragoni M., Lanza R., Tallarico A.* Magnetic anisotropy produced by magma flow; theoretical model and experimental data from Ferrar dolerite sills (Antarctica) // J. Geophys. Int. – 1997. – V. 128 – P. 230–240.

*Enkin R.J.* A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data // Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada. – 1994. – 16 p.

*Ernst R.E., Baragar W.R.A.* Evidence from magnetic fabric for the flow pattern of magma in the Mackenzie Giant Radiating dyke swarm // Nature. – 1992. – V. 356. – P. 511–513.

Еглят R.E., Pease V., Puchkov V.N., Kozlov V.I., Sergeeva N.D., Hamilton M. Geochemical characterization of Precambrian magmatic suites of the Southeastern margin of the East European Craton, Southern Urals, Russia // Геологический сборник № 5 / Под ред. В.Н. Пучкова, Р.Ф. Абдрахманова, И.Б. Серавкина / ИГ УрО РАН. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2006. – С. 1–45.

*Ferré E.C.* Theoretical models of intermediate and inverse AMS fabrics // Geophys. Res. Lett. – 2002. – V. 29, Is. 7. – P 31-1–31-4. – doi: 10.1029/2001GL014367.

*Fisher R.* Dispersion on a Sphere // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. – 1953. – V. 217 (1130). – P. 295–305.

*Jelínek V.* Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measures on groups of specimens // Studia geophisica et geodetica. – 1978. – V. 22. – P. 50–62.

*Jelínek V.* Characterization of the magnetic fabrics of rocks // Tectonophysics. – 1981. – V. 79 – P. T63–T67.

*Kirschvink J.L.* The Least-Square Line and Plane and the Analysis of Paleomagnetic Data // Geophys. J. R. Astr. Soc. – 1980. – V. 62. – P. 699–718.

Konstantinov K.M., Bazhenov M.L., Fetisova A.M., Khutorskoy M.D. Paleomagnetism of trap intrusions, East Siberia: Implications to flood basalt emplacement and the Permo-Triassic crisis of biosphere // Earth and Planetary Science Letters. – 2014. – V. 394. – P. 242–253.

*Latyshev A.V., Veselovskiy R.V., Ivanov A.V.* Paleomagnetism of the Permian-Triassic intrusions from the Tunguska syncline and the Angara-Taseeva depression Siberian Traps Large Igneous Province: evidence of contrasting styles of magmatism // Tectonophysics. – 2018. – V. 723. – P. 41–55. – doi:10.1016/j.tecto.2017.11.035.

Levashova N.M., Bazhenov M.L., Joseph G., Meert J.G., Kuznetsov N.B., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M. Paleogeography of Baltica in the Ediacaran: paleomagnetic and geochronological data from the clastic Zigan Formation, South Urals // Precambrian Research. – 2013. – V. 236.– P. 16–30.

Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Danukalov K.N., Golovanova I.V., Kuznetsov N.B., Fedorova N.M. Paleomagnetism of upper Ediacaran clastics from the South Urals: Implications to paleogeography of Baltica and the opening of the Iapetus Ocean // Gondvana Research. – 2015. – V. 28.– P. 191–208.

Lubnina N.V., Mertanen S., Soderlund U., Bogdanova S., Vasilieva T.I., Frank-Kamenetskiy D. A new key pole for the East European Craton at 1452 Ma: Palaeomagnetic and geochronological constraints from mafic rocks in the Lake Ladoga region (Russian Karelia) // Precambrian Research. – 2010. – V. 183. – P. 442–462.

*McFadden P.L., McElhinny M.W.* Classification of the reversal test in palaeomagnetism // Geophys. J. Int. – 1990. – V. 103. – P. 725–729.

*O'Driscoll B., Ferre E.C., Stevenson S.T.E., Magee C.* The significance of magnetic fabric in layered mafic-ultramafic intrusions // Layered intrusions / *B. Charlier et al.* (*eds.*). – Springer, 2015. – P. 295–329.

*Park J. K., Tanczyk E. I., Desbarats A.* Magnetic fabric and its significance in the 1400 Ma Mealy diabase dykes of Labrador, Canada // J. Geophys. Res. – 1988. – V. 93, No. B11. – P .13.689–13.704.

*Potter D.K., Stephenson A.* Single-domain particles in rocks and magnetic fabric analysis // Geophysical Research Letters. – 1988. – V. 15 – P. 1097–1100.

Puchkov V.N., Bogdanova S.V, Ernst R.E., Kozlov V.I., Krasnobaev A.A., Söderlund U., Wingate M.T.D., Postnikov A.V., Sergeeva N.D. The ca. 1380 Ma Mashak igneous event of the Southern Urals // Lithos. – 2013. – V. 174. – P. 109–124. *Rochette P., Jenatton L., Dupuy C., Boudier F., Reuber I.* Diabase dikes emplacement in the Oman ophiolite: a magnetic fabric study with reference to geochemistry // Ophiolite Genesis and Evolution of the oceanic lithosphere / *Tj. Peters et al.* (*eds.*): Proceedings of the Ophiolite Conference, held in Muscat, Oman (7–18 January 1990). – 1991. – P. 55–82.

Salminen J., Pesonen L.J. Palaeomagnetic and rock magnetic study of the Mesoproterozoic sill, Valaam island, Russian Karelia // Precambrian Res. – 2007. – V. 159. – P. 212–230.

*Sun S.S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geol. Soc. London. Spec. Publ. – 1989. – V. 42. – P. 313–345.

*Tarling D.H., Hrouda F.* The Magnetic Anisotropy of Rocks. – Chapman, Hall, London, 1993. – 217 p.

Torsvik T.H., Van der Voo R., Preeden U., Mac Niocaill C., Steinberger B., Doubrovine P.V., van Hinsbergen D.J.J., Domeier M., Gaina C., Tohver E., Meert J.G., McCausland P.J.A., Cocks L.R.M. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics // Earth-Sci. Reviews. – 2012. – V. 114. – P. 325–368.

*Zijderveld J.D.A.* A.C. demagnetization of rocks: analysis of results. Methods in paleomagnetism / *D.W. Collinson, K.M. Creer (eds.).* – Amsterdam: Elsevier, 1967. – P. 254–286.

### **References:**

*Alekseev A.A.* Rifejsko-vendskij magmatizm zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala [Riphean-Vendian magmatism of the Western slope of the Southern Urals]. M.: Nauka, 1984. 136 p. (In Russian).

Andersson M., Almqvist B.S.G., Burchardt S., Troll V.R., Malehmir A., Snowball I., Kubler L. Magma transport in sheet intrusions of the Alnö carbonatite complex, central Sweden // Sci. Rep. 2016. V. 6. Article ID 27635. doi: 10.1038/srep27635.

Buchan K.L., Mertanen S., Park R.G., Pesonen L.J., Elming S.-A., Abrahamsen N., Bylund G. Comparising the drift of Laurentia and Baltica in the Proterozoic: the importance of key palaeomagnetic poles // Tectonophysics. 2000. V. 319 (3). P. 167–198.

*Chadima M., Hrouda F.* Remasoft 3.0 a user-friendly paleomagnetic data browser and analyzer // Travaux Géophysiques. 2006. – XXVII. P. 20–21.

*Dragoni M., Lanza R., Tallarico A.* Magnetic anisotropy produced by magma flow; theoretical model and experimental data from Ferrar dolerite sills (Antarctica) // J. Geophys. Int. 1997. V. 128. P. 230–240.

*Enkin R.J.* A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada. 1994. 16 p.

*Ernst R.E., Baragar W.R.A.* Evidence from magnetic fabric for the flow pattern of magma in the Mackenzie Giant Radiating dyke swarm // Nature. 1992. V. 356. P. 511–513.

Ernst R.E., Hejns Dzh.A., Puchkov V.N. Okrugin A.V., Archibald D.A. Rekognoscirovochnoe Ar-Ar datirovanie proterozojskih doleritovyh daek i sillov v Sibiri i na YUzhnom Urale: identifikaciya novyh krupnyh magmaticheskih provincij i ispol'zovanie pri rekonstrukcii superkontinenta Nuna (Kolambiya) [Ar-Ar reconnaissance Dating of Proterozoic dolerite dikes and sills in Siberia and the Southern Urals: identification of new large magmatic provinces and use in the reconstruction of the supercontinent Noona (Columbia)] // Mat-ly 41-go Tektonicheskogo soveshchaniya [XLI Tectonic meeting materials] / *Y.V. Karyakin (ed.).* M.: GEOS, 2008. V. 2. P. 492–496 (In Russian).

Ernst R.E., Pease V., Puchkov V.N., Kozlov V.I., Sergeeva N.D., Hamilton M. Geochemical characterization of Precambrian magmatic suites of the Southeastern margin of the East European Craton, Southern Urals, Russia // Geologichesky sbornik No. 5 / V.N Puchkov, R.F. Abdrahmanov, I.B. Seravkin (eds.) / IG UrO RAN. 2006. P. 1–45.

*Ferré E.C.* Theoretical models of intermediate and inverse AMS fabrics // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, Is. 7. P. 31-1–31-4. doi: 10.1029/2001GL014367.

*Fisher R.* Dispersion on a Sphere // Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1953. V. 217 (1130). P. 295–305.

Golovanova I.V., Danukalov K.N., Kadyrov A.F., Khidiyatov M.M., Sal'manova R.Yu., Shakurov R.K., Levashova N.M., Bazhenov M.L. Paleomagnetism of sedimentary strata and the origin of the structures in the western slope of South Urals // Izvestiya. Physics of Solid Earth, 2017. Vol. 53, Iss. 2. P. 311–319.

Golovanova I.V., Danukalov K.N., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Pavlov V.E., Gallet Y., Levashova N.M., Sirota G.S., Hairulin R.R., Bazhenov M.L. Paleomagnetizm verhnevendskoi basinskoi svity bashkirskogo megantiklinoriya: rezul'taty povtornogo issledovaniya [Paleomagnetism of the Upper Vendian Basu formation of the Bashkirian Meganticlinorium revisited] // Izvestiya. Physics of Solid Earth. 2011. No. 7. P. 67–79 (In Russian).

*Iosifidi A.G., Mihailova V.A., Salnaya N.V., Hramov A.N.* Paleomagnetizm osadochnyh porod ashinskoj serii zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala: novye dannye [Paleomagnetism of sedimentary rocks of the Ashin series of the Western slope of the Southern Urals: new data] // Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika. 2012. V. 7, No. 4. P. 1–17 (In Russian).

*Jelínek V.* Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measures on groups of specimens // Studia geophisica et geodetica. 1978. V. 22. P. 50–62.

*Jelínek V.* Characterization of the magnetic fabrics of rocks // Tectonophysics. 1981. V. 79. P. T63–T67.

*Khotylev A.O., Tevelev Al.V., Mosejchuk V.M., Bychkov A.Yu., Devisheva N.B.* Suimskii i kurgasskii rifeiskie daikovye kompleksy: sostav i petrologicheskie osobennosti (Yuzhnyj Ural, Bashkirskii megantiklinorii) [Suim and Kurgas Riphean dyke complexes: composition and petrological features (Southern Urals, Bashkirian megazone)] // Byul. MOIP. Otd. geol. 2017. V. 92, No. 5. P. 3–14 (In Russian).

Khotylev A.O., Tevelev A.V., Moseichuk V.M., Devisheva N.B., Bychkova YA.V., Latyshev A.V. Mezoproterozojskii bazitovyi magmatizm Bashkirskogo megantiklinoriya (Yuzhnyj Ural): vozrastnye ogranicheniya, petrologicheskie i geohimicheskie osobennosti [Mesoproterozoic basic magmatism in the Bashkirian anticlinorium (southern Urals): age constraints, petrological and geochemical features] // Geologiya i geofizika, entered the press (In Russian).

*Kirschvink J.L.* The Least-Square Line and Plane and the Analysis of Paleomagnetic Data // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1980. V. 62. P. 699–718.

Konstantinov K.M., Bazhenov M.L., Fetisova A.M., Khutorskoy M.D. Paleomagnetism of trap intrusions, East Siberia: Implications to flood basalt emplacement and the Permo-Triassic crisis of biosphere // Earth and Planetary Science Letters. 2014. V. 394. P. 242–253.

Kovalev S.G., Vysockii S.I., Kovalev S.S. Petrogeohimiya magmaticheskih kompleksov zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala i vostoka Vostochno-Evropejskoj platform [Petrogeochemistry of magmatic complexes of the Western slope of the Southern Urals and the East of the East European platform] // Geologicheskii sb. № 15 / V.N. Puchkov, R.F. Abdrahmanov, I.B. Seravkin (eds.) / IG UrO RAN. SPb.: Svoe izdatelstvo, 2015. P. 117–137 (In Russian).

Latyshev A.V., Veselovskiy R.V., Ivanov A.V. Paleomagnetism of the Permian-Triassic intrusions from the Tunguska syncline and the Angara-Taseeva depression Siberian Traps Large Igneous Province: evidence of contrasting styles of magmatism // Tectonophysics. 2018. V. 723. P. 41–55. doi:10.1016/j. tecto.2017.11.035.

Levashova N.M., Bazhenov M.L., Joseph G., Meert J.G., Kuznetsov N.B., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M. Paleogeography of Baltica in the Ediacaran: paleomagnetic and geochronological data from the clastic Zigan Formation, South Urals // Precambrian Research. 2013. V. 236. P. 16–30.

Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Danukalov K.N., Golovanova I.V., Kuznetsov N.B., Fedorova N.M. Paleomagnetism of upper Ediacaran clastics from the South Urals: Implications to paleogeography of Baltica and the opening of the Iapetus Ocean // Gondvana Research. 2015. V. 28. P. 191–208.

*Lubnina N.V.* The East European Craton in the Mesoproterozoic: New key paleomagnetic poles // Doklady Earth Sciences. 2009. V. 428, No. 2. P. 252–257.

Lubnina N.V., Mertanen S., Soderlund U., Bogdanova S., Vasilieva T.I., Frank-Kamenetskiy D. A new key pole for the East European Craton at 1452 Ma: Palaeomagnetic and geochronological constraints from mafic rocks in the Lake Ladoga region (Russian Karelia) // Precambrian Research. 2010. V. 183. P. 442–462.

*McFadden P.L., McElhinny M.W.* Classification of the reversal test in palaeomagnetism // Geophys. J. Int. 1990. V. 103. P. 725–729.

Nosova A.A., Sazonova L.V., Kargin A.V., Larionova Y.O., Gorozhanin V.M., Kovalev S.G. Mesoproterozoic Within-Plate Igneous Province of the Western Urals: Main Petrogenetic Rock Types and Their Origin // Petrology. 2012. V. 20, No. 4. P. 356–390.

*O'Driscoll B., Ferre E.C., Stevenson S.T.E., Magee C.* The significance of magnetic fabric in layered mafic-ultramafic intrusions. Chapter 7 // *Charlier B. et al. (eds.).* Layered intrusions. Springer, 2015. P. 295–329.

*Park J.K., Tanczyk E.I., Desbarats A.* Magnetic fabric and its significance in the 1400 Ma Mealy diabase dykes of Labrador, Canada // J. Geophys. Res. 1988. V. 93, No. B11. P. 13.689–13.704.

*Pavlov V.E., Gallet Y.* Katav limestones: A unique example of remagnetization or an ideal recorder of the Neoproterozoic geomagnetic field // Izvestiya. Physics of Solid Earth. 2009. V. 45, No. 1. P. 31-40.

*Pavlov V.E., Krupenin M.T., Kuznecov N.B.* Novye paleomagnitnye dannye po katavskoj svite: k voprosu o blokovom stroenii Bashkirskogo podnyatiya [New paleomagnetic data on

the Katav formation: on the block structure of the Bashkirian uplift] // Tektonika i geodinamika skladchatyh poyasov i platform fanerozoya: Materialy XLIII Tektonicheskogo Soveshchaniya [Tectonics and Geodynamics of Folded Belts and Phanerozoic Platforms: Proceedings of the XLIII Tectonic Meeting]. Moscow: GEOS, 2010. V. 2. P. 101–107 (In Russian).

*Potter D.K., Stephenson A.* Single-domain particles in rocks and magnetic fabric analysis // Geophysical Research Letters. 1988. V. 15. P. 1097–1100.

*Puchkov V.N.* Paleogeodinamika Yuzhnogo i Srednego Urala [Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals]. Ufa: Dauria, 2000. 146 p. (In Russian).

*Puchkov V.N.* Geologiya Urala i Priuralya (aktualnye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and the Cisurals (actual issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa: DizajnPoligrafServis, 2010. 280 p. (In Russian).

Puchkov V.N., Bogdanova S.V, Ernst R.E., Kozlov V.I., Krasnobaev A.A., Söderlund U., Wingate M.T.D., Postnikov A.V., Sergeeva N.D. The ca. 1380 Ma Mashak igneous event of the Southern Urals // Lithos. 2013. V. 174. P. 109–124.

Rochette P., Jenatton L., Dupuy C., Boudier F., Reuber I. Diabase dikes emplacement in the Oman ophiolite: a magnetic fabric study with reference to geochemistry // Ophiolite Genesis and Evolution of the oceanic lithosphere / *Tj. Peters et al.* (*eds.*): Proceedings of the Ophiolite Conference, held in Muscat, Oman (7–18 January 1990). 1991. P. 55–82.

*Ronkin Y.L., Tihomirova M., Maslov A.V.* The Southern Urals Large Igneous Province with an age of approximately 1380 Ma: Precision U–Pb ID-TIMS constraints // Doklady Earth Sciences. 2016. V. 468, No. 2. P. 587–592. *Salminen J., Pesonen L.J.* Palaeomagnetic and rock magnetic study of the Mesoproterozoic sill, Valaam island, Russian Karelia // Precambrian Res. 2007. V. 159. P. 212–230.

*Shipunov S.V.* Osnovy paleomagnitnogo analiza: Teoriya i praktika [Basics of paleomagnetic analysis: Theory and practice]. M.: Nauka, 1993. 159 p. (Trudy GIN; Is. 487). (In Russian).

*Sun S.S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geol. Soc. London. Spec. Publ. 1989. V. 42. P. 313–345.

Svyazhina I.A., Puchkov V.N., Ivanov K.S., Petrov G.A. Paleomagnetizm ordovika Urala [Ordovician paleomagnetism of the Urals]. Ekaterinburg: IG UrO RAN, 2003. 136 p. (In Russian).

*Tarling D.H., Hrouda F.* The Magnetic Anisotropy of Rocks. Chapman, Hall, London, 1993. 217 p.

*Tevelev Al.V., Tevelev Ark.V.* Sdvigovye magmaticheskie dupleksy[Shear magmatic duplexes] // Tektonika, geodinamika i processy magmatizma i metamorfizma [Tectonics, geodynamics and processes of magmatism and metamorphismShear magmatic]: Materialy XXXII Tektonicheskogo soveshchaniya [Proceedings of the XXXII Tectonic Meeting]. Moscow: GEOS, 1999. V. 1. P. 189–193 (In Russian).

Torsvik T.H., Van der Voo R., Preeden U., Mac Niocaill C., Steinberger B., Doubrovine P.V., van Hinsbergen D.J.J., Domeier M., Gaina C., Tohver E., Meert J.G., McCausland P.J.A., Cocks L.R.M. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics // Earth-Science. Reviews. 2012. V. 114. P. 325–368.

Ziiderveld J.D.A. A.C. demagnetization of rocks: analysis of results. Methods in paleomagnetism / D.W. Collinson, K.M. Creer (eds.). Amsterdam: Elsevier, 1967. P. 254–286.

### Сведения об авторах:

**Латышев Антон Валерьевич,** канд. геол.-мин. наук; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ), геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), г. Москва. E-mail: anton.latyshev@gmail.com

Аносова Майя Борисовна, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ), геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, г. Москва. E-mail: mai.anosova@yandex.ru

**Хотылев Алексей Олегович,** канд. геол.-мин. наук; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ), геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, г. Москва. E-mail: akhotylev@gmail.com

### About the authors:

Latyshev Anton, PhD in Geology; Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University (Lomonosov MSU or MSU), Geological Faculty, department of regional geology and Earth history; Schmidt Institute of the Physics of the Earth RAS (IPE RAS), Moscow. E-mail: anton.latyshev@gmail.com

Anosova Maiia, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University (Lomonosov MSU or MSU), Geological Faculty, department of regional geology and Earth history, Moscow. E-mail: mai.anosova@yandex.ru

**Khotylev Alexey,** PhD in Geology; Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University (Lomonosov MSU or MSU), Geological Faculty, department of regional geology and Earth history, Moscow. E-mail: akhotylev@gmail.com

УДК: 532.546, 004.94

DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-10

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ОТ ЕЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

© 2019 г. А.Л. Хашпер, Т.Р. Аминев, А.И. Федоров, А.В. Жонин

Реферат. Авторами проведено комплексное исследование влияния напряженного состояния на проницаемость горной породы продуктивного пласта. Исследование включает как экспериментальную работу на естественных низкопроницаемых образцах керна, так и математическое моделирование сопутствующих эффектов. В рамках подготовки экспериментальной работы была разработана специальная методика проведения фильтрационных экспериментов на образцах керна. Суть методики заключается в применении многократного ступенчатого обжатия образца горной породы с определением ее проницаемости на каждой ступени. Эксперименты проводились как по газу, так и по жидкости в термобарических условиях залегания продуктивного пласта на современном лабораторном оборудовании. Проведенные эксперименты подтвердили наличие эффекта необратимого снижения проницаемости породы при увеличении эффективного давления при первом цикле нагружения, а также присутствие упругих деформаций при последующих циклах нагружения-разгрузки. В результате обработки экспериментальных данных были получены соответствующие корреляции в форме Джонса-Оуэнса [Jones, Owens, 1980]. Полученные коэффициенты деградации проницаемости в зависимости от нагружения были использованы на этапе математического моделирования при построении гидродинамической модели. Для выполнения этого этапа авторами разработан программный модуль для учета зависимости проницаемости от полного напряженно-деформированного состояния при гидродинамическом моделировании. Для расчета компонентов тензора напряжений используется метод граничных элементов, а учет зависимости проницаемости от напряженного состояния реализован в виде итерационного сопряжения с гидродинамической моделью.

Результаты моделирования показали, что учет влияния напряженно-деформированного состояния при расчете проницаемости позволяет выявить дополнительные зоны ухудшения проницаемости по сравнению с моделями, учитывающими только зависимость от пластового давления. В дальнейшем на основе разработанного модуля планируется создать инструмент, позволяющий исследовать изменение проницаемости породы при изменении ее напряженно-деформированного состояния для различных комбинаций режимов эксплуатации скважин, что позволит модернизировать методику перевода скважин в систему поддержания пластового давления, уточнить технологические запасы низкопроницаемых нефтяных месторождений и оптимизировать стратегию разработки низкопроницаемых коллекторов. В перспективе полученную технологию учета изменения проницаемости при изменении напряженно-деформированного состояния горной породы можно транслировать на другие геологические объекты, в том числе газовые месторождения.

Ключевые слова: проницаемость, эффективное давление, фильтрационные эксперименты, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование

# RESEARCH OF DEPENDENCE OF ROCK PERMEABILITY ON ITS STRESS-STRAIN STATE

### A. L. Khashper, T. R. Aminev, A. I. Fedorov, A. V. Zhonin

**Abstract.** The authors conducted a comprehensive study of the stress effect on the permeability of the rock of the productive formation. The study included both experimental work on natural low-permeable core samples and mathematical modeling of concomitant effects. As part of the preparation of the experimental work, a special technique was developed for conducting filtration experiments on core samples. The essence

Для цитирования: Хашпер А.Л., Аминев Т.Р., Федоров А.И., Жонин А.В. Исследование зависимости проницаемости горной породы от ее напряженно-деформированного состояния // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 133–140. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-10.

**For citation:** Khashper A.L., Aminev T.R., Fedorov A.I., Zhonin A.V. Research of dependence of rock permeability on its stress-strain state // Geologicheskii vestnik. 2019. No.1. P. 133–140. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-10.

of the technique is the use of a multiple stepwise compression of a rock sample with the determination of its permeability at each step. The experiments were carried out both in gas and in liquid under thermobaric conditions of reservoir occurrence, on modern laboratory equipment. The experiments results confirmed the effect of an irreversible decrease in the rock permeability with an increase in the effective pressure during the first loading cycle, as well as the presence of elastic deformations in subsequent loading-unloading cycles. As a result of processing the experimental data, the corresponding correlations in the form of Jones-Owens were obtained [Jones, Owens, 1980]. The obtained coefficients of permeability degradation, depending on the loading, were used at the stage of mathematical modeling while building hydrodynamic model. To accomplish this stage, the authors have developed a software module for taking into account the dependence of permeability on the total stress-strain state in hydrodynamic modeling. To calculate the stress tensor components, the boundary element method is used, and the allowance for the dependence of permeability on the stress state is implemented in the form of an iterative conjugation with a hydrodynamic model. The modeling results revealed that taking into account the influence of the stress-strain state on permeability allows to detect additional zones of permeability deterioration compared with models that take into account only the dependence on reservoir pressure. In the future, on the base of the developed module, it is planned to create a tool for investigating the change in rock permeability with changing its stress-strain state for various combinations of well operation modes, which will allow modernizing the method of transferring wells to the reservoir pressure maintenance system, clarifying technological reserves of low-permeable oil fields and optimizing the strategy of low-permeability reservoirs development. In the future, the obtained technology for recording changes in rock permeability with a change in its stress-strain state can be transmitted to other geological objects, including gas fields.

Key words: permeability, effective pressure, filtration experiments, stress-strain state, mathematical modeling

### Введение

Нефтенасыщенный коллектор с точки зрения физики является пороупругой средой. В общем случае любая характеристика породы является функцией состояния среды. В настоящей работе рассмотрено влияние напряженного состояния среды на одну из важнейших характеристик породы — проницаемость. Напряженное состояние пороупругой среды характеризуется двумя параметрами — поровым давлением и эффективным напряжением, испытываемым матрицей. Изменение одного из параметров может повлиять на другой. Так, например, снижение пластового давления может увеличить нагрузку на матрицу продуктивного пласта и наоборот. Изменение нагрузки на вмещающую матрицу породы может в свою очередь привести к изменению ее проницаемости, поскольку последняя определяется в том числе геометрическими характеристиками матрицы. Данные эффекты наиболее сильно проявляются вблизи техногенных источников изменения напряженного состояния, таких как скважины или трещины гидроразрыва пласта. Изменение проницаемости вследствие изменения напряженного состояния пласта может впоследствии привести к ускоренным темпам падения дебита нефти. К настоящему времени существует ряд работ, в которых эффект влияния напряженного состояния на проницаемость подтвержден, а также предложен ряд моделей для

Геологический вестник. 2019. №1

его описания [Кашников, Кузнецова, Мордвинов, 2008; Кашников, Ашихмин, Обшаров, 2008; Карманский, 2009; Жуков, 2010; Попов, 2014; Родионов, Боталов, Легостаев, 2016; Карев, Коваленко, Химуля, 2017]. Важным элементом для корректного описания проблемы являются экспериментальные исследования на керновом материале низкопроницаемых пористых сред в широком диапазоне давлений, в условиях приближенных к пластовым. На основании таких исследований можно построить корректную математическую модель для описания рассматриваемого эффекта и масштабировать данную модель относительно объекта разработки.

### Экспериментальные исследования зависимости проницаемости от эффективного давления

На сегодняшний день существует значительное количество исследований, посвященных данной теме [Кашников, Кузнецова, Мордвинов, 2008; Кашников, Ашихмин, Обшаров, 2008; Карманский, 2009; Жуков, 2010; Попов, 2014; Родионов, Боталов, Легостаев, 2016; Карев, Коваленко, Химуля, 2017]. Для различных типов горных пород величина и характер эффекта снижения проницаемости при увеличении геостатической нагрузки могут быть разными. Как правило, авторы упомянутых работ обращают внимание на зависимость проницаемости от эффективного давления. Под эффективным давлением будем понимать давление на матрицу породы, которое рассчитывается по формуле:

$$P = P - P$$

где  $P_r$  — геостатическое давление (давление вышележащих пород), P — пластовое давление (давление, под которым находятся жидкость и газ, насыщающие поровое пространство пласта).

Поскольку модели и зависимости, приведенные в работах разных авторов, отличаются друг от друга, наиболее верным решением мы считаем проведение собственных лабораторных экспериментов на образцах пород. Таким образом, экспериментально описаны будут именно наиболее интересные в практическом отношении образцы, с другой стороны будет разработана методика проведения самих экспериментов. Далее опишем методику и приведем результаты экспериментального определения влияния эффективного давления на проницаемость горных пород.

### Метод проведения эксперимента

Для проведения лабораторных испытаний было отобрано 50 образцов керна. Имеющуюся коллекцию разделили на две партии для проведения фильтрационных экспериментов по газу и по жидкости соответственно. В ходе экспериментов по газу исследовано циклическое изменение давления обжатия керна. По итогам проведенных исследований было установлено: при увеличении эффективного напряжения (или снижении пластового давления) происходит снижение проницаемости породы (рис. 1).

1) Первое нагружение является упруго-пластичным (Цикл 1). При этом происходят необратимые изменения в породе в сторону ухудшения фильтрационно-емкостных свойств породы.

 2) Разгрузка и повторное нагружение (Циклы
2, 3) являются упругими. При этом порода обратимо реагирует на давление.

Корреляция для проницаемости в форме Jones&Owens1980 имеет вид [Jones, Owens, 1980]:

 при первом нагружении (упруго-пластический режим)

$$\frac{k}{k_0} = \left[C_1 + A \cdot \ln(P_1)\right]^3$$

где *А* — коэффициент, характеризующий степень деградации проницаемости при упруго-пластическом нагружении.



Рис. 1. Изменения пористости и проницаемости в процессе нагружения и разгрузки

Fig. 1. Porosity and permeability changes while loading and unloading

 при втором и последующих нагружениях (упругий режим)

$$\frac{k}{k_0} = \left[C_1 + B \cdot \ln(P_1)\right]^3$$

где *В* — коэффициент, характеризующий степень деградации проницаемости при упругом нагружении и разгрузке.

Таким образом, наличие эффекта необратимого снижения проницаемости породы при снижении пластового давления экспериментально подтверждено.

Далее экспериментально полученные корреляции используются при математическом моделировании зависимости проницаемости от напряженного состояния.

### Обзор существующих моделей

В настоящее время применяемое в Компании программное обеспечение использует модель зависимости проницаемости породы только от пластового давления, а не от полного напряженно-го состояния. Реализовано два способа расчета: 1) ROCKTAB и 2) ROCKMULT.

Под моделью ROCKTAB понимается линейная зависимость проницаемости от пластового давления. В корпоративном программном обеспечении эта модель реализована следующим образом. В ключевом слове ROCKTAB пользователем задается таблица зависимости проницаемости породы от давления. Если в опции уплотнения породы ROCKCOMP задано REVERS (уплотнение породы полностью обратимо при возрастании давления), таблица линейно интерполируется (рис. 2). Если задано IRREVERS (уплотнение породы необратимо, при возрастании давления поровое пространство не расширяется повторно), то для нагружения значения проницаемости интерполируются, а для разгрузки значения проницаемости берутся равными значениям проницаемости при минимальном давлении.

На рис. 2: Р — пластовое давление, k — проницаемость, k<sub>0</sub> — начальная проницаемость.

Модель ROCKMULT реализует зависимость проницаемости породы от пластового давления по лабораторным корреляциям. Первое нагружение является упруго-пластическим, разгрузка и повторные нагружения — упругими.

В обоих случаях влияние изменения тензора напряжений на проницаемость породы не учитывается. Поэтому поставлена задача разработать и реализовать модель зависимости проницаемости от полного напряженно-деформированного состояния.

### Математическое моделирование

В работе предлагается рассчитывать проницаемость по лабораторным корреляциям [Jones, Owens, 1980] в зависимости от полного напряженно-деформированного состояния:

$$\frac{k}{k_0} = \left[1 + A \cdot \ln\left(\frac{S}{S_0}\right)\right]^3$$
$$S = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3} - \alpha \cdot P$$
$$S_0 = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3} - \alpha \cdot P$$

где:  $A = \begin{cases} -0.057, \\ -0.038, \end{cases}$ 

k — проницаемость породы,  $k_0$  — начальная проницаемость,  $S_1^{\text{лок}}$ ,  $S_2^{\text{лок}}$ ,  $S_3^{\text{лок}}$  — локальные главные напряжения,  $\alpha$  — коэффициент пороупругости,  $P^{\text{лок}}$  — локальное пластовое давление,  $0S_1^{\text{per}}$ ,  $S_2^{\text{per}}$ ,  $S_3^{\text{per}}$  — региональные главные напряжения,  $P^{\text{пок}}$  — региональные напряжения,  $P^{\text{per}}$  — региональное пластовое давление.

Для получения компонентов тензора напряжений решается задача о нахождении 3D напряженного состояния в однородной среде в присутствии



Рис. 2. График зависимости множителя на проницаемость от пластового давления для ключевого слова ROCKTAB Fig. 2. Graph of the dependence of permeability multiplier on reservoir pressure for the keyword ROCKTAB

закрепленных или незакрепленных трещин гидроразрыва пласта. Для этого нужно решить уравнение равновесия (см., например, [Ландау, Лифшиц, 1987]):

$$\Delta \mathbf{U} + \frac{1}{1 - 2\upsilon} \nabla \operatorname{div} U + \frac{1}{\mu} \mathbf{f} = 0$$

с объемной силой типа фильтрационного потенциала:  $\mathbf{f} = -\alpha \nabla P(\mathbf{r})$ ,

где U — смещение, υ — коэффициент Пуассона, μ — модуль сдвига, α — коэффициент пороупругости, *P* — пластовое давление.

В отсутствии трещин гидроразрыва пласт находится под действием трехосного регионального напряженного состояния. В главных осях тензор регионального напряжения имеет вид:

$$\sigma_{ij|_{r\to\infty}} = - \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix} ,$$

где  $S_1^{\text{per}}, S_2^{\text{per}}$  — горизонтальные сжимающие силы,  $S_3^{\text{per}}$  — вертикальная сжимающая сила (горное давление).

Пусть для определенности ось 2 является осью действия максимального горизонтального напряжения, тогда угол между осью 2 и осью у назовем направлением действия регионального напряжения и обозначим символом β. Граничные условия для трещин, находящихся в пласте, имеют вид:

1. Закрепленные трещины (заданной формы):

$$u_{\tau}^{+} - u_{n}^{-} = w_{n}(s), u_{\tau}^{+} - u_{\tau}^{-} = w_{\tau}(s), u_{\omega}^{+} - u_{\omega}^{-} = w_{\omega}(s).$$

2. Незакрепленные трещины (с заданным давлением):

$$\sigma_{nn} = -P_{f}(S), \sigma_{\tau n} = \sigma_{\omega n} = 0.$$

Здесь  $w_n(s), w_{\tau}(s), w_{\Theta}(s) - функции формы (разрывы смещения) берегов трещины, <math>P_f$  – давление в трещине, s – параметр размерности длины, задающий проекцию трещины на плоскость *ху*.

Решение поставленной задачи выполнено методом граничных элементов [Крауч, Старфилд, 1987]. Кроме того, реализовано моделирование зависимости проницаемости породы от ее полного напряженно-деформированного состояния. Расчет прони-



Рис. 3. График зависимости множителя на проницаемость от давления для ключевого слова ROCKMULT

Fig. 3. Graph of the dependence of permeability multiplier on effective pressure for the keyword ROCKMULT

цаемости по реализованной модели внедрен в непромышленную версию корпоративного программного комплекса «PH-КИМ». С ее помощью построена карта изменения проницаемости для реальной модели сектора одного из месторождений.

Полученная карта показывает изменение проницаемости в %. Положительные значения соответствуют увеличению проницаемости, отрицательные — ее уменьшению (рис. 4).

Проведено сравнение результатов моделирования с картами, полученными в ROCKTAB (рис. 5).

Сравнение карт показало, что результаты моделирования выявили зоны ухудшения проницаемости породы вокруг нагнетательных скважин, которые не выявляет ROCKTAB, т.к. модель ROCKTAB не учитывает влияние на проницаемость тензора напряжений. Обнаруженное ухудшение проницаемости вокруг нагнетательных скважин объясняется тем, что закачка жидкости в пласт создает дополнительную механическую нагрузку на матрицу породы, следовательно порода уплотняется и проницаемость снижается.

Кроме того, обнаружено, что модель ROCKTAB показывает завышенные значения изменения проницаемости при изменении пластового давления.

### Выводы

Результаты проведенных лабораторных исследований зависимости фильтрационно-емкостных свойств керна от приложенных к нему напряжений подтвердили наличие эффекта необратимого снижения проницаемости породы при снижении пластового давления. На основе экспериментально полученных корреляций разработана математическая модель зависимости проницаемости от напряженно-деформированного состояния и реализована в виде программного модуля. Установлено, что учет влияния изменения тензора напряжений при расчете проницаемости позволяет выявить дополнительные зоны ухудшения проницаемости вокруг нагнетательных скважин.

Таким образом, показано, что реализация проекта позволит исследовать изменение проницаемости породы при изменении ее напряженно-деформированного состояния для различных комбинаций режимов эксплуатации скважин и определять стратегию и наиболее эффективные технологии промышленной эксплуатации низкопроницаемых коллекторов.



Рис. 4. Карта изменения проницаемости, полученная в разработанном программном модуле Fig. 4. Permeability change map obtained by the developed software module



Рис. 5. Карта изменения проницаемости, полученная в ROCKTAB

Fig. 5. Permeability change map obtained by the ROCKTAB model

### Список литературы:

Жуков В.С. Оценка изменений физических свойств коллекторов, вызванных разработкой месторождений нефти и газа // Семинар № 2 ООО «ВНИИГАЗ». – 2010. – С. 341–349.

Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Химуля В.В. Влияние деформационных процессов на проницаемость горных пород и устойчивость нефтяной скважины // Ученые записки физического факультета Московского университета. — 2017. – № 4. – С. 1740501-1–1740501-7.

Карманский А.Т. Коллекторские свойства горных пород при изменении вида напряженного состояния // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 289–292.

Кашников О.Ю., Кузнецова О.Ю., Мордвинов В.А. Влияние деформаций терригенного коллектора на фильтрационно-емкостные свойства пласта и продуктивность скважин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 8. – С. 70–72.

Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г., Обшаров П.А. Экспериментальные исследования влияния длительного действия высоких эффективных напряжений на фильтрационноемкостные характеристики монолитных образцов и образцов с трещинами // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. −2008. – № 8. – С. 51–54.

*Крауч С.Л, Старфилд А.М.* Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М.: Мир, 1987. – 328 с.

*Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Теория упругости. 4-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 248 с.

Попов В.В. О влиянии эффективного давления на фильтрационно-емкостные свойства карбонатных пород // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Севера-Востока России: Сб. матер. 4-й науч.-практ. конф. – Якутск, 2014. – С. 290–292.

Родионов С.П., Боталов А.Ю., Легостаев Д.Ю. Моделирование процесса двухфазной фильтрации с учетом воздействия периодической нагрузки // Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 73–83.

Jones F.O., OwensW.W. A Laboratory Study of Low Permeability Gas Sands // Journal of Petroleum Technology. Society of Petroleum Engineers. – 1980. – V. 32, Is. 09. – P. 31–40.

### **References:**

*Crouch S.L., Starfield A.M.* Metody granichnykh elementov v mekhanike tverdogo tela [Boundary element methods in solid mechanics]. M.: Mir, 1987. – 328 p. (In Russian).

*Jones F.O., OwensW.W.* A Laboratory Study of Low Permeability Gas Sands // Journal of Petroleum Technology. Society of Petroleum Engineers. 1980. V. 32, Is. 09. P. 31–40.

*Karev V.I., KovalenkoYu.F., Khimulya V.V.* Vliyanie deformatsionnykh protsessov na pronitsaemosť gornykh porod i ustoichivosť neftyanoi skvazhiny [Effect of deformation processes on rocks permeability and oil well stability] // Uchenye zapiski fizicheskogo fakulteta Moskovskogo universiteta. 2017. No. 4. P. 1740501-1–1740501-7 (In Russian).

*Karmanskii A.T.* Kollektorskie svoistva gornykh porod pri izmenenii vida napryazhennogo sostoyaniya [Reservoir properties of rocks for changing the type of stress state] // Zapiski Gornogo instituta [Notes of the Mining Institute]. 2009. V. 183. P. 289–292 (In Russian).

Kashnikov O. Yu., Kuznetsova O. Yu., Mordvinov V.A. Vliyanie deformatsii terrigennogo kollektora na filtratsionno-emkostnye svoistva plasta i produktivnost' skvazhin [The effect of terrigenous reservoir deformations on filtration-capacitive properties of reservoir and well productivity] // Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii [Geology, geophysics and development of oil and gas fields]. 2008. № 8. P. 70–72 (In Russian). Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., Obsharov P.A. Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya dlitel'nogo deistviya vysokikh effektivnykh napryazhenii na fil'tratsionno-emkostnye kharakteristiki monolithykh obraztsov i obraztsov s treshchinami [Experimental studies of the effect of long-acting high effective stresses on the filtration-capacitive characteristics of monolithic samples and samples with fractures] // Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii [Geology, geophysics and development of oil and gas fields]. 2008. No. 8. P. 51–54 (In Russian).

*Landau L.D., Lifshits E.M.* Teoreticheskaya fizika. Teoriya uprugosti [Theoretical physics. Elasticity theory]. M.: Nauka, 1987. 248 p. (In Russian).

*Popov V.V.* O vliyanii effektivnogo davleniya na filtratsionno-emkostnye svoistva karbonatnykh porod [About the influence of effective pressure on the filtration-capacitive properties of carbonate rocks] // Sb. mater. 4-й nauch.-prakt. konfer. «Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii» [Collection of materials of the 4-th scientific-practical conference "Geology and mineral resources of the North-East of Russia"]. Yakutsk, 2014. P.290–292 (In Russian).

*Rodionov S.P., Botalov A.Yu., Legostaev D.Yu.* Modelirovanie protsessa dvukhfaznoi filtratsii s uchetom vozdeistviya periodicheskoi nagruzki [Simulation of a two-phase filtration process taking into account the effect of a periodic load] // Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft, gas, energetika [Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy]. 2016. V. 2, No. 2. P. 73–83 (In Russian).

*Zhukov V.S.* Otsenka izmenenii fizicheskikh svoistv kollektorov, vyzvannykh razrabotkoi mestorozhdenii nefti i gaza [Estimate of changes in the physical properties of reservoirs caused by the development of oil and gas fields] // Seminar No. 2 OOO «VNIIGAZ». 2010. P. 341–349 (In Russian).

### Сведения об авторах:

Хашпер Анна Леонидовна, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа. E-mail: KhashperAL@ufanipi.ru Аминев Тимур Радикович, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа. E-mail: AminevTR@ufanipi.ru Федоров Александр Игоревич, кандидат физ.-мат. наук, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа. E-mail: FedorovAI@ufanipi.ru

Жонин Александр Владимирович, ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа. E-mail: ZhoninAV@ufanipi.ru

### About the authors:

Khashper Anna Leonidovna, LLC «RN-BashNIPIneft», Ufa. E-mail: KhashperAL@ufanipi.ru Aminev Timur Radikovich, LLC «RN-BashNIPIneft», Ufa. E-mail: AminevTR@ufanipi.ru Fedorov Aleksandr Igorevich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, LLC «RN-BashNIPIneft», Ufa. E-mail: FedorovAI@ufanipi.ru

Zhonin Aleksandr Vladimirovich, LLC «RN-BashNIPIneft», Ufa. E-mail: ZhoninAV@ufanipi.ru

УДК 552.22

DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-11

# ОПРОБОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВЫДЕЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ МИКРОПОРОВЫХ ПОРОД ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ КРИВЫХ В ТУРНЕЙСКОМ ЯРУСЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БАШКОРТОСТАНА

### © 2018 г. Б. Л. Хашпер, О. В. Надеждин, Л. Р. Миникеева, Т. В. Бурикова

Реферат. Микропоровые породы характеризуются высокими значениями пористости, низкими значениями проницаемости и высокими значениями остаточной воды. Целью работы является опробование алгоритма выделения интервалов микропоровых пород по данным каротажа сопротивления. Для выделения интервалов микропоровых пород, содержащих связанную воду, предлагается рассчитать электрическое сопротивление для традиционного порового коллектора. Известно, что проводимость связанной и свободной воды различна. Следовательно, фактическое электрическое сопротивление в интервалах микропоровых пород будет выше, чем синтетическое электрическое сопротивление, рассчитанное по модели, не учитывающей микропоры. Таким образом, алгоритм включает следующие шаги: расчет синтетической кривой пористости; построение объемной модели; восстановление синтетической кривой сопротивления. Для оценки качества предлагаемого алгоритма проведен сравнительный анализ интервалов микропоровых пород, определенных по керну, и интервалов микропоровых пород, определенных по алгоритму: рассчитаны вероятности ошибок 1 и 2 рода. Анализ результатов тестирования алгоритма выделения интервалов микропоровых пород выявил хорошее соответствие между интервалами микропоровых пород, определенными по керну, и интервалами микропоровых пород, определенными по алгоритму. Таким образом, предлагаемый алгоритм позволяет выделять интервалы микропоровых пород по каротажу сопротивления, что в свою очередь позволяет уточнить толщину продуктивного коллектора и, следовательно, фундаментально меняет представление о флюидальной модели отложений.

**Ключевые слова:** микропоровые породы, восстановление синтетических кривых сопротивления, каротаж сопротивления, сравнение с данными керна, ошибка 1 рода, ошибка 2 рода

# TESTING OF MICROPOROUS ROCKS IDENTIFICATION METHOD BASED ON SYNTHETIC WELL LOGGING CURVES CALCULATION TECHNIQUE IN THE TOURNAISIAN STAGE OF BASHKORTOSTAN OILFIELDS

### B. L. Khashper, O. V. Nadezhdin, L. R. Minikeeva, T. V. Burikova

**Abstract.** Microporous rocks are characterized by high porosity, low permeability and high residual water saturation. The purpose of the work is to test an algorithm for microporous rocks intervals identification based on resistivity logging data. To identify microporous rocks intervals containing residual water saturation it is proposed to calculate electrical resistance using mineral model for porous reservoir. It is known that free water conductivity and bound water conductivity are different. So actual electrical resistance in microporous rocks intervals will be greater than synthetic resistance calculated using mineral model which doesn't take into account micropores. On the base of this assumption microporous rocks intervals are

Для цитирования: Хашпер Б.Л., Надеждин О.В., Миникеева Л.Р., Бурикова Т.В. Опробование алгоритма выделения интервалов микропоровых пород по комплексу геофизических исследований скважин с применением методики восстановления синтетических кривых в турнейском ярусе месторождений Башкортостана // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 141–148. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-11.

**For citation:** Khashper B.L., Nadezhdin O.V., Minikeeva L.R., Burikova T.V. Testing of Microporous Rocks Identification Method Based on Synthetic Well Logging Curves Calculation Technique in the Tournaisian stage of Bashkortostan Oilfields // Geologicheskii vestnik. 2019. No. 1. P. 141–148. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-11.

identified by using a technique of microprobes logging synthetic curves calculation. So the algorithm includes the following steps: calculation of porosity synthetic curve; building a volume model; calculation of resistance synthetic curve. For quality accession of developed algorithm comparative analysis between forecast microporous rocks intervals and microporous rocks intervals detected by the core is carried out: false positive rate and false negative rate are calculated. Testing of developed method for microporous rocks identification has revealed a good agreement between forecast intervals and intervals detected by the core. So application of proposed algorithm allows microporous rocks intervals identifying by electrical logging which allows specifying a thickness of reservoir and, consequently, fundamentally changes the concept of fluid model.

**Keywords:** microporous rocks, calculation of resistance synthetic curve, resistivity logging, comparison with core data, false positive rate, false negative rate

### Введение

В работе предлагается алгоритм выделения микропоровых пород на основе данных каротажа сопротивления с применением методики восстановления синтетических кривых ГИС [Миникеева и др., 2018а].

Алгоритм включает следующие шаги: необходимую подготовку каротажных кривых, восстановление синтетической кривой пористости, построение объемной модели, расчет синтетических кривых каротажа микрозондов. В работе рассчитаны модели для микробокового каротажа (МБК), микропотенциал-зонда (МПЗ), микроградиент-зонда (МГЗ).

Все расчеты (включая предобработку данных) были выполнены при помощи модулей программного комплекса для многоскважинного анализа и интерпретации данных ГИС и керновых исследований [Миникеева и др., 2018b].

Для оценки качества разработанного алгоритма проводится сравнительный анализ прогнозных интервалов микропоровых пород с интервалами микропоровых пород, определенных по керну: рассчитываются вероятности ошибок 1 и 2 рода. Вероятность ошибки 1 рода равна отношению количества ошибок 1 рода в выборке к общему количеству случаев определения микропоровых пород по керну. Вероятность ошибки 2 рода равна отношению количества ошибок 2 рода в выборке к общему количеству случаев определения микропоровых пород по алгоритму.

В работе приводятся результаты тестирования разработанной методики выделения интервалов микропоровых пород на скважинах турнейского яруса (косьвинский, черепетский, кизеловский, малевский, упинский горизонты) месторождений Башкортостана. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что предлагаемый алгоритм позволяет выделять интервалы микропоровых пород, содержащих связанную воду, по каротажу микрозондов.

Каротаж сопротивления — один из методов ГИС, основанный на измерении удельного электрического сопротивления горных пород. Удельное электрическое сопротивление зависит от минерального состава, пористости, строения породы; оно в большей степени зависит от структуры пустотного пространства породы. Для выделения интервалов микропоровых пород, содержащих связанную воду, в работе предлагается рассчитать электрическое сопротивление по минеральной модели для традиционного порового коллектора. Известно, что проводимость связанной и подвижной воды различна, поэтому фактическое электрическое сопротивление в интервалах микропоровых пород должно быть больше синтетического сопротивления, т. к. синтетическое сопротивление рассчитывается по минеральной модели, не учитывающей микропоры (рис. 1). На основе этого предположения выделяются интервалы микропоровых пород с применением методики восстановления синтетических кривых каротажа микрозондов [Заляев, 1990; Меркулов, Посысоев, 2004]. Необходимо отметить, что таким же приращением будут обладать и нефтенасыщенные пласты, за счет остаточного нефтенасыщения в призабойной зоне. Поэтому при применении алгоритма эти интервалы были отсечены.

### Метод

Алгоритм выделения интервалов микропоровых пород заключается в следующем. Восстанавливается синтетическая кривая пористости на основе расчета параметров петрофизической модели «керн-ГИС». Стоит отметить, что для построения корректной модели выполняется необходимая предобработка исходных данных — начиная от увязки кривых ГИС между собой до увязки данных керна с данными кривых ГИС [Миникеева и др., 2018b].

Далее выполняется построение объемной модели — определение объемных содержаний скелета породы, флюида и глин. В модель входят кривая гамма-каротажа (ГК), кривая нейтронного гаммакаротажа (НГК), объемные содержания скелета породы, флюида и глин, характерные значения каротажных кривых (соответствующие коэффициенты) ГК и НГК для минеральных компонент. Коэффициенты модели подбираются таким образом, чтобы объемное содержание флюида по объемной модели соответствовало пористости, а объемные содержания скелета породы и глин по объемной модели соответствовали показаниям двойного разностного гамма-каротажа (аГК) и двойного разностного нейтронного каротажа (аНК).

Затем на основе полученных значений объемных долей глин и флюида рассчитывается синтетическая кривая сопротивления. Для каждой скважины рассчитывается своя модель синтетической кривой сопротивления.

В работе рассчитаны модели для микробокового каротажа (МБК), микропотенциал-зонда (МПЗ), микроградиент-зонда (МГЗ). Для большинства скважин в интервалах микропоровых пород синтетическая проводимость меньше фактической, притом эта зависимость прослеживается для всех трех рассмотренных методов каротажа сопротивления МБК, МПЗ, МГЗ.

Для оценки качества разработанного алгоритма был проведен сравнительный анализ прогнозных интервалов микропоровых пород с интервалами микропоровых пород, определенных на керне: рассчитаны вероятности ошибок 1 и 2 рода [Леман, 1979]. Ошибкой 1 рода (ложным срабатыванием) называется ошибка, состоящая в опровержении верной гипотезы. Ошибкой 2 рода (пропуском события) называется ошибка, состоящая в принятии ложной гипотезы. В нашем случае ошибкой 1 рода будет случай, когда по керну определены микропоровые породы, а по алгоритму — немикропоровые; ошибкой 2 рода будет случай, когда по алгоритму определены микропоровые породы, а по керну немикропоровые. Пусть TP (True Positive) — количество случаев, когда по керну и по методике определены микропоровые породы, *TN* (True Negative) — количество случаев, когда по керну и по методике определены немикропоровые породы, FP (False Positive) — количество случаев, когда по керну определены микропоровые, а по методи- $\kappa e$  — немикропоровые, *FN* (False Negative) —  $\kappa o$ личество случаев, когда по методике определены микропоровые, а по керну — немикропоровые. *FP* — количество ошибок 1 рода. *FN* — количество ошибок 2 рода.



Рис. 1. Выделение интервалов микропоровых пород по замеренным и синтетическим кривым сопротивления

Fig. 1. Microporous rocks intervals identification by measured and synthetic resistance

Вероятность ошибки 1 рода равна отношению количества ошибок 1 рода в выборке к общему количеству случаев определения микропоровых пород по керну. Вероятность ошибки 2 рода равна отношению количества ошибок 2 рода в выборке к общему количеству случаев определения микропоровых пород по алгоритму.

$$P_1 = \frac{FP}{TP + FP} , P_2 = \frac{FN}{TP + FN} .$$
(1)

### Результаты апробации

В качестве целевого фонда для апробации методики были рассмотрены 120 скважин месторождений Башкортостана.

Для определения параметров петрофизической модели был выполнен расчет коэффициентов модели «керн-ГИС» по данным пористости по керну Кп\_керн, и нормализованным кривым гамма- и нейтронного каротажа аГК, аНК. Получилась следующая модель:

$$= -0.2433 \cdot -0.3 \cdot +0.23147. \quad (2)$$

На основе полученных параметров рассчитывались объемные содержания скелета, флюида и глины  $V_{\rm CK}$ ,  $V_{\rm Фл}$ ,  $V_{\rm ГЛ}$  из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} H\Gamma K = H\Gamma K \quad \cdot V \quad + H\Gamma K \quad \cdot V \quad + H\Gamma K \quad \cdot V \\ \Gamma K = \Gamma K \quad \cdot V \quad + \Gamma K \quad \cdot V \quad + \Gamma K \quad \cdot V \\ 1 = V \quad + V \quad + V \end{cases}$$
(3)

где IK — кривая гамма-каротажа; HIK — кривая нейтронного каротажа;  $V_{CK}$ ,  $V_{\Phi \eta}$ ,  $V_{\Gamma \eta}$  — объемные содержания скелета породы, флюида и глин соответственно;  $\Gamma K_{CK}$ ,  $\Gamma K_{\Phi \eta}$ ,  $\Gamma K_{\Gamma \eta}$ ,
${\rm H}\Gamma{\rm K}_{\rm CK},\,{\rm H}\Gamma{\rm K}_{{}_{\rm P\!\Lambda}},\,{\rm H}\Gamma{\rm K}_{{}_{\Gamma\!\Lambda}}-$  характерные значения каротажных кривых ГК и HГК для соответствующих минеральных компонент.

Получились следующая объемная модель:

$$\begin{cases} H\Gamma K = 0.772 \cdot V_{\rm CK} - 0.039 \cdot V_{\Phi \Pi} - 2.56 \cdot V_{\Gamma \Pi} \\ \Gamma K = 0.05 \cdot V_{\rm CK} + 1.32 \cdot V_{\Phi \Pi} + 0 \cdot V_{\Gamma \Pi} \\ 1 = V_{\rm CK} + V_{\Phi \Pi} + V_{\Gamma \Pi} \end{cases}$$
(4)

На рисунке 2 приведен пример восстановления синтетической кривой пористости и построения объемной модели. На первом плоте показаны объемные содержания скелета, флюида и глины  $V_{\rm CK}$ ,  $V_{\Phi \Pi}$ ,  $V_{\rm Г\Pi}$ , на втором плоте приведены кривые синтетической пористости (зеленая линия), пористости по керну (красные точки) и объемное содержание флюида (синяя линия).

Далее на основе полученных значений объемных долей глин и флюида были рассчитаны синтетические кривые каротажа сопротивлений МБК, МПЗ, МГЗ:

$$Ln \_ R \_ synth = a \cdot V + b \cdot V + c.$$
 (5)

Коэффициенты a, b, c были pacсчитаны индивидуально для каждой скважины на основе корреляционнорегрессионного анализа.

На рисунках 3–4 представлены примеры выделения интервалов микропоровых пород по МБК, на рисунках 5–6 — по МПЗ, на рисунках 7–8 — по МГЗ. На первом плоте сопоставлены измеренные (зеленая линия) и синтетические (синяя линия) кривые логарифмов сопротивления. Синей жирной линией показан интервал микропоровых пород по алгоритму. На втором плоте красной линией отмечен интервал микропоровых пород по керну.

Проведен анализ результатов тестирования методики выделения микропоровых интервалов на основе алгоритма расчета синтетических кривых сопротивлений из объемной модели в турнейском ярусе месторождений Башкортостана. Качество полученных моделей оценивалось с помощью расчета вероятностей ошибок 1 и 2 рода.

Геологический вестник. 2019. №1

Для расчета вероятности ошибок МБК рассматривалось 86 интервалов. Из них было 62 микропоровых по керну и 24 немикропоровых по керну. Алгоритм выявил по МБК 65 микропоровых интервала и 21 немикропоровый. По МПЗ в анализе участвовал 171 интервал (131 микропоровых и 40 немикропоровых). По алгоритму были выявлены 148 микропоровых интервалов и 23 немикропоровых. По МГЗ результаты (в т.ч. выборка





Fig. 2. Calculation of synthetic porosity curve and volume model construction



Рис. 3–4. Примеры выделения микропоровых интервалов по MBK Fig. 3–4. Microporous rocks intervals identification by MLL



Геологический вестник. 2019. №1

-1460

-1480

-

•

-1540

-1520

-1500





интервалов) полностью совпадают с результатами по МПЗ. Вероятности ошибок 1 рода для МБК, МПЗ и МГЗ составили 0.242, 0.153 и 0.153 соответственно. Вероятности ошибок 2 рода для МБК, МПЗ и МГЗ составили 0.275, 0.25 и 0.25 соответственно.

Выделение микропоровых пород в водонасыщенном разрезе является важной задачей для настройки флюидальной модели как в процессе геологического, так и гидродинамического моделирования залежи, так как разное распределение размера пор в породе разреза определяет размер переходной зоны и соответственно изменение положения ВНК. Кроме того, информация о коллекторских свойствах породы является ключевой при выборе интервалов закачки в нагнетательных скважинах и интервалов перфорации в добывающих скважинах.

#### Выводы

Проведенный анализ показал хорошее совпадение прогнозных интервалов с интервалами, определенными по керну. Таким образом, опробованный алгоритм позволяет выделять интервалы микропоровых пород, содержащих связанную воду, автоматизированно в многоскважинном режиме по комплексу ГИС, что в свою очередь позволяет уточнить эффективную продуктивную толщину коллекторов и, как следствие, принципиально меняет представление о флюидальной модели отложений турнейского яруса. В дальнейшем планируется дополнить разработанный алгоритм возможностью дифференцировать микропоровые и нефтенасыщенные пласты.

#### Список литературы:

Заляев Н.З. Методика автоматизированной интерпретации геофизических исследований скважин. — М.: Университетское, 1990. — 144 с.

# Сведения об авторах

Хашпер Белла Леонидовна, ООО «БашНИПИнефть», г. Уфа. E-mail: BellaKhashper@gmail.com Надеждин Олег Владимирович, ООО «БашНИПИнефть», г. Уфа. E-mail: NadezhdinOV@gmail.com Миникеева Ляйсян Ришатовна, ООО «БашНИПИнефть», г. Уфа. E-mail: MinikeevaLR@bashneft.ru Бурикова Татьяна Валерьевна, ООО «БашНИПИнефть», г. Уфа. E-mail: BurikovaTV@bashneft.ru

#### About the authors:

Khashper Bella Leonidovna, LLC «BashNIPIneft», Ufa. E-mail: KhashperAL@ufanipi.ru Nadezhdin Oleg Vladimirovich, LLC «BashNIPIneft», Ufa. E-mail: NadezhdinOV@gmail.com Minikeeva Liaisian Rishatovna, LLC «BashNIPIneft», Ufa. E-mail: MinikeevaLR@bashneft.ru Burikova Tatiana Valerievna, LLC «BashNIPIneft», Ufa. E-mail: BurikovaTV@bashneft.ru

*Леман Э.* Проверка статистических гипотез. – М.: Наука, 1979. – 408 с.

*Меркулов В.П., Посысоев А.А.* Оценка пластовых свойств и оперативный анализ каротажных диаграмм. – Томск: ТПУ, 2004. – 176 с.

Миникеева Л.Р., Надеждин О.В., Латыпов И.Д., Ефимов Д.В. Алгоритмы расчета синтетических кривых в задачах оценивания механических свойств пород // 70 лет научных исследований и проектирования обустройства месторождений нефти и газа: Сб. тр. Межрег. науч.-техн. конфер.. – Уфа: БашНИПИнефть, 2018а. – С. 288–298.

Миникеева Л.Р., Надеждин О.В., Нугуманов Э.Р., Марков А.В., Ефимов Д.В. Разработка методик автоматизации многоскважинного анализа и интерпретации данных геофизических исследований скважин и изучения керна // Нефтяное хозяйство. – 2018b. – № 6. – С. 54–57.

## **References:**

*Lehmann E.* Proverka statisticheskikh gipotez [Testing statistical hypotheses]. M.: Nauka, 1979. 408 p. (in Russian).

*Merkulov V.P., Posysoev A.A.* Otsenka plastovykh svoistv i operativnyi analiz karotazhnykh diagramm [Reservoir properties assessment and logs operational analysis]. Tomsk: TPU, 2004. 176 p. (in Russian).

Minikeeva L.R., Nadezhdin O.V., Latypov I.D., Efimov D.V. Algoritmy rascheta sinteticheskikh krivykh v zadachakh otsenivaniya mekhanicheskikh svoistv porod [Algorithms of synthetic curves calculation in rocks mechanic properties assessment problems] // 70 let nauchnyh issledovanii i proektirovaniya obustrojstva mestorozhdenii nefti i gaza: Sbornik trudov Mezhregional'noi nauchno-tekhnicheskoi konferencii [70 years of oil and gas filed facilities research and development: Papers of Interregional Scientific and Technical Conference]. Ufa: BashNIPIneft, 2018a. P. 288–298 (in Russian).

*Minikeeva L.R., Nadezhdin O.V., Nugumanov E.R., Markov A.V., Efimov D.V.* Razrabotka metodik avtomatizatsii mnogoskvazhinnogo analiza i interpretatsii dannykh geofizicheskikh issledovanii skvazhin i izucheniya kerna [Development of multiwell analysis and data logging interpretation automatization and core study techniques] // Oil industry. 2018b. No. 6. P. 54–57 (in Russian).

Załyaev N.Z. Metodika avtomatizirovannoi interpretatsii geofizicheskikh issledovanii skvazhin [Method of well logging automatic interpretation]. M.: Universitetskoe, 1990. 144 p. (in Russian).

УДК 550.34

DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-12

# ВЫЯВЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ НЕФТЕГАЗОНАСЫЩЕНИЯ В НЕТРАДИЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРАХ С ПОМОЩЬЮ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ 2D 3C СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

# © 2018 г. И.А. Переплеткин, В.И. Кузнецов

**Реферат.** Разработка многоволновой трехкомпонентной сейсморазведки в сочетании с методикой 2D позволяет дополнить сейсмические изображения сведениями о коллекторских свойствах пород и типе их насыщения. Данная технология включает в себя построение попластовых карт распределения коэффициента Пуассона  $\gamma = Vp/Vs$ . Теоретически коэффициент Пуассона должен уменьшаться на участках нефтегазонасыщения. Результаты проведенных полевых экспериментов подтверждают указанную закономерность. На практике эта методика серьезно повышает эффективность геологоразведочных работ и реализует большой экономический потенциал.

Ключевые слова: 3С сейсморазведка, коэффициент Пуассона, нетрадиционные коллектора

# IDENTIFICATION OF THE UNCONVENTIONAL OIL-BEARING RESERVOIRS WITH THE POISSON'S RATIO USING 2D 3C SEISMIC TECHNOLOGY

# I.A. Perepletkin, V.I. Kuznetsov

**Abstract.** Three-component multiwave seismic technology in combination with the 2D survey allows supplementing seismic images with more detailed information about the reservoir properties and the type of its saturation. This technology includes the construction of layer-by-layer velocity ratio (Vp/Vs) maps demonstrating the Poisson coefficient distribution. Theoretically, the Poisson's ratio should decrease in zones with high hydrocarbon saturation. The results of field experiments confirm this regularity. In practice, this methodology highly increases the efficiency of geophysical exploration and realizes a great economic potential.

Keywords: three-component seismic, Poisson's ratio, unconventional reservoirs

#### Введение

В данной статье рассматривается применение технологии 3C 2D сейсморазведки для трудноизвлекаемых запасов нетрадиционных коллекторов Западной Сибири на примере Ван-Еганского нефтегазоконденсатного месторождения (Среднее Приобье). По физико-химическим свойствам и составу — это тяжелые нафтеновые нефти, освоение которых сопряжено с комплексом проблем. Вопервых, их высокая вязкость в пластовых условиях, которая в сотни раз превышает вязкость пластовых вод, затрудняет процесс вытеснения нефти водой. Во-вторых, все сеноманские нефтяные залежи содержат массивные газовые шапки [Нестеров, 2015]. Наибольший интерес для поисков залежей нефти и газа имеет изучение связей коэффициента Пуассона с нефтегазоносностью исследуемых интервалов разреза. Теоретически он должен уменьшаться на участках нефтегазонасыщения, по сравнению с водонасыщенными участками [Пузырев, 1997]. Результаты полевых экспериментов, полу-

Для цитирования: Переплеткин И.А., Кузнецов В.И. Выявление областей нефтегазонасыщения в нетрадиционных коллекторах с помощью коэффициента Пуассона при проведении 2D 3C сейсморазведки // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 149–158. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-12.

**For citation:** Perepletkin I.A., Kuznetsov V.I. Identification of the unconventional oil-bearing reservoirs with the Poisson's ratio using 2D 3C seismic technology // Geologicheskii vestnik. 2019. No. 1. P. 149–158. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-12.

ченные в ходе исследования, подтверждают указанную закономерность.

# Методы исследования

Источник сейсмических колебаний помещается в необсаженные скважины во избежание дополнительных волн-помех, которые могут быть вызваны стальными обсадными колоннами. Ниже представлена радиальная система наблюдений для исследования околоскважинного пространства. На рис. 1 показан общий вид расположения линий приема с трехкомпонентными приемниками отраженных обменных (PS) и монотипных (PP) волн относительно источника.

Внутрискважинный источник возбуждает упругие колебания на глубине ниже зоны малых

**DPO** 

скоростей (глубина в пределах 25—30 м). Данный факт обусловлен тем, что запись сейсмограмм обменных волн имеет гораздо худшее качество по сравнению с РР-волнами, а при дополнительном влиянии зоны малых скоростей запись поперечных волн крайне проблематична.

Ниже представлены результаты полевых работ — трехкомпонентные сейсмограммы по результатам 3С ВСП (рис. 2), и данные моделирования волновых полей (рис. 3).

В данной технологии используются аналоговые трехкомпонентые приемники, располагающиеся на малом расстоянии друг от друга на профилях приема. Механизм действия прибора прост — принимаются сигналы по трем осям распространения упругих волн, записываются колебания среды в разных направлениях. С помощью преобразователя

**ПP05** 

ПР06

**ПР04** 



ПР03 †

Рис. 1. Схема наблюдений для исследования околоскважинного пространства

*Условные обозначения:* 1 — пункты наблюдений, 2 — проекция пластопересечения на дневную поверхность. В центре — источник колебаний, также имеют место 6 2D профилей с трехкомпонентными приемниками, расположенных симметрично по отношению к источнику.

## Fig. 1. Radial scheme of the arrangement of the reception lines with three-component receivers

*Legend*: 1 -observation points, 2 -the projection of the intersection of layers on the surface. The source of seismic vibrations is in the central part of the circuit. There are also six 2D seismic profiles with three-component receivers located symmetrically in relation to the source.



# И.А. ПЕРЕПЛЕТКИН, В.И. КУЗНЕЦОВ



Fig. 3. Synthetic seismograms a) along the vertical component (Z), b) along the horizontal component (X)

идет перевод сейсмограмм в электрический сигнал, являющийся функцией колебания упругой среды, по сейсмическим трассам. При дальнейшей интерпретации данных, полученных по трехкомпонентным приемникам, сейсмические трассы переводятся во временные разрезы по профилям 2D-3C согласно выбранной радиальной схемы расположения источника и приемников упругих волн. Во-первых, данная схема является экономически оправданной, так как используется лишь один источник колебаний. Во-вторых, применительно к интерпретации данных эта схема также является достаточно удобной, поскольку цель данного исследования — построение попластовых карт распределения коэффициента Пуассона. Мы получаем данные, расположенные на равных расстояниях во все стороны от пробуренной скважины, в которой находится источник. «Межлепестковые» области также подвергаются тщательной интерполяции, упрощающейся ввиду высокой плотности полученных данных по каждому из приемников [Hardage et al., 2011].

На сейсмограммах четко прослеживается зависимость скорости распространения разных типов упругих волн от соотношения сигнал/помеха. Применительно к распространению поперечных волн стоит отметить, что их распространение в анизотропной среде происходит по двум горизонтальным взаимно ортогональным компонентам. Волны SV, соответствующие Х-компоненте, распространяются вдоль направления трещиноватости толщ горных пород, в то время как волны SH — поперек. Сейсмограммы по Ү-компоненте отличаются наименьшим качеством записи, в особенности в наиболее глубинных зонах, поскольку запись практически полностью перекрывается псевдорэлеевскими волнами-помехами. Вообще информация по Ү-компоненте несет априорную информацию только на небольших глубинах, дополняя данные в местах сложного строения и наличия разрывных нарушений пород.

На синтетических сейсмограммах, полученных по результатам моделирования полного волнового поля, стрелками обозначены места наиболее интенсивных отражений прямой волны. Горизонт «Б» соответствует кровле верхней юры (баженовская свита), «С», «Г» — кровле и подошве сеноманского яруса, «М» — аптского яруса. Исходя из данных моделирования волнового поля по результатам 3С регистрации Z-компоненты, можно проследить время отражения монотипных PP-волн от устойчивых горизонтов. Запись четкая, отношение сигнал/помеха достаточно велико. На рис. 36 видно, что имеют место устойчивые отражения поперечной волны SV-типа, прослеживающиеся менее четко ввиду значительного рассеивания и поглощения поперечных волн на больших глубинах, однако их все равно можно проследить достаточно уверенно. Следовательно, имеются все основания для перехода к дальнейшей интерпретации данных и построению временных разрезов по разным компонентам.

Ниже представлены временные разрезы, полученные по данным 2D—3C-профилирования, после введения необходимых кинематических поправок, построенных на Z- (рис. 4) и X-компонентах (рис. 5). Вертикальный масштаб на разрезе по обменным P-SV-волнам (компонента X) сужен примерно в 1.8 раз для удобства определения соотношения осей синфазности, а также применительно к следующему этапу интерпретации данных — построению разреза комплексного параметра Vp/Vs. Данное упрощение проведено ввиду различной скорости распространения упругих волн разного типа и, следовательно, времени прихода волн разного типа.

По данным временного разреза по Z-компоненте можно проследить три ярко выраженные отражающие границы, соответствующие кровле сеноманского (время прихода — около 900 мс), аптского (время прихода — около 1500 мс) ярусов и, наконец, кровле верхней юры (баженовская свита) — время прихода около 2000 мс.

На разрезе Х-компоненты прослеживаются с меньшим качеством записи два горизонта (сеноманский и кровля баженовской свиты), в то время как аптский ярус прослеживается слабо в интервале времен 2800—3000 мс. Исходя из среднего соотношения времени прихода отраженных волн разного типа, по данным моделирования, представленным выше, данные временные разрезы сопоставляются друг с другом с минимальной погрешностью.

# Результаты исследования

Окончательный этап интерпретации данных — построение разреза распределения значений комплексного параметра  $\gamma = Vp/Vs$  (рис. 6).

На разрезе видно, что в исследуемой части Ван-Еганского НГКМ лишь в горизонте  $J_3$ , по данным трехкомпонентной регистрации, прослеживаются перспективные участки нефтенасыщения. В вышележащих толщах соотношение скоростей достаточно велико ( $\gamma > 1,8$ ), что позволяет сделать



Рис. 4. Временной разрез по профилю 2D 3C по Z-компоненте Fig. 4. Time profile along the 2D 3C profile along Z-component



Рис. 5. Временной разрез по профилю 2D 3C по X-компонентеFig. 5. Time profile along the 2D 3C profile along X-component



Рис. 6. Разрез распределения значений комплексного параметра  $\gamma = Vp/Vs$ .  $\gamma = (1.42-3.33)$  соответствует значениям коэффициента Пуассона  $\sigma = (0.01-0.45)$ . Выделенные участки соответствуют зонам нефтенасыщения

Fig. 6. The layer map of distribution of values of the complex parameter  $\gamma = Vp/Vs$ .  $\gamma = (1.2-3.3)$  corresponds to values of Poisson's ratio  $\sigma = (0.01-0.45)$ . Marked areas at this profile correspond to the oil-bearing zones

вывод, что продуктивных горизонтов там не отмечается. По результатам обработки данных стандартных методов (2D ОГТ, 3D ОГТ) ранее отмечались перспективные участки на нефть и газ именно в вышележащих толщах, однако данные бурения говорили об обратном. Внедрение методики 3Ссейсморазведки, позволяющей определить соотношение скоростей по конкретному 2D-профилю, позволило решить эту проблему. Для большей достоверности данных по результатам трехкомпонентной регистрации был построен глубинный 2D-разрез распределения коэффициента Пуассона (рис. 7). Выделенный участок соответствует положению водонефтяного контакта, наличие которого подтверждено последующим бурением.

## Выводы

Предлагаемая нами инновационная технология 2D–3C сейсморазведки позволила оптимизировать разработку трудноизвлекаемых запасов, сосредоточенных в нетрадиционных коллекторах Западной Сибири, суммарные геологические запасы нефти которой оцениваются в размере от 0.8 до 2.1 трлн т, а потенциал прироста извлекаемых запасов нефти оценивается в размере не менее 30–40 млрд т.

Предположение о наличии зон нефтенасыщения, выдвинутое по результатам проведения сейсморазведочных работ 2D–3C, было подтверждено. Таким образом, детальный анализ результа-



Рис. 7. Разрез распределения коэффициента Пуассона по результатам трехкомпонентной регистрации. Выделенная область — выявленный ВНК по данным 3С-регистрации, подтвержденный по данным последующего бурения

Fig. 7. Profile of distribution of the Poisson's ratio according to the results of 3C registration. Marked area at this profile corresponds to the oil-water contact, which location has been proved by the further drilling

тов проведения 2D–3С сейсморазведочных работ (конечная цель — определение коэффициента Пуассона) позволил свести к минимуму погрешность выделения зоны нефтенасыщения применительно к нетрадиционным коллекторам Западной Сибири, по сравнению с традиционными методами сейсмических исследований.

Нами было экспериментально подтверждено, что по значению коэффициента Пуассона можно действительно судить о нафтегазонасыщенности залежей.

Стоит также отметить, что данная стратегия возможна только лишь при интегрировании геофизики, геологии и бурения в рамках единой технологии добычи полезных ископаемых, включающей создание пространственной геологической модели месторождения и подсчета запасов.

#### Список литературы:

*Нестеров И.И.* Перечень инновационных, в том числе, прорывных технологий, не имеющих аналогов за рубежом. – Тюмень: НОЦ ТИУ, 2015. – 73 с.

*Пузырев Н.Н.* Поперечные и обменные волны в сейсморазведке: Сб. науч. тр. – М.: Недра, 1997. – 124 с.

Hardage B.A., DeAngelo M.V., Murray P. E., Sava D. Multicomponent seismic technology. – Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, Geophys. References Ser. No. 18. 2011. 318 p.

#### **References:**

*Hardage B.A., DeAngelo M.V., Murray P. E., Sava D.* Multicomponent seismic technology. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, Geophys. References Ser. No. 18. 2011. 318 p.

*Nesterov I.I.* Perechen' innovatsionnykh, v tom chisle, proryvnykh tekhnologiy, ne imeyushchikh analogov za rubezhom [The list of innovative, including breakthrough technologies that have no analogues abroad]. Tyumen: NOTS TIU, 2015. 73 p. (in Russian).

*Puzyrev N.N.* Poperechnyye i obmennyye volny v seysmorazvedke: Sbornik nauchnykh trudov [Transverse and exchange waves in seismic exploration: Collection of scientific papers]. Moscow: Nedra, 1997. 124 p. (in Russian).

## Сведения об авторах:

**Переплеткин Иван Алексеевич**, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень. E-mail: ivan\_perepletkin@mail.ru

**Кузнецов Владислав Иванович**, доктор геол.-мин. наук, ООО «НОВАТЭК НТЦ», г. Тюмень. E-mail: vikuznetsov@novatek.ru

#### About the authors:

**Perepletkin Ivan Alekseevich**, FSBEI HE "Industrial University of Tyumen", Tyumen. E-mail: ivan\_perepletkin@mail.ru

**Kuznetsov Vladislav Ivanovich**, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, NOVATEK Scientific-Research Center, Tyumen. E-mail: vikuznetsov@novatek.ru

УДК 556.34

DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-13

# ПРОБЛЕМА УДАЛЕНИЯ ЖИДКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОКОВ В ГЛУБОКИЕ ВОДОНОСНЫЕ ГОРИЗОНТЫ

© 2018 г. Р. Ф. Абдрахманов

Реферат. В статье анализируется опыт утилизации жидких промышленных отходов в глубокие водоносные горизонты в геолого-гидрогеологических условиях Башкортостана. Удаление промышленных сточных вод производится, как правило, в глубокие горизонты зоны полного водонасыщения седиментационных бассейнов, которая в естественных условиях характеризуется весьма затрудненным гидрогеодинамическим режимом. Ведущим гидрогеодинамическим процессом является вертикальная миграция вод, затухающая с глубиной, но охватывающая (в различной степени) все гидрогеологические комплексы: от земной поверхности до зоны весьма затрудненного водообмена включительно. Среди карбонатных карстогенных коллекторов наибольший интерес как возможный объект удаления жидких промышленных стоков представляет верхнедевонско-турнейский комплекс. Особую опасность в геоэкологическом отношении представляют полигоны («Кама-1», «Кама-2») утилизации стоков, создаваемые с помощью подземных ядерных взрывов в скважинах. В известных случаях при удалении в недра больших объемов жидкости под высоким давлением возможны гидроразрыв пластов и даже техногенные землетрясения. Опыт нагнетания больших объемов стоков (10000 м<sup>3</sup>/сут) и длительное время закачек (до 20 лет) в районах нефтяных месторождений Башкирского Предуралья свидетельствует о том, что в литологически выдержанных и проницаемых пластах гидрогеодинамическое влияние распространяется на расстояние до 20 км. Решение проблемы охраны гидросферы от загрязнения заключается в сокращении объема жидких отходов и уменьшении содержания в них загрязняющих веществ, внедрении более эффективных методов очистки и пр., то есть в совершенствовании самих технологических процессов.

Ключевые слова: жидкие промышленные стоки, утилизация, подземное захоронение отходов, глубокие горизонты, седиментационные бассейны, подземные ядерные взрывы

# THE PROBLEM OF REMOVAL OF LIQUID INDUSTRIAL EFFLUENTS IN DEEP AQUIFERS

# R. F. Abdrakhmanov

Abstract. The article analyzes the experience of utilization of liquid industrial wastes into deep aquifers in geological and hydrogeological conditions of Bashkortostan. Industrial effluents are usually removed to the deep horizons of the zone of full water saturation of sedimentation basins, which in natural conditions is characterized by very difficult hydrogeodynamic regime. The leading hydrogeodynamic process is the vertical migration of water, damped with depth, but covering (to varying degrees) all hydrogeological complexes: from the earth's surface to the zone of very difficult water exchange inclusive. Among the carbonate karstogenic reservoirs, the Upper Devonian-Tournaisian complex is of the greatest interest as a possible object for the removal of liquid industrial effluents. A particular geoecological danger represent wastewater disposal polygons («Kama-1» and «Kama-2») generated by underground nuclear explosions in boreholes. In certain cases, when large volumes of liquid are removed into the Earth's interior under high pressure, hydraulic fracturing and even man-made earthquakes are possible. The experience of injection of large volume of effluents (10000 m3/day) and long time of injection (up to 20 years) in the areas of oil fields of the Bashkir Cis-Ural region suggests that in lithologically aged and permeable layers hydrogeodynamic effect extends to a distance of 20 km. The solution to the problem of protecting the hydrosphere from pollution consists in reducing the volume of liquid waste and reducing the content of pollutants in them, the introduction of more effective methods of cleaning, etc., that is, to improve the technological processes themselves.

**Keywords:** liquid industrial effluents, underground waste disposal, deep aquifers, sedimentary basins, underground nuclear explosions

Для цитирования: Абдрахманов Р.Ф. Проблема удаления жидких промышленных стоков в глубокие водоносные горизонты // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 159–165. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-13.

**For citation:** Abdrakhmanov R.F. The problem of removal of liquid industrial effluents in deep aquifers // Geologicheskii vestnik. 2019. No. 1. P. 159–165. DOI: http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-13.

## Введение

Удаление промышленных сточных вод в недра вызвано ростом промышленного производства, объем которого в экономически развитых странах резко вырос во второй половине прошедшего столетия. Именно в этот период в Башкортостане, благодаря богатым природным ресурсам, были введены в действие крупные нефтегазодобывающие, нефтеперерабатывающие, нефтехимические и химические комплексы. Не случайно, что большинство этих водоемких, не совершенных в технологическом отношении производств тяготеет к долине основной водной артерии Республики р. Белой. Отсутствие в производственных циклах указанных комплексов систем безотходных технологий или глубокой очистки стоков обусловило сброс в р. Белую больших количеств жидких промышленных отходов и, как следствие, сильное загрязнение речной воды и периодическое ухудшение качества воды ряда крупных хозяйственнопитьевых водозаборов грунтово-инфильтрационного типа, снабжающих водой более половины населения Республики.

Принятые меры по снижению водопотребления в промышленности и очистке сточных вод привели к некоторому улучшению экологической обстановки в бассейне р. Белой, однако и до настоящего времени она остается неудовлетворительной. Поэтому на так называемый метод подземного захоронения промышленных сточных вод, позволяющий сократить их сброс в поверхностные водотоки и водоемы, возлагаются большие геоэкологические надежды.

Обоснованию этого метода, особенностям его использования в различных геолого-гидрогеологических условиях посвящены многочисленные публикации гидрогеологов, гидрогеохимиков и других специалистов, занимающихся вопросами охраны и использования геологической среды [Гидрогеологические..., 1972, 1976, 1993; Гаев и др., 1986; Brown et al., 1997; Mavropoulos et al., 2004]. Впервые он был использован в США для удаления нефтепромысловых рассолов. К середине 90-х годов в странах СНГ эксплуатировалось около 20 полигонов захоронения промышленных стоков, в том числе радиоактивных. Однако, несмотря на довольно длительную историю проведения работ в этой области, еще целый ряд вопросов, касающихся особенностей формирования глубоких частей подземной гидросферы, их гидрогеодинамического и гидрогеохимического режима, выяснен

недостаточно. Считается, что при решении вопроса о возможности захоронения жидких отходов в земных недрах необходимо соблюдение следующих основных требований: 1) геолого-гидрогеологические условия района захоронения должны обеспечивать надежную и контролируемую изолированность стоков в поглощающих коллекторах; 2) последние не должны заключать вод, которые представляют интерес для хозяйственно-питьевых, лечебных или промышленных (как гидроминеральное сырье) целей [Гидрогеологические..., 1993]. Высокие концентрации брома, иногда и иода, в этих рассолах позволяют отнести их к категории иодо-бромных лечебных и промышленных вод. Пример отрицательного влияния закачки сточных вод прослеживается на примере Стерлитамакского месторождения минеральных вод (санаторий «Белая береза»). Эксплуатация скважины 1/85, пробуренной с целью получения бромных рассолов на глубине 2000-2200 м, была прекращена из-за появления в зоне развития этих рассолов очагов загрязнения отходами, предположительно полигонов утилизации стоков, созданных ядерными взрывами «Кама-1» и «Кама-2» [Абдрахманов, Попов, 1999].

Подчеркивается, что нагнетание сточных вод в глубокие горизонты является мерой вынужденной и временной, что этот способ предназначен для утилизации сравнительно небольших объемов<sup>1</sup> (до 100 м<sup>3</sup>/сут) особо вредных стоков, не поддающихся обезвреживанию другими способами.

Опыт нагнетания больших объемов стоков (в случае «Кама-2» — стоки Стерлитамакского СЦК, они относятся к очень большим — более 10000 м<sup>3</sup>/сут) и длительное время закачек (до 20 лет) в районах нефтяных месторождений Башкирского Предуралья свидетельствуют о том, что в литологически выдержанных и проницаемых пластах гидрогеодинамическое влияние распространяется на расстояние до 20 км. На Туймазинском нефтяном и других месторождениях установлены восходящие перетоки при закачке стоков из одного пласта терригенного девона в другой через толщу аргиллитов (мощностью 10–15 м) до 130 л/с в пределах нефтяного месторождения [Максимов, 1959].

При этом вредные вещества, содержащиеся в промышленных стоках, после их закачки в недра должны быть нейтрализованы (переведены

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Классификация объемов стоков, удаляемых в глубокие подземные горизонты, следующая (м<sup>3</sup>/сут): малые — до 100, средние — от 100 до 1000, большие — от 1000 до 10000, очень большие — более 10000.

в нерастворимое состояние — осадок или сорбированы) в результате взаимодействия с горными породами и пластовыми водами.

Удаление промышленных сточных вод производится, как правило, в глубокие горизонты зоны полного водонасыщения седиментационных бассейнов, которая в естественных условиях характеризуется весьма затрудненным гидрогеодинамическим режимом [Попов, 1985; Абдрахманов и др., 2002]. Все пустоты (поры, трещины и каверны) в горных породах этой зоны, за редким исключением (локальные нефтегазовые месторождения), заполнены водой. Поэтому в условиях отсутствия в породах «свободного» пространства поглощение ими избыточного количества жидкости может обеспечиваться благодаря: 1) упругим свойствам воды, насыщающей коллектор, и в меньшей степени — упругим свойствам пород самого коллектора и 2) оттеснения закачиваемыми стоками пластовой воды от околоствольного пространства нагнетательных скважин, возбуждения или интенсификации латеральных и вертикальных потоков к естественным областям или искусственным очагам разгрузки. Очевидно, что длительное воздействие на пласт значительных количеств нагнетаемых стоков неизбежно должно привести к снижению его приемистости, смене режима свободного налива нагнетанием под избыточным давлением, росту пластовых давлений (напоров), напорных градиентов и скоростей движения флюидов, интенсификации вертикальных (преимущественно восходящих) перетоков между гидрогеологическими комплексами, залегающими в различных частях осадочного разреза, изменению скоростей и направленности гидрогеохимических процессов в системе вода – порода – газ – ОВ. В известных случаях при удалении в недра больших объемов жидкости под высоким давлением возможны гидроразрыв пластов и даже техногенные землетрясения (нефтедобывающие районы Татарстана).

Необходимо подчеркнуть, что удаление жидких отходов в недра представляет собой весьма сложную, слабоизученную проблему вследствие неполноты наших знаний о процессах, происходящих в глубоких частях чехла осадочных бассейнов. Учитывая это, исследования для обоснования подземного захоронения промышленных стоков помимо анализа общей геолого-гидрогеологической информации должны включать: определение в естественных и лабораторных условиях емкостных и геофильтрационных параметров коллекторов и водоупоров; расчет забойного и пластового давления и их изменения во времени; изучение характера движения и разгрузки пластовых вод и условий взаимосвязи водоносных горизонтов; проведение опытно-миграционных работ для создания прогнозных моделей распространения отходов в недрах при заданных объемах отходов и режиме их захоронения; анализ условий взаимодействия удаляемых отходов с пластовыми водами и вмещающими породами с использованием физико-химического, графо-аналитического, термодинамического и математического моделирования. При этом особое внимание необходимо уделять наличию в районе предполагаемого полигона захоронения глубоких скважин, нарушающих сплошность водоупоров осадочного чехла, и их техническому состоянию. В процессе эксплуатации полигона захоронения требуется: проведение гидрогеоэкологического мониторинга, включающего наблюдения не только за количеством и составом удаляемых стоков, но и за их распространением в горизонте, составом вод поглощающего и вышележащих буферных горизонтов, их гидрогеодинамическими показателями, качественным состоянием пресных подземных вод и пр.

# Объекты, материалы и результаты исследований

В Башкирском Предуралье при изысканиях и эксплуатации полигонов удаления промышленных стоков в поглощающие горизонты выполнен явно недостаточный объем названных исследований. Поглощающие горизонты здесь приурочены к карбонатным и терригенным комплексам девона и карбона, залегающим в нижнем гидрогеологическом этаже Волго-Камского бассейна. Среди карбонатных карстогенных коллекторов наибольший интерес как возможный объект удаления жидких промышленных стоков представляет верхнедевонско-турнейский комплекс. Кровля его залегает на глубине 1000-1700 м, мощность в среднем 400-500 м. Пьезометрические уровни устанавливаются на отметках 5-35 м. Фильтрационные свойства слагающих комплекс карбонатных пород сильно изменчивы: пористость их от 1-3 до 22%, проницаемость 10-20, иногда до 300 мД и более. Поглощающая способность отдельных скважин (Шакшинская, Туймазинская площади) в сильно закарстованных зонах в начальный период испытаний достигает 1400-2000 м<sup>3</sup>/сут. Обычно же водопритоки в скважины не превышают 30-40 м<sup>3</sup>/сут. Минерализация вод изменяется от 160 до 300 г/л,

состав их азотно-метановый хлоридный натриевокальциевый.

Основные выводы по динамике глубокозалегающих подземных вод Башкирской части Волго-Камского артезианского бассейна сводятся к следующему [Попов, 1985; Абдрахманов, Попов, 1999]. Гидрогеодинамическая структура нижнекаменноугольных и девонских комплексов нижнего этажа бассейна, имеющего слоисто-блоковый характер анизотропности геофильтрационной среды, определяется совокупностью местных (внутриструктурных) областей питания и дренажа. Первыми из них являются положительные морфотектонические элементы (сводовые поднятия, возвышенности, водоразделы), а вторыми — отрицательные (депрессии, низменности, долины рек). Судя по конфигурации пьезометрических поверхностей вод нижнего карбона и среднего – верхнего девона (глубина 1200-2000 м), области питания их находятся на Буйско-Таныпском и Икско-Демском междуречьях, соответствующих склонам Пермско-Башкирского и Татарского сводов, а областью разгрузки служит долина р. Белой в ее нижнем течении, тектонически отвечающая Бирской депрессии и примыкающему моноклинальному склону платформы.

Ведущим гидрогеодинамическим процессом является вертикальная миграция вод, затухающая с глубиной, но охватывающая (в различной степени) все гидрогеологические комплексы: от земной поверхности до зоны весьма затрудненного водообмена включительно. Латеральный массоперенос в глубоких горизонтах не носит регионального характера, осуществляется локально по наиболее выдержанным и проницаемым пластам, имеющим связь с местными областями питания и дренажа путем вертикальных перетоков. Показателями последних служат газогидрогеохимические (в том числе гелиевые) и гидрогеотермические аномалии, гидрогенное минералообразование, этажное расположение залежей и проявлений углеводородов, их физико-химические свойства и пр.

В свете этих данных следует считать, что утвердившиеся взгляды на глинистые пласты карбона и девона, а также карбонатно-галогенную толщу кунгура мощностью до 100—350 м как на абсолютные региональные флюидоупоры не отвечают действительности: через них при соответствующих литолого-фациальных и геотектонических условиях, высоких вертикальных градиентах напора (до 0.3 и более) возможна как восходящая, так и нисходящая миграция флюидов. Известное гидрогеодинамическое значение в глубоких горизонтах приобрел техногенный фактор (разработка нефтегазовых месторождений, утилизация жидких отходов и пр.).

В Башкортостане, как и в других регионах Волго-Уральской области, подземное захоронение стоков начало применяться с середины 50-х годов прошлого века как сброс попутно добываемых с нефтью промысловых рассолов в продуктивные горизонты палеозоя (Туймазинское, Шкаповское, Сергеевское, Арланское, Краснохолмское и другие месторождения).

Использование промысловых рассолов для законтурного и внутриконтурного заводнения нефтяных залежей следует считать вполне приемлемым, тем более что этот способ давно применялся в практике разработки нефтяных месторождений. К сожалению, в силу целого ряда причин, связанных с техническим состоянием фонда различных скважин, трубопроводных систем и др., на многих нефтяных месторождениях произошло загрязнение неглубокозалегающих пресных подземных вод.

Позднее, в конце 60-х – начале 70-х гг., в глубокие горизонты стали удаляться также и стоки некоторых химических, нефтехимических и других предприятий. Менее двух лет продолжалась закачка промышленных стоков Уфимского НПЗ на глубину 1355–1720 м в карбонатные отложения верхнего девона – нижнего карбона. В связи с ростом рабочего давления и снижением приемистости скважины ее эксплуатация была прекращена. С начала 70-х годов проводилась закачка дистиллерной жидкости Стерлитамакского ОАО «Сода» (хлоркальциевый рассол с М 130 г/л) в продуктивные терригенные породы девона и намюрские карбонаты на Шкаповском месторождении Татарского свода. Объем стоков 30-50 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Вскоре после начала нагнетания в районе КНС-6 из верхнепермских отложений появились сильно соленые источники хлоркальциевого типа, свидетельствующие о проникновении промышленных стоков в приповерхностную зону по затрубному пространству нагнетательных скважин. В середине 70-х годов проводилась закачка стоков установки по производству мазута Кармановской ГРЭС в терригенные отложения нижнего карбона (1200-1300 м) на Краснохолмском месторождении, расположенном в зоне сочленения Пермско-Башкирского свода и Верхнекамской впадины.

Во всех этих случаях какие-либо специальные исследования на месторождениях не проводились, поэтому трудно сказать, как далеко в поглощающих

коллекторах продвинулся фронт загрязненных вод. В подобных условиях трудно предугадать все последствия подобных мероприятий и идентифицировать загрязнение подземных вод. При столь больших объемах стоков и длительном периоде работы нагнетательных скважин загрязняющие вещества могут быть обнаружены спустя неопределенно продолжительное время на большом расстоянии от скважин в областях разгрузки естественного или искусственного происхождения.

Особую опасность в геоэкологическом отношении представляют полигоны утилизации стоков, создаваемые с помощью подземных ядерных взрывов в скважинах. Они вызывают образование и раскрытие трещин в горных породах, которые могут явиться каналами миграции загрязняющих веществ как по латерали, так и в вышележащие горизонты и в конечном итоге в приповерхностную зону. В подобных условиях действительные скорости продвижения фронта загрязненных вод будут сильно отличаться от расчетных.

В Башкирском Предуралье в бассейнах рек Уршак – Белая к середине 90-х годов было проведено семь подземных ядерных взрывов: два для захоронения стоков завода «Салаватнефтеоргсинтез» («Кама-1») и Стерлитамакского СЦК («Кама-2»), пять для увеличения нефтеотдачи пластов. В 1965 г. в СССР были проведены два первых (в мирных целях) камуфлетных<sup>1</sup> взрыва — для интенсификации притока нефти на Грачевском нефтяном месторождении Башкортостана (близ Мелеуза) [Емельянов, 1997]. Объектом для закачки промышленных стоков выбран визейско-башкирский карбонатный комплекс, залегающий на глубине более 2 км и экранированный глинистыми породами. В ноябре 1974 г. во время бурения прокольной скважины на полигоне «Кама-1» произошел аварийный выброс пароводяной смеси, вызвавший радиоактивное загрязнение местности [Абдрахманов, 1993]. Замеры радиационного фона в 1991 г. в районе скважины показали несколько тысяч мкр/ч, в закрытой зоне — 180-250 мкр/ч, в районе насосной станции — 55 мкр/ч. В настоящее время максимальная мощность радиационного фона достигает 250 мкр/ч.

Все вышеизложенное приводит к следующим выводам. Удаление промышленных стоков в глубо-козалегающие закарстованные породы не должно

рассматриваться обособленно в отрыве от общей проблемы техногенного воздействия на подземную гидросферу. В условиях постоянно растущей обводненности нефтяной продукции в Башкортостане (на ряде месторождений она достигает 98%) извлекаемые вместе с нефтью рассолы необходимо с соблюдением всех природоохранных мероприятий возвращать в нефтеносные горизонты для поддержания в них пластового давления и повышения нефтеотдачи.

При этом особое внимание должно быть уделено техническому состоянию глубоких скважин (нагнетательных, разведочных, эксплуатационных и др.), которые могут явиться путями проникновения рассолов в горизонты пресных вод. Ситуация сильно осложняется тем, что через 10–20 лет после начала эксплуатации вследствие коррозии обсадных колонн и разрушения цементного камня практически все скважины приходят в аварийное состояние и не подлежат восстановлению.

Анализ гидрогеологических материалов по артезианским бассейнам, в том числе и по Волго-Камскому, свидетельствует о том, что областями дренажа глубоких водоносных горизонтов являются крупные речные долины, заложенные, как правило, вдоль линий тектонических нарушений. Поэтому нетрудно предугадать эффект в случае, если глубинные рассолы вместе с нагнетаемыми жидкими отходами промышленных предприятий и радиоактивного распада (или те и другие) устремятся вверх под долиной р. Белой, где расположены практически все крупные хозяйственно-питьевые водозаборы [Абдрахманов, 2005].

Разрушение тампонажного материала в заполненном пространстве, как выявлено многими исследователями, происходит при переходе жидкого цементного раствора в пластическое состояние и цементный камень. Существующее в реальной скважине пластовое давление флюидов способствует разрушению цементного камня. Это происходит также на стадии формирования камня. Разрушительное действие пластовых вод происходит в том случае, если в их составе имеются в достаточном количестве сульфат-ионы, углекислота, сероводород, хлориды, соли магния и другие. Коррозия цементного камня в электролите представляет собой химический процесс в виде обменных реакций, в результате которых происходит растворение минералов цементного клинкера, что и приводит к постепенному разрушению прогидратированной части цемента и снижению прочной связки гидратов (рис.).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Камуфлетным называется взрыв, произведенный столь глубоко под землей, что полость взрыва не сообщается с земной поверхностью. В случае ядерного камуфлетного взрыва это означает, что происходит полное захоронение радиоактивных продуктов взрыва под землей [Емельянов, 1997].



Рис. Характер разрушения цементного камня в затрубном пространстве скважин [Акманов, 1992]

обсадная труба, 2 — цементный камень, 3 — коррозия стенок обсадных труб, 4 — борозды разрушения.

# Fig. The nature of the destruction of cement stone in the annulus of wells [Akmanov, 1992]

 $1-\mbox{casing},\,2-\mbox{cement stone},\,3-\mbox{corrosion}$  of casing walls,  $4-\mbox{furrows}$  of destruction.

Широкое использование земных недр (в том числе карстогенных коллекторов) для захоронения в них сточных вод химических, нефтехимических и других производств с гидрогеодинамических, гидрогеохимических и геоэкологических позиций недопустимо. Так называемый метод «подземного захоронения» может быть использован в исключительных случаях при соблюдении всех ранее указанных условий: малые объемы трудноочищаемых стоков, обязательное проведение специальных геологоразведочных работ, проведение контроля за распространением стоков в пласте и др. Упрощенный подход к созданию и эксплуатации полигонов для удаления промышленных стоков в глубокие горизонты, практиковавшийся до последнего времени в Башкирии, чреват самыми серьезными геоэкологическими последствиями.

# Заключение

Ряд крупных ученых выступает категорически против осуществления подземных закачек сточных промышленных вод, считая, что кардинальное решение проблемы охраны гидросферы от загряз-

нения заключается в сокращении объема жидких отходов и уменьшении содержания в них загрязняющих веществ, внедрении более эффективных методов очистки и пр., то есть в совершенствовании самих технологических процессов. Достаточно привести мнение одного из них - профессора А.Е. Ходькова [Ходьков, Валуконис, 1968], известного своими работами в области гидрогеохимии и глубинной гидродинамики. Он пишет: «...Совсем недавно считалось, что где-то там, на глубине можно запрятать что угодно и в любом количестве. Поэтому рядом организаций велись работы по подготовке сброса промстоков в глубокие подземные горизонты, расположенные в зоне замедленного водообмена. Исходя из того, что общей тенденцией глубинной гидродинамики является разгрузка подземных вод вверх, в конце концов, на поверхность, следует, что генеральная линия на закачку огромных масс каких-либо вод в недра принципиально неверна. Вследствие геологических процессов и в силу меньшей плотности и флюидности вод последние все равно будут стремиться со временем подняться на поверхность. Конечно, можно в каждом отдельном случае находить некоторые структуры и горизонты, способные удерживать закачиваемые воды. Но все равно существует опасность миграции вверх. Поэтому мы принципиально против осуществления сброса промстоков в глубокие горизонты ... надо придерживаться принципа: не делай по отношению к земле того, последствия чего ты не в состоянии еще предугадать» (с. 198). Это мнение представляется нам вполне обоснованным.

Работа выполнена по теме 0246-2019-0086.

#### Список литературы:

Абдрахманов Р.Ф. Техногенез в подземной гидросфере Предуралья / УНЦ РАН. – Уфа, 1993. – 208 с.

Абдрахманов Р.Ф. Гидрогеоэкология Башкортостана. – Уфа: Информреклама, 2005. – 344 с.

Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г. Минеральные лечебные воды Башкортостана. – Уфа: Гилем, 1999. – 208 с.

Абдрахманов Р.Ф., Мартин В.И., Попов В.Г., Рождественский А.П., Смирнов А.И., Травкин А.И. Карст Башкортостана. – Уфа: Информреклама, 2002. – 383 с.

*Акманов Р.Х.* Причины загрязнения пресных подземных вод районов нефтедобычи Башкирии / БНЦ УрО РАН. – Уфа, 1992. – 122 с.

*Гаев А.Я., Щугорев В.Д., Бутолин А.П.* Подземные резервуары. – Л.: Недра, 1986. – 223 с.

Гидрогеологические и гидрогеохимические исследования при решении проблемы сброса промстоков в глубокозалегающие карбонатные породы (на примере Куйбышевского Поволжья и Башкирии) / Под ред. К.Е. Питьевой. – М.: Изд-во МГУ, 1972. – 350 с.

Гидрогеологические исследования для захоронения промышленных сточных вод в глубокие водоносные горизонты / Под ред. К.И. Антоненко, Е.Г. Чаповского. – М.: Недра, 1976. – 312 с.

Гидрогеологические исследования для обоснования подземного захоронения промышленных стоков / Под ред. В.А. Грабовникова. — М.: Недра, 1993. — 335 с.

*Емельянов Б.М.* Раскрывая первые страницы. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 1997. – 344 с.

Максимов М.И. Мероприятия по улучшению системы разработки Туймазинского нефтяного месторождения // Разработка нефтяных месторождений Башкирии. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – С. 16–36.

*Попов В.Г.* Гидрогеохимия и гидрогеодинамика Предуралья. — М.: Наука, 1985. — 278 с.

Ходьков А.Е., Валуконис Г.Ю. Формирование и геологическая роль подземных вод. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1968. – 216 с.

*Brown H.S., Cook B.J., Krueger R., Shatkin J.A.* Reassessing the History of U.S. Hazardous Waste Disposal Policy – Problem Definition, Expert Knowledge and Agenda-Setting // RISK: Health, Safety & Environment. – 1997. – V. 8, No. 3. – P. 249–272.

*Mavropoulos A., Menegaki M., Kaliampakos D.* Underground hazardous waste disposal: a dynamic alternative to current hazardous waste management // Waste Management and the Environment II / *V. Popov, H. Itoh, C.A. Brebbia, S. Kungolos (eds.).* – WIT Press, 2004. – P. 159–168.

#### **References:**

*Abdrakhmanov R.F.* Tekhnogenez v podzemnoi gidrosfere Predural'ya [Technogenesis in the underground hydrosphere of the Urals] / USC RAS. Ufa, 1993. 208 p. (In Russian).

*Abdrakhmanov R.F.* Gidrogeoekologiya Bashkortostana [Hydrogeoecology of Bashkortostan]. Ufa: Informreklama, 2005. 344 p. (In Russian).

*Abdrakhmanov R.F., Popov V.G.* Mineral'nye lechebnye vody Bashkortostana [Mineral medicinal waters of Bashkortostan]. Ufa: Gilem, 1999. 208 p. (In Russian).

Abdrakhmanov R.F., Martin V.I., Popov V.G., Rozhdestvenskiy A.P., Smirnov A.I., Travkin A.I. Karst Bashkortostana [Karst of Bashkortostan]. Ufa: Informreklama, 2002. 383 p. (In Russian).

Akmanov R.Kh. Prichiny zagryazneniya presnykh podzemnykh vod rayonov neftedobychi Bashkirii [Causes of contamination of fresh underground waters in the areas of oil production in Bashkortostan] / BSC UrO RAS. Ufa, 1992. 122 p. (In Russian).

Brown H.S., Cook B.J., Krueger R., Shatkin J.A. Reassessing the History of U.S. Hazardous Waste Disposal Policy — Problem Definition, Expert Knowledge and Agenda-Setting // RISK: Health, Safety & Environment. 1997. V. 8, No. 3. P. 249–272.

*Emel'yanov B.M.* Raskryvaya pervye stranitsy [Opening the first pages]. Ekaterinburg: «Ural'skii rabochii» Press, 1997. 344 p. (In Russian).

*Gaev A.Ya., Shchugorev V.D., Butolin A.P.* Podzemnye rezervuary [Underground tanks]. Leningrad: Nedra, 1986. 223 p. (In Russian).

Gidrogeologicheskie i gidrogeokhimicheskie issledovaniya pri reshenii problemy sbrosa promstokov v glubokozalegayushchie karbonatnye porody (na primere Kuibyshevskogo Povolzh'ya i Bashkirii) [Hydrogeological and hydrogeochemical studies in solving the problem of discharging industrial effluents into deep-lying carbonate rocks (at the example of Kuibyshevsky Volga and Bashkiria)] / K.E. Pit'eva (ed.). Moscow: MSU Press, 1972. 350 p. (In Russian).

Gidrogeologicheskie issledovaniya dlya zakhoroneniya promyshlennykh stochnykh vod v glubokie vodonosnye gorizonty [Hydrogeological research for disposal of industrial wastewater into deep aquifers] / *K.I. Antonenko, E.G. Chapovskii (eds.)*. Moscow: Nedra, 1976. 312 p. (In Russian).

Gidrogeologicheskie issledovaniya dlya obosnovaniya podzemnogo zakhoroneniya promyshlennykh stokov [Hydrogeological studies to substantiate underground disposal of industrial wastewater] / V.A. Grabovnikov (ed.). Moscow: Nedra, 1993. 335 p. (In Russian).

*Khod'kov A.E., Valukonis G.Yu.* Formirovanie i geologicheskaya rol' podzemnykh vod [Formation and geological role of groundwater]. Leningrad: LGU Press, 1968. 216 p. (In Russian).

*Maksimov M.I.* Meropriyatiya po uluchsheniyu sistemy razrabotki Tuimazinskogo neftyanogo mestorozhdeniya [Measures to improve the development system of the Tuymazinskoye oil field] // Razrabotka neftyanykh mestorozhdenii Bashkirii [Development of oil fields in Bashkiria]. Moscow: Gostoptekhizdat, 1959. P. 16–36. (In Russian).

*Mavropoulos A., Menegaki M., Kaliampakos D.* Underground hazardous waste disposal: a dynamic alternative to current hazardous waste management // Waste Management and the Environment II / V. Popov, H. Itoh, C.A. Brebbia, S. Kungolos (Eds.). WIT Press, 2004. P. 159–168.

*Popov V.G.* Gidrogeokhimiya i gidrogeodinamika Predural'ya [Hydrogeochemistry and hydrogeodynamics of the CisUrals]. Moscow: Nauka, 1985. 278 p. (In Russian).

#### Сведения об авторе:

Абдрахманов Рафил Фазылович, доктор геол.-мин. наук, профессор, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: hydro@ufaras.ru

#### *About the author:*

Abdrakhmanov Rafil Fazilovich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: hydro@ufaras.ru