

Геологическое строение и металлогения западной части Восточно-Таннуольского рудного района (Республика Тыва) – на основе новых геохимических и изотопно-геохронологических данных

А.И.ЧЕРНЫХ (Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ФГУП ЦНИГРИ); 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1),
Е.В.ВЕТРОВ (АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья»; 630091, г. Новосибирск, Красный пр., 67; ФГБУН «Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН»; 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3),
Е.А.ПИХУТИН (АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья»; 630091, г. Новосибирск, Красный пр., 67)

Приведены результаты анализа геологических, геохимических и металлогенических материалов по территории Восточно-Таннуольского рудного района. В основу выводов положены вновь полученные данные при проведении работ по составлению Госгеолкарты-200/2 листа М-46-Х. Дана геологическая и геохимическая характеристика вулканогенных и интрузивных пород, с интерпретацией геодинамических условий их формирования. На основе анализа геологических и вновь полученных изотопно-геохронологических датировок вулканогенных и интрузивных комплексов сделаны выводы о возрасте формирования пород и основных металлогенических этапов. Разработана схема металлогенического районирования, рассмотрены пространственно-временные закономерности распределения полезных ископаемых и параметры связи полиметаллического, золоторудного и медно-порфирирового оруденения с вулканогенными и интрузивными комплексами. Дана оценка прогнозных ресурсов и предложены направления по постановке поисковых и прогнозно-металлогенических работ.

Ключевые слова: Восточно-Таннуольский рудный район, магматизм, вулканогенно-осадочные комплексы, изотопно-геохронологические данные, золото, медь, свинец, цинк, металлогения, прогнозные ресурсы.

Черных Александр Иванович
Ветров Евгений Валерьевич
Пихутин Евгений Александрович



chernykh@tsnigri.ru

Geological structure and metallogeny of East Tannuol ore district western part (Tyva Republic) – new geochemical and isotope-geochronological data

A.I.CHERNYKH, E.V.VETROV, E.A.PIKHUTIN

Analytical results of geological, geochemical and metallogenic materials on East Tannuol ore district are presented. The conclusions are based on the new data obtained in compilation of the state geological map 200/2, sheet M-46-X. Geological and geochemical characterization is given for volcanogenic and intrusive rocks, their geodynamic formational conditions are interpreted. Based on the analysis of geological and the new isotope-geochronological dating of volcanogenic and intrusive complexes, conclusions on the age of rock formation and main metallogenic stages are made. Metallogenic regionalization scheme is developed, spatial and temporal regularities of mineral distribution and association parameters of polymetallic, gold and porphyry copper mineralization with volcanogenic and intrusive complexes are considered. Inferred resources are evaluated and directions for prospecting and prediction/metallogenic activities are proposed.

Key words: East Tannuol ore district, magmatism, volcanogenic-sedimentary complexes, isotope-geochronological data, gold, copper, lead, zinc, metallogeny, inferred resources.

Восточно-Таннуольский рудный район (ВТРР) расположен на юго-западе Республики Тыва, в южной российской части Алтае-Саянской металлогенической провинции (рис. 1). Для района характерна насыщен-

ность разновозрастными вулканогенными и интрузивными комплексами пород. Здесь закартированы одни из наиболее представительных разрезов островодужных раннекембрийских вулканогенно-осадочных

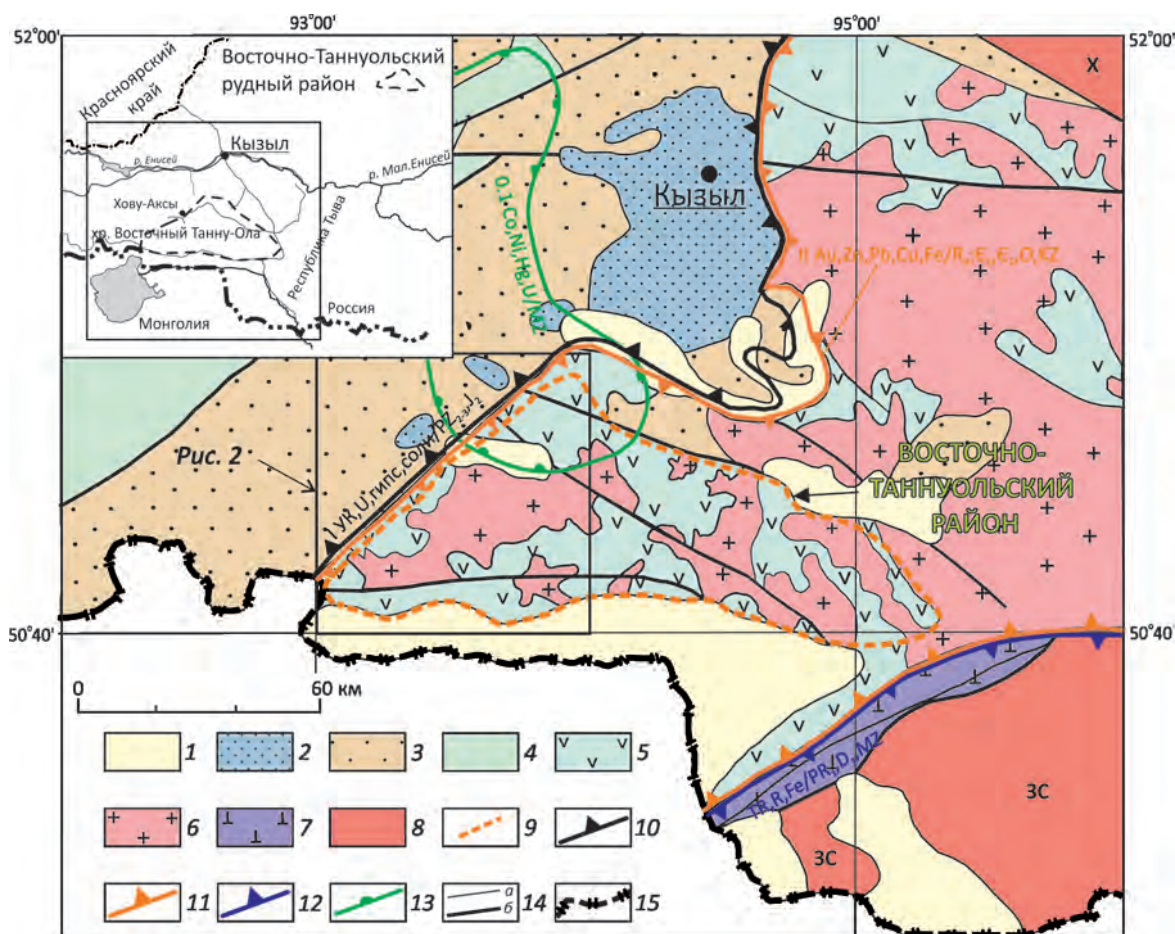


Рис. 1. Схема геолого-структурного положения Восточно-Таннуольского рудного района:

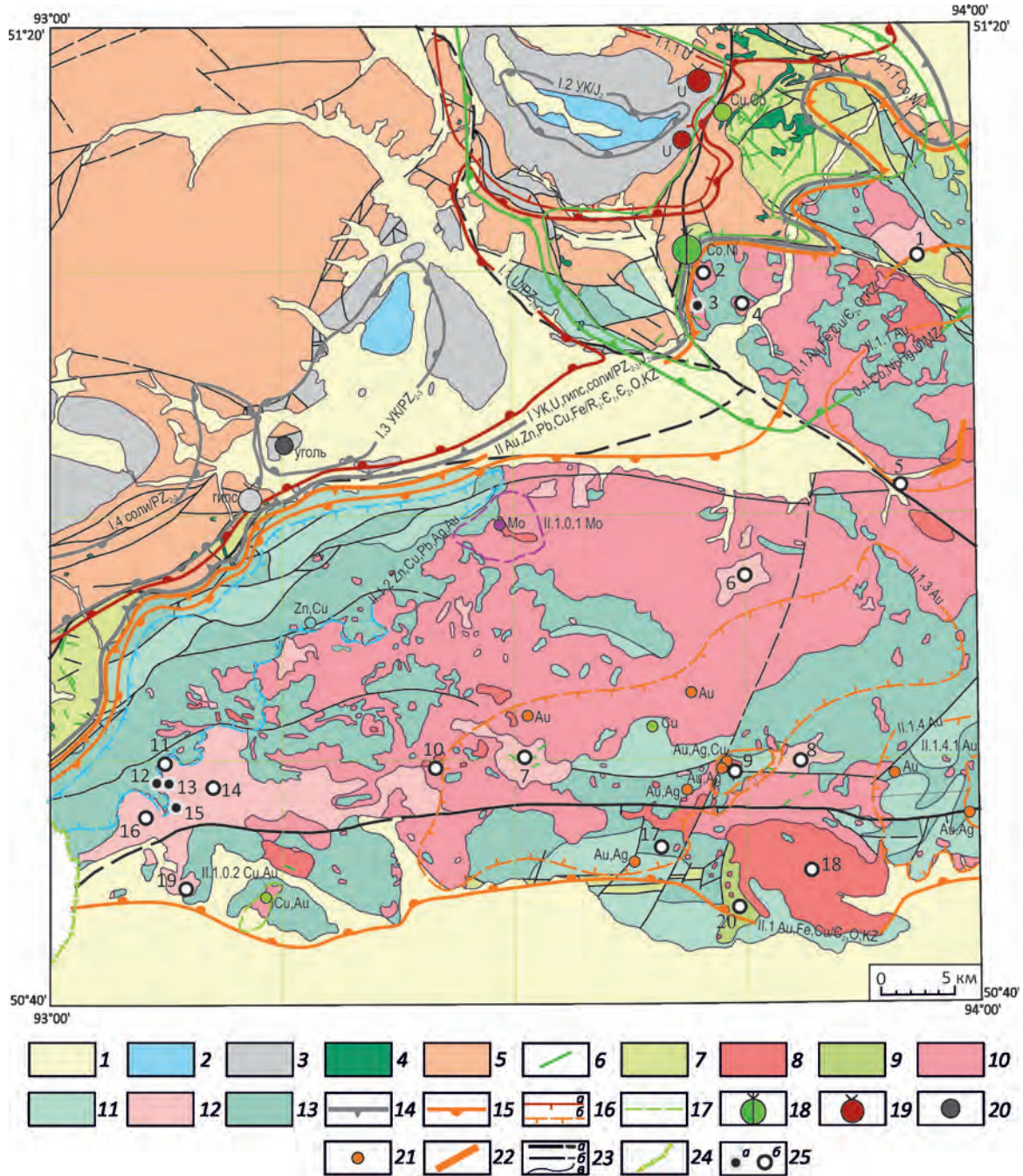
1–2 – впадины: 1 – выполненные кайнозойскими континентальными отложениями, 2 – выполненные мезозойскими угленосными осадками; 3 – средне-верхнепалеозойские породы Центрально-Тувинского прогиба; 4 – карбонатно-терригенные осадки каледонской Западно-Саянской складчатой системы; 5–6 – структуры Таннуольско-Улугуйской складчатой системы: 5 – раннекембрийские островодужные вулканогенно-осадочные породы, 6 – кембрийско-ордовикские интрузивные породы аккреционно-коллизивной ассоциации (габбро, диориты, гранитоиды, плагиограниты); 7 – венд (?)–раннекембрийские породы Агардакского офиолитового пояса; 8 – Западно-Сангиленский (ЗС) и Харальский (Х) выступы, сложенные глинистыми сланцами, гнейсами и мраморами протерозойско-рифейского возраста; 9 – граница Восточно-Таннуольского рудного района; 10–12 – металлогенические зоны: 10 – Центрально-Тувинская I (U, каменный уголь, соль), 11 – Таннуольско-Улугуйская II (Au, Cu, Pb, Zn, Fe), 12 – Сангиленская (Li, Ta, Nb, редкоземельные металлы, Fe); 13 – Баян-Хольский рудный район (Co, Ni, Cu); 14 – границы между геологическими подразделениями (а), разломы (б); 15 – граница Российской Федерации

комплексов и многочисленные кембрийско-ордовикские интрузии, сформированные в аккреционно-коллизивной геодинамической обстановке [3–5].

Геология и металлогения юго-западной Тывы изучалась преимущественно в 1960–1970-х гг. Большинство этих работ были сконцентрированы вблизи Хову-Аксинского Ni-Co месторождения и в пределах Центрально-Тувинского прогиба, где установлены месторождения урана, соли и каменных углей. ВТРР характеризуется плохой геологической и поисковой изученностью. На большей части этой территории не проводились геолого-съёмочные работы масштаба

1:50 000. Вещественная характеристика пород, как правило, ограничивается петрографическими и единичными петро- и геохимическими данными. Возраст стратифицированных комплексов определялся на основе их соответствия подобным комплексам более изученных районов Алтае-Саянской складчатой области. Возраст интрузивных массивов обосновывался единичными изотопно-геохронологическими определениями и геологическим данными [3–5].

Сведения о закономерностях размещения и локализации полезных ископаемых ВТРР носят отрывочный характер и получены преимущественно в процессе



проведения ГСР-200, тематических и научно-исследовательских работ. Поисковые работы на медь, свинец, цинк, золото и железо проводились в крайне незначительном объеме в 1960-х гг. При геохимических поисках масштаба 1:200 000 в конце 1980-х гг. выполнялись заверочные горные работы на отдельных аномалиях. В результате были выявлены многочисленные поисковые признаки золотого, полиметаллического, железного и медного оруденения. Специализированные поисковые работы на золото были начаты только в 2012 г. в южной части района на Деспенской [1] и в 2015 г. на Ургайлыгской площадях.

В настоящей статье представлены результаты анализа геологических, геохимических, изотопно-геохронологических и металлогенических данных, полученных при проведении ГДП-200 листа М-46-Х в 2014–2016 гг. в западной части ВТРР, с учетом материалов предшествующих работ. Использование этих данных позволяет по-новому подойти к пониманию закономерностей размещения и локализации полезных ископаемых и решению проблем расчленения магматических комплексов не только в пределах ВТРР, но и всей Алтае-Саянской складчатой области (АССО).

Рис. 2. Обзорная схема геологического строения западной части Восточно-Таннуольского рудного района:

1 – кайнозойские отложения; 2 – юрская угленосная моласса; 3 – каменноугольные терригенные породы; 4 – торгалыгский сиенит-габбровый комплекс (D_3-C_1); 5 – девонские вулканогенно-осадочные, терригенные и терригенно-карбонатные отложения Центрально-Тувинского прогиба (D_1-D_3); 6 – базитовые дайки (PZ_3-MZ); 7 – ордовикско-силурийские терригенные и терригенно-карбонатные отложения Центрально-Тувинского прогиба (O_3-S_2); 8 – арголикский гранодиорит-гранитовый комплекс (O); 9 – деспенская андезит-риодацитовая толща (O_3); 10 – таннуольский габбродиорит-гранодиорит-плагиогранитовый комплекс (E_{2-3}); 11 – ирбитейская свита: базальты, андезиты, туфы, рифогенные известняки с прослоями туффигов и алевролитов (E_1); 12 – майнский габбро-плагиогранитовый комплекс (E_1); 13 – кадвойская и серлигская свиты объединенные: базальты, андезиты, дациты, риолиты, туфы основного, среднего и кислого составов, прослои глинистых известняков; 14–17 – границы металлогенических подразделений: 14 – металлогенических зон, 15 – рудных районов, 16 – рудных узлов (а) и прогнозируемых рудных узлов (б), 17 – прогнозируемых рудных полей; 18–21 – месторождения и проявления с указанием вида полезных ископаемых (Ni, Co – никеля и кобальта, гипса, Au – золота и др.): 18 – крупное, 19 – среднее, 20 – малое, 21 – проявление; 22 – малое месторождение россыпного золота; 23 – главные (а) и второстепенные (б) разломы, границы между геологическими подразделениями (в); 24 – Российско-Монгольская государственная граница; 25 – здесь и далее на рисунках 6 и 7 места отбора проб, для которых получены изотопно-геохронологические данные: датировки по материалам предшественников (а) и вновь полученные авторские данные (б), цифрами указан порядковый номер проб в табл. 3; *металлогенические подразделения*: I – Центрально-Тувинская галит-гипс-уран-каменноугольная металлогеническая зона: I.1 – Южно-Тувинский урановорудный район, I.1.1 – Как-Хольский урановорудный узел, I.2 – Онкажинский угольный район, I.3 – Актальский угольный район, I.4 – Дус-Дагский соленосный район (гипс, галит); II – Таннуольско-Улугуйская железо-медь-полиметаллически-золоторудная металлогеническая зона: II.1 – Восточно-Таннуольский железо-медь-полиметаллически-золоторудный район, II.1.1 – Элегест-Межегейский золоторудно-россыпной узел, II.1.2 – Ирбитейский прогнозируемый золото-серебро-полиметаллический узел, II.1.3 – Аптаринский прогнозируемый золоторудный узел, II.1.3.1 – Деспенское золоторудное поле, II.1.4 – Шивилигский прогнозируемый золоторудный узел, II.1.4.1 – Онгешское прогнозируемое золоторудное поле, II.1.0.1 – Улуг-Сайлыгское прогнозируемое медно-молибденовое рудное поле, II.1.0.2 – Ак-Чаринское прогнозируемое золото-молибден-медное рудное поле; 0.1 – Баян-Хольский медно-никель-кобальтовый рудный район; 0.1.1 – Хову-Аксинский никель-кобальтовый рудный узел

Геолого-структурное положение и геологическое строение. Восточно-Таннуольский рудный район расположен в юго-западной части каледонской Таннуольско-Улугуйской складчатой системы (см. рисунки 1 и 2). С севера каледонские комплексы граничат с породами Центрально-Тувинского герцинско-эпигерцинского прогиба, а с юга – перекрыты кайнозойскими отложениями Убсу-Нурской впадины. Центрально-Тувинский прогиб сложен преимущественно терригенными и карбонатно-терригенными отложениями континентальных фаций ордовик-силурийского и девонского возраста. В нижней части разреза пород прогиба встречаются вулканогенно-осадочные разности (D_1), а в верхней – угленосные терригенные осадки (C_{1-2}). Наиболее молодые породы прогиба представлены юрскими угленосными молассовыми отложениями, которые слагают наложенные Онкажинскую и Актальскую впадины (см. рис. 2).

В пределах ВТРП выделяются комплексы пород островодужной и аккреционно-коллизийной ассоциаций [3–7]. Проведенные авторами данной публикации работы позволили существенно уточнить строение, состав и стадии формирования пород ВТРП. В образования островодужной ассоциации включены раннекембрийские вулканогенно-осадочные породы кадвойской, серлигской и ирбитейской свит, интродуцированные массивами плагиогранитного, реже габброидного состава, отнесенные авторами к майнскому комплексу. К породам аккреционно-коллизийной ассоциации отнесены массивы габбродиорит-гранодиорит-плагиогранитовой

формации (таннуольский комплекс, E_{2-3}) и гранит-лейкогранитовой формации (арголикский комплекс, O). Становление пород таннуольского комплекса происходило на ранней, а арголикского – на завершающей стадии аккреционно-коллизийного этапа формирования Таннуольско-Улугуйской складчатой системы.

Островодужная ассоциация пород. На основании полученных авторами геологических данных можно предположить, что формирование островодужных вулканогенно-осадочных пород ВТРП происходило в две стадии. На ранней формировались вулканиты толейтовой серии базальт-андезит-риолитового состава с прослоями туфов, туффигов и известняков кадвойской и серлигской свит. На более поздней стадии образовывались вулканогенно-терригенно-карбонатные породы ирбитейской свиты.

Кадвойская свита сложена лавами, туфами базальтов, реже андезибазальтами, андезитами и их туфами с редкими прослоями и линзами известняков, туфоконгломератов, лав и туфов кислого состава. Ее состав довольно однороден и выдержан в пределах всего ВТРП.

Серлигская свита перекрывает отложения кадвойской свиты, сложена лавами и туфами низкощелочных риолитов и плагиориолитов, реже андезитов, андезибазальтов, базальтов, туфоконгломератами, туфогравелитами, туфоалевролитами, туфопесчаниками, известняками, часто глинистыми. Соотношения породных разностей не выдержаны, сильно меняются по площади. В целом состав серлигской свиты более «пестрый», чем кадвойской.

1. Средние содержания петрохимических элементов в породах магматических комплексов (в %)

Группа пород	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	ΣFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
<i>Кадвойская свита</i>										
Базальты (3)	49,47	16,24	1,48	12,56	0,22	4,85	9,20	2,75	0,30	0,19
Андезибазальты (1)	53,61	17,15	1,37	10,17	0,18	4,36	5,17	5,06	0,53	0,22
<i>Серлигская свита</i>										
Базальты (20)	49,05	17,81	0,89	10,94	0,18	5,33	9,75	2,97	0,51	0,13
Андезибазальты (19)	54,97	16,51	1,02	9,58	0,17	3,68	6,14	4,20	0,44	0,24
Андезиты (10)	59,37	15,52	1,02	8,93	0,14	2,59	4,73	4,27	1,02	0,28
Дациты (4)	67,05	14,34	0,69	5,72	0,18	1,15	2,47	5,03	1,58	0,17
Риодациты (4)	71,64	13,87	0,31	3,00	0,04	0,31	2,01	3,03	3,98	0,05
Риолиты (6)	75,47	12,09	0,26	3,59	0,07	0,50	1,00	5,04	0,99	0,04
<i>Ирбитейская свита</i>										
Базальты (14)	48,00	16,72	1,20	11,29	0,19	6,19	7,82	2,99	0,71	0,27
Андезибазальты (2)	56,35	16,18	0,87	7,92	0,13	3,28	6,42	3,89	1,05	0,25
Андезиты (3)	59,68	16,00	0,94	9,44	0,09	2,00	4,97	4,03	0,42	0,19
<i>Деспенская толща</i>										
Риодациты (1)	73,2	13,1	0,23	2,0	0,04	0,4	0,9	4,1	4,1	0,03
<i>Майнский комплекс</i>										
Габбро (4)	50,08	16,40	1,02	12,10	0,20	5,50	8,68	3,28	0,40	0,13
Кварцевые диориты (6)	58,93	16,49	0,66	7,67	0,12	3,68	6,90	3,25	0,42	0,11
Гранодиориты (5)	65,58	14,92	0,54	6,30	0,13	1,68	4,76	3,74	0,58	0,14
Плагииграниты (8)	71,55	13,21	0,41	4,41	0,09	0,80	3,05	4,03	0,60	0,08
Лейкограниты (12)	74,98	12,59	0,27	2,57	0,04	0,44	2,03	4,82	0,38	0,04
<i>Таннуольский комплекс</i>										
Габбро (19)	51,04	17,59	0,90	9,27	0,15	5,52	9,12	3,04	0,71	0,18
Диориты (14)	55,04	17,81	0,84	7,40	0,12	4,29	7,68	3,68	0,99	0,18
Кварцевые диориты (16)	59,09	16,97	0,79	6,65	0,11	3,20	6,17	3,92	1,25	0,20
Гранодиориты (6)	65,20	15,53	0,56	4,68	0,09	1,73	3,45	4,08	2,35	0,15
Плагииграниты (6)	70,22	15,25	0,30	2,94	0,06	0,98	3,08	4,28	1,99	0,09
<i>Арголикий комплекс</i>										
Граниты (20)	71,69	13,78	0,34	2,97	0,05	0,55	1,41	3,98	3,56	0,07
Лейкограниты (48)	75,10	12,73	0,21	2,10	0,04	0,26	0,96	3,67	3,99	0,03

Примечание. Здесь и в табл. 2 в скобках указано число проб.

Петрохимический и геохимический состав пород ВТРР приведен в таблицах 1 и 2. Эффузивы кадвойской и серлигской свит образуют последовательно дифференцированную базальт-андезит-риолитовую ассоциацию. В составе кадвойской свиты присутствуют вулканы нормальной и умеренно щелочной серий, главным образом, основного состава (рис. 3). Вулканические породы серлигской свиты представлены нормальнощелочными и умереннощелочными разностями от основных до кислых пород. Базальты характеризуются натровым уклоном, низкой до умеренной титанистостью, повышенными глиноземистостью, магнезиальностью, пониженной фосфатностью, повышенными содержаниями кальция и железа. Для вулканических пород кадвойской и серлигской свит характерен феннорский тренд дифференциации, принадлежность к толеитовой серии, что отражается в увеличении отношения FeO*/MgO от 1 до 10 с увеличением содержания SiO₂ от 47 до 76%.

Базальтоиды кадвойской свиты характеризуются слабо наклонными положительными, практически субгоризонтальными спектрами распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) с отношением

(La/Yb)_N=1,2–1,6 и отсутствием минимума по европию (рис. 4). Такие спектры РЗЭ типичны для базальтов, формирующихся из слабо обогащенных источников, и, возможно, близких к базальтам океанических плато и окраинных морей. На спектрах РЗЭ базальтоидов серлигской свиты появляется слабый положительный наклон с отношением (La/Yb)_N=1,4–2,6, связанный с незначительным обогащением легкими редкоземельными элементами. Такие спектры РЗЭ указывают на появление более обогащенных источников, из которых формировались базальтоиды серлигской свиты, по сравнению с источниками базальтоидов кадвойской свиты.

Анализ геологических и геохимических данных, положение фигуративных точек базальтов кадвойской и серлигской свит на дискриминантных диаграммах (см. рис. 4) позволяет сделать вывод о том, что, вероятнее всего, формирование вулканогенно-осадочных пород кадвойской и серлигской свит происходило в условиях примитивной (энсиматической) островной дуги.

Авторы установили возраст риодацитов серлигской свиты U-Pb методом (ЦИИ, ФГБУ ВСЕГЕИ). По 10 зернам циркона из риодацитов (табл. 3, обр. 2218-3)

2. Средние содержания редкоземельных элементов и микроэлементов в породах магматических комплексов (в г/т)

Группа пород	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	Th	U	Pb
<i>Кавказская свита</i>																										
Базальты (2)	6,69	16,6	2,45	13,8	4,16	1,39	3,99	0,77	5,19	1,1	3,12	0,42	3,12	0,44	4,37	268	28,9	94,9	1,64	0,21	175	2,55	0,1	1,06	0,41	42,4
<i>Сергиская свита</i>																										
Базальты (4)	5,27	12,7	1,86	9,3	2,58	0,9	2,56	0,48	3,04	0,68	1,81	0,27	1,89	0,31	9,52	399	17,5	54,8	0,95	0,2	326	1,3	0,1	0,75	0,28	6,53
Андезитбазальты (3)	7,9	19,3	2,7	11,6	3,06	1,05	3,22	0,53	3,51	0,74	2,14	0,32	2,08	0,34	7,44	297	24,8	95,3	2,53	0,24	232	2,24	0,2	1,43	0,59	6,57
Андезиты (4)	15,5	34,3	5	23,3	5,16	1,63	4,59	0,76	5	1,04	2,91	0,39	2,61	0,4	18	367	28	104	2,73	0,37	344	2,62	0,2	1,82	0,9	6,62
Дацинты (1)	14,3	35,5	4,99	23,1	6,37	1,62	5,64	1,05	6,95	1,46	4,36	0,62	4,33	0,67	2	49,4	41,5	123	2,43	0,1	33,6	3,72	0,1	3,08	0,93	2,3
Риолиты (1)	8,08	20	2,91	15,4	4,68	1,36	4,64	0,77	6,12	1,47	4,33	0,64	4,78	0,72	2,6	38,8	39,7	87,5	1,08	0,15	109	3,26	0,1	0,88	0,72	3,72
<i>Ирбитейская свита</i>																										
Базальты (6)	9,44	22,6	3,23	14,5	3,85	1,19	3,87	0,71	4,57	0,98	2,51	0,36	2,47	0,39	4,44	374	24,7	104	3,32	0,42	170	2,49	0,2	1,04	0,43	4,48
Андезитбазальты (3)	14,4	33,3	4,37	20,1	5,09	1,27	4,69	0,72	4,99	1,08	2,86	0,39	2,77	0,46	7,43	447	27,8	135	3,22	0,42	294	3,52	0,2	3,15	1,11	4,29
Андезиты (2)	8,77	22,2	2,87	14	3,75	1,06	3,89	0,63	4,32	0,98	2,79	0,39	2,73	0,45	9,7	302	27,6	117	1,82	0,18	339	2,96	0,1	1,67	0,63	3,28
<i>Деспенская толща</i>																										
Риодациты (1)	23,7	49,5	5,54	21	3,89	0,63	3,1	0,47	3,07	0,65	1,92	0,3	2,17	0,38	94,5	111	17,9	140	5,21	1,33	771	4,34	0,4	9,55	3,17	22,1
<i>Майнский комплекс</i>																										
Габбро (4)	4,42	11,7	1,85	9,06	2,75	0,91	2,88	0,51	3,44	0,73	1,95	0,27	1,97	0,31	7,88	322	19,5	52,1	1,2	0,23	267	1,1	0,1	0,45	0,2	3,34
Гранодиориты (1)	7,51	16,4	2,51	11,4	2,92	0,72	2,57	0,46	2,92	0,6	1,74	0,29	1,86	0,31	11,7	313	18,1	107	1,28	0,31	389	2,89	0,1	2,12	0,92	4,63
Плагиограниты (3)	15,1	34,4	4,71	20,4	5,06	0,94	4,46	0,81	5,37	1,2	3,39	0,56	4,07	0,68	34,4	115	32,6	217	6,57	0,31	534	6,11	0,5	6	0,98	2,68
Лейкограниты (3)	9,78	20,1	2,57	11,3	3	0,82	2,98	0,61	4,29	1,01	2,83	0,45	3,41	0,46	38,3	108	26,3	96,6	2,93	0,28	314	3,02	0,3	3,45	0,6	7,27
<i>Таннуольский комплекс</i>																										
Габбро (4)	7,11	16,4	2,48	12,5	3,28	1,07	2,93	0,51	3,05	0,63	1,62	0,23	1,62	0,24	17,3	408	17,2	72,2	1,6	0,32	313	1,91	0,1	0,71	0,35	4,35
Диориты (3)	7,6	17,8	2,65	13,6	3,35	1,35	3,14	0,52	3,15	0,63	1,65	0,23	1,53	0,23	8,54	531	14,4	68,7	2,06	0,22	281	1,88	0,1	0,97	0,44	3,87
Кварцевые диориты (4)	9,3	20,3	2,76	12,5	3,08	0,87	2,78	0,44	2,96	0,64	1,61	0,24	1,62	0,25	19,3	444	16	81,9	3,29	0,3	359	2,19	0,2	1,83	0,48	6,41
Плагиограниты (4)	11,7	26,4	3,32	13,2	2,91	0,73	2,46	0,42	2,71	0,58	1,61	0,25	1,76	0,25	32,9	323	16,1	130	5,64	0,51	633	3,53	0,5	3,49	0,83	6,63
<i>Аргольский комплекс</i>																										
Лейкограниты (9)	28,7	79,9	8,91	38,9	9,92	1,27	8,95	1,74	13,2	3,02	8,4	1,21	8,41	1,28	36,8	29	73,2	275	19,8	0,3	506	8,71	1,3	5,51	1,44	4,89

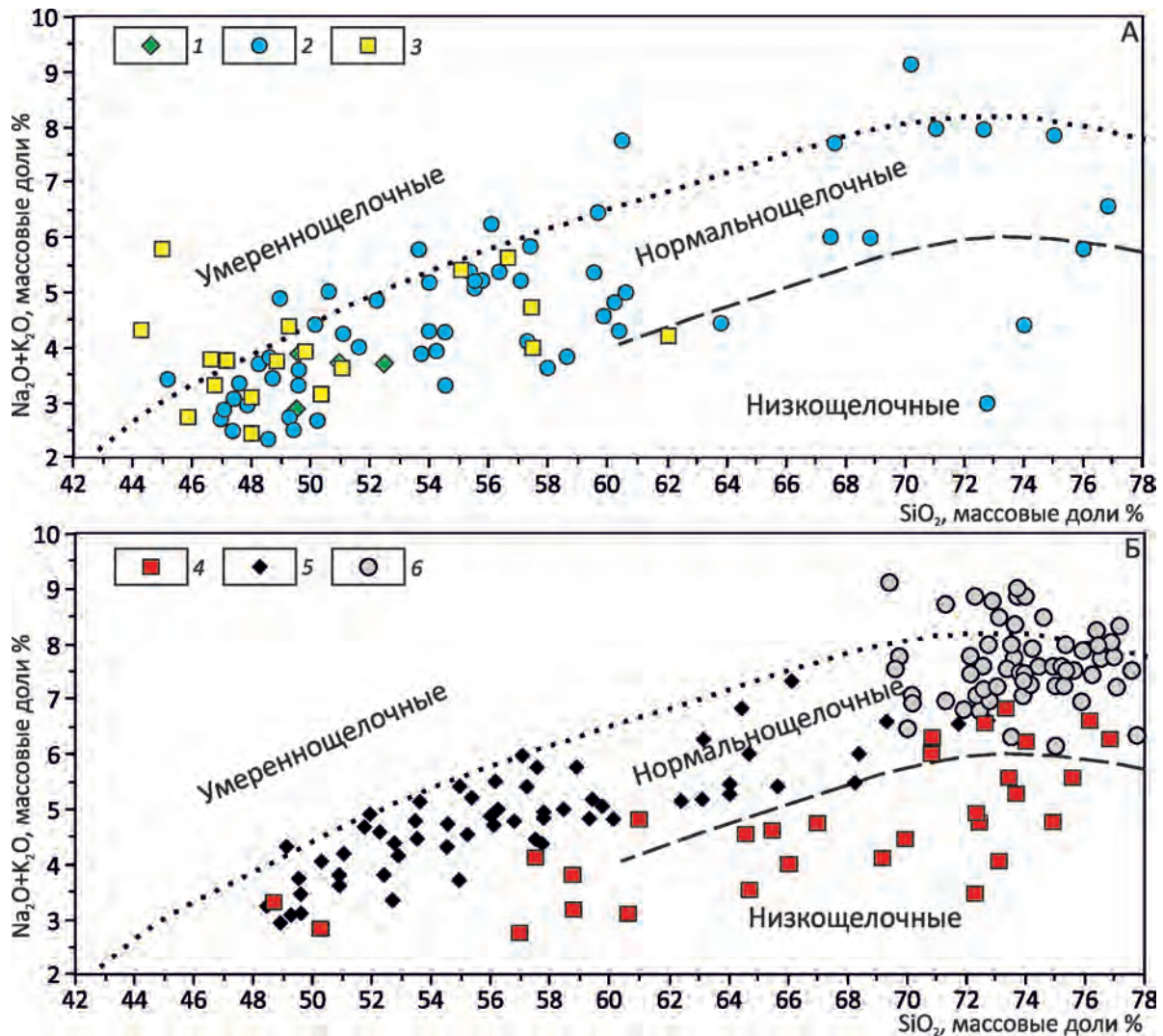


Рис. 3. TAS-диаграмма. Границы типов щелочности приведены по Петрографическому кодексу, 2009:

А – для пород майнского (1), таннуольского (2) и арголикского (3) комплексов; Б – для пород кадвойской (4), серлигской (5) и ирбитейской (6) свит

определен раннекембрийский конкордантный возраст $508,2 \pm 4,7$ млн. лет. По мнению авторов, возраст в некоторой степени омоложен, но, в сочетании с палеонтологическими данными, свидетельствует о раннекембрийском времени формирования вулканитов и сопутствующих им осадков серлигской свиты.

Вулканогенно-осадочные породы кадвойской и серлигской свит прорываются небольшими разобщенными телами неправильной формы габброидов и гранитоидов, отнесенных авторами к майнскому комплексу. Породы разделены на две фазы. Роговообманковые и кварцевые габбро образуют породы первой фазы, а роговообманковые, роговообманково-биотитовые гранодиориты, плагиограниты, тоналиты и лейкоплагиограниты – второй фазы.

Интрузивные образования майнского комплекса в ряду от габбро до лейкоплагиогранитов образуют единый эволюционный тренд, отвечающий высококальциевой низкощелочной тоналит-трондьемитовой серии. По мере увеличения кремнекислотности наблюдается возрастание содержаний $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ и снижение Al_2O_3 , CaO , MgO , MnO , $\Sigma\text{Fe}_2\text{O}_3$ и TiO_2 (см. табл. 1). Гранитоиды майнского комплекса по петрохимическому составу в большинстве своем отвечают низкощелочным породам пониженной калиевоности, относятся к железистому типу $\text{FeOt}/(\text{FeOt} + \text{MgO}) = 0,6 - 0,9$ известковой серии. По содержанию редкоземельных элементов (см. табл. 2) и нормированным по хондриту спектрам их распределения они характеризуются преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми и наличием отрицательного минимума

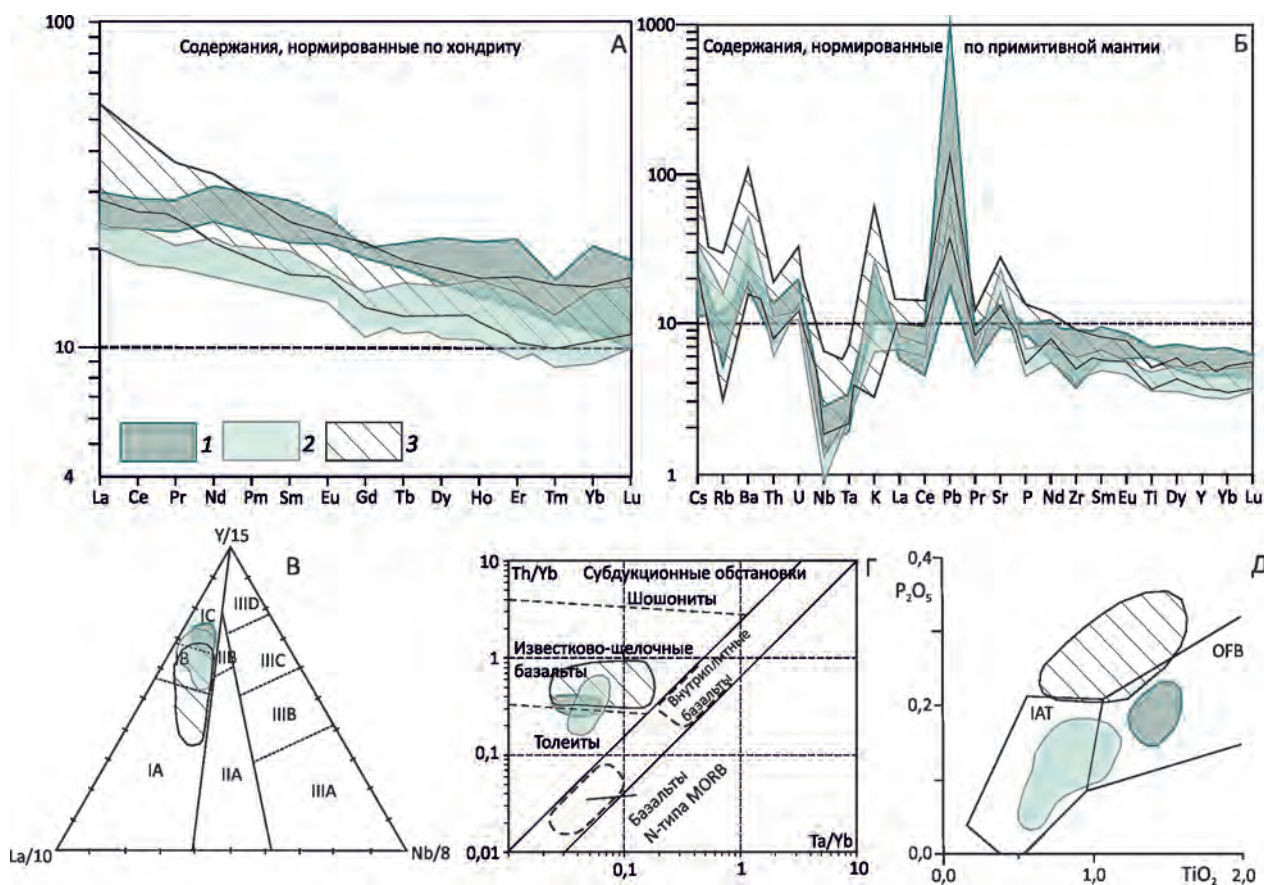


Рис. 4. Дискриминационные диаграммы, мультиэлементные и РЗЭ спектры распределения для вулканических пород основного состава кадвояской, серлигской и ирбитейской свит:

А – спайдердиаграммы редкоземельных элементов; Б – мультиэлементные спайдердиаграммы, нормирование элементов по работе [17]; В – тройная диаграмма La/10–Y/15–Nb/8: поля по работе [1]: I – базальты вулканических дуг (IA – известково-щелочные базальты, IC – островодужные толеиты, IB – известково-щелочные базальты и толеиты), II – континентальные базальты (IIA – континентальные базальты, IIB – базальты задуровых бассейнов), III – океанические базальты (IIIA – щелочные базальты внутриконтинентальных рифтов, IIIB, IIIC – E-тип MORB, IIIB – обогащенные, IIIC – слабообогатщенные; IIID – N-тип MORB); Г – диаграмма Ta/Yb–Th/Yb: поля базальтов по работам [13, 14]; Д – диаграмма TiO₂–P₂O₅: поля базальтов по работе [12]: IAT – островодужные толеиты, OFB – базальты океанического дна; свиты: 1 – кадвояская, 2 – серлигская, 3 – ирбитейская

по европию (рис. 5). На мультиэлементных спектрах для майнских гранитов отмечаются положительные аномалии по К и Pb, отрицательные аномалии по Та и Nb, La и Ce, минимумы по Р и Ti, слабый максимум по Sr (см. рис. 5). Наличие минимума по Nb, Та и Ti свидетельствует о присутствии пород островодужного генезиса в источнике магмогенерации.

Результаты ранее проведенных изотопно-геохронологических исследований пород майнского комплекса [4, 5] и вновь полученные авторами результаты U–Pb датирования восьми проб по циркону (ЦИИ ФБГУ ВСЕГЕИ, SHRIMP II) свидетельствуют о формировании пород в интервале 518–541 млн. лет. (см. табл. 3).

Ирбитейская свита с базальными конгломератами в основании перекрывает серлигскую. Отложения свиты характеризуются резкой фациальной изменчивостью, преобладают пестроцветные субаэральные пирокластические фации и широко проявлены рифогенные известняки. Породы представлены вулканитами (базальтами, андезитами, туфами) с большим количеством прослоев и линз туффитов, алевролитов, глинистых известняков, при весьма широком развитии рифогенных археоциатовых известняков.

В состав ирбитейской свиты включены вулканиты нормальной и умеренно щелочной серий (см. рис. 3). Уровень щелочности снижается от базальтов к андезитам. Среди базальтов, андезибазальтов и андезитов

3. Результаты изотопно-геохронологических исследований пород магматических комплексов

Номер п/п	Номер пробы	Порода	Наименование геологического подразделения	Метод	Возраст, млн. лет
1	2044-3	Порфириовидный гранит	Южно-Чумуртукский массив; вторая фаза майнского комплекса	U-Pb	541,4±8,4
2	2012-2	Порфириовидный гранит	Ховуаксинский массив; вторая фаза таннуольского комплекса	U-Pb	505±3
3	182	Гранофир	Ховуаксинский массив; вторая фаза таннуольского комплекса	U-Pb	510±6,3
4	2025-1	Порфириовидный гранит	Усть-Унгешский массив; вторая фаза таннуольского комплекса.	U-Pb	507,8±6,4
5	77	Роговообманковый диорит	Краевая часть Тейдашского массива; первая фаза таннуольского комплекса	U-Pb	496±4,9
6	2092-1	Роговообманковый плагиогранит	Бичесайлыгский массив, вторая фаза майнского комплекса	U-Pb	532,2±5,2
7	4073-2	Порфириовидный гранит	Аптаринский массив; вторая фаза майнского комплекса	U-Pb	526±4
8	4567-3	Порфириовидный гранит	Дыттыгхемский массив; вторая фаза майнского комплекса	U-Pb	534±3
9	2422	Биотит-роговообманковый плагиогранит	Бичесерлигский массив; арголикский комплекс	U-Pb	447±2
10	2168-2	Роговообманковый диорит	Центральная часть Восточно-Таннуольского массива; первая фаза таннуольского комплекса	U-Pb	492,2±5,5
11	3624-2	Роговообманковое габбро	Ирбитейский массив; первая фаза майнского комплекса	U-Pb	529±3
12	ТИ-126	Габбро	Ирбитейский массив; первая фаза майнского комплекса	Ar-Ar	539±6
13	Т-1	Диорит	Западная часть Нижнеирбитейского массива; вторая фаза майнского комплекса	U-Pb	518±2
14	4033-3	Роговообманково-биотитовый гранит	Центральная часть нижнеирбитейского массива; вторая фаза майнского комплекса	U-Pb	524±3
15	РТ-10	Кварцевый диорит	Западная часть Нижнеирбитейского массива; вторая фаза майнского комплекса	U-Pb	521,9±4,1
16	2135-1	Роговообманково-биотитовый гранит	Западная часть нижнеирбитейского массива; вторая фаза майнского комплекса	U-Pb	527±3
17	2218-3	Риолит	Междуречье рр. Биче-Серлиг и Улуг-Серлиг; Серлигская свита	U-Pb	508,2±4,7
18	2226-1	Биотитовый лейкогранит	Кызылдагский массив; Арголикский комплекс	U-Pb	451±4
19	2127-1	Биотитовый лейкоплагиогранит	Краевая часть нижнеирбитейского массива; вторая фаза майнского комплекса	U-Pb	518±3
20	2251-1	Риодацит	Деспенская толща в долине р. Деспен	U-Pb	453,1±3,2

Примечание. Обр. 182 [2], образцы ТИ-126 и Т-1 [5] и обр. РТ-10 [4].

ирбитейской свиты преобладают нормально щелочные разности. Базальты характеризуются натровым уклоном, высокой титанистостью, повышенными глиноземистостью, магнезиальностью и фосфатностью, средними содержаниями кальция, повышенными содержаниями железа. Отношения FeO^*/MgO колеблются от 1 до 3, что в сочетании с несколько повышенными содержаниями титана и калия указывает на принадлежность базальтов ирбитейской свиты к группе пород, переходной от толеитовой к известково-щелочной серии.

Для базальтов ирбитейской свиты характерны слабо наклонные положительные спектры распределения РЗЭ

с отношением $(La/Yb)_N=2-3$, с наличием слабой «европиевой аномалии» или ее отсутствием (см. рис. 4). По сравнению со спектрами распределения РЗЭ базальтов серлигской свиты, для базальтов ирбитейской свиты отмечается относительно повышенное содержание редкоземельных элементов. Такие спектры РЗЭ, в различной степени обогащенные легкими РЗЭ, указывают на формирование базальтов в островодужных условиях.

На мультиэлементных спектрах для базальтов ирбитейской свиты отмечаются отрицательные аномалии по Ta и Nb, слабый минимум по Ti, положительные аномалии по Ba, K, Pb и Sr. В целом, мультиэлементные

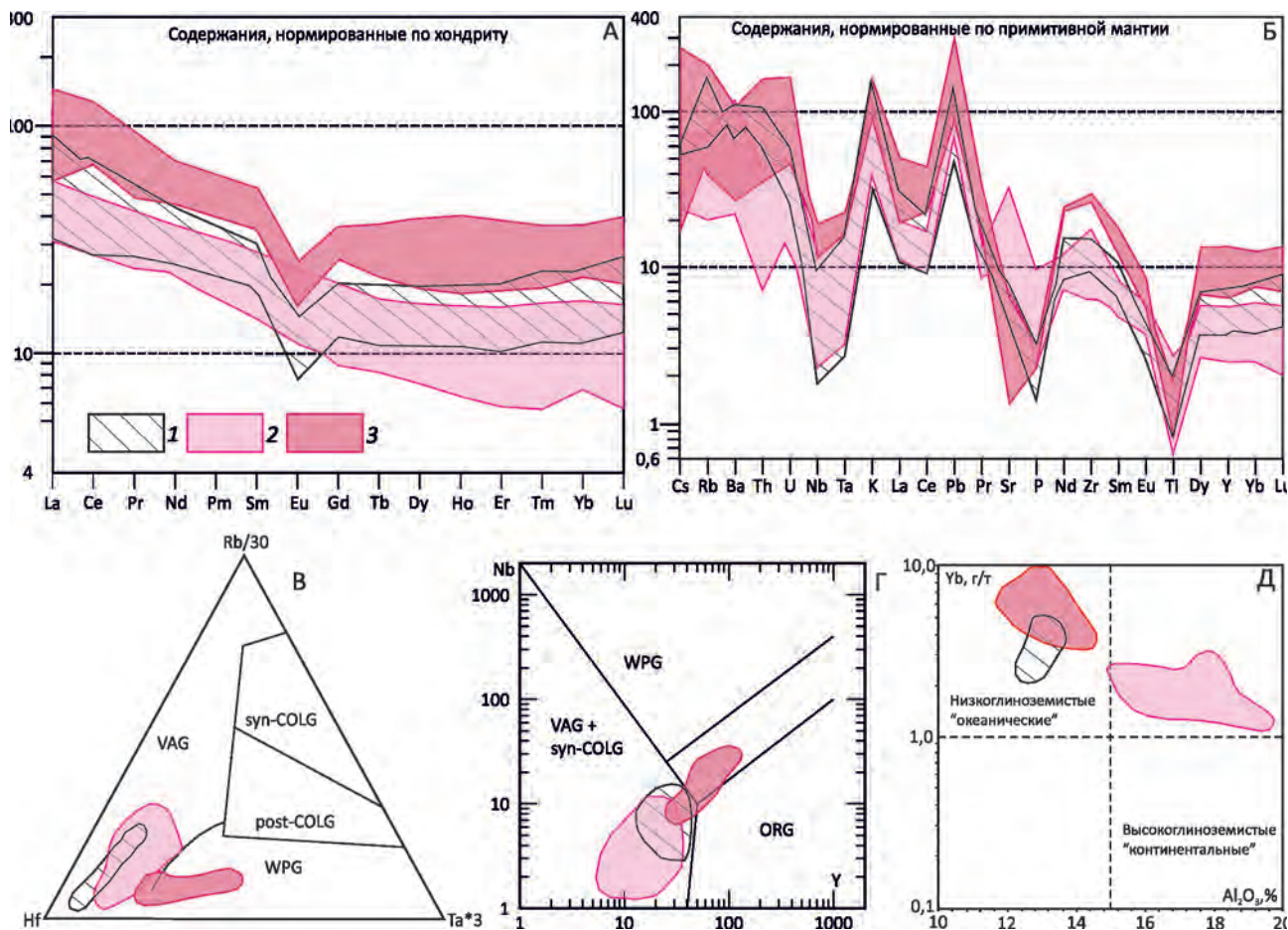


Рис. 5. Дискриминационные диаграммы, мультиэлементные и РЗЭ спектры распределения для гранитоидов майнского, таннуольского и арголикского комплексов:

А – спайдердиаграммы редкоземельных элементов; Б – мультиэлементные спайдердиаграммы; нормирование элементов по работе [17]; В – тройная диаграмма Н.Харриса [11]; Г – дискриминационная диаграмма Дж.Пирса [15]; Д – диаграммы Al₂O₃ – Yb [16]; поля гранитов: syn-COLG – синколлизийных, post-COLG – постколлизийных, WPG – внутриплитных, VAG – островодужных, ORG – океанических хребтов; гранитоидные комплексы: 1 – майнский, 2 – таннуольский, 3 – арголикский

спектры для базальтоидов ирбитейской свиты согласуются со спектрами серлигских базальтоидов. Отличие заключается в амплитуде положительных и отрицательных аномалий, которые для ирбитейских базальтоидов значительно ниже. На дискриминационных диаграммах фигуративные точки базальтоидов ирбитейской свиты попадают в поля толеитовых и известково-щелочных базальтов островных дуг (см. рис. 4).

Аккреционно-коллизийная ассоциация пород. Породы таннуольского комплекса представлены габбро, габбродиоритами, диоритами первой фазы и кварцевыми диоритами, тоналитами, гранодиоритами, плагиогранитами второй фазы. Породы первой фазы нередко обладают признаками гибридного происхождения, породные разновидности второй фазы связаны друг с другом постепенными переходами.

Петрохимический состав пород таннуольского комплекса характеризуется широким диапазоном содержания SiO₂ (48–72%) и общей щелочности (3–7,5%), преобладанием натрия над калием при высоких содержаниях кальция (3–10%). Гранитоиды таннуольского комплекса по петрохимическому составу в большинстве своем отвечают нормальнощелочным преимущественно натриевым породам. Таннуольские гранитоиды относятся к магнезиальному типу FeOt/(FeOt+MgO)=0,5–0,8 известковой и известково-щелочной сериям. По содержанию редкоземельных элементов и нормированным по хондриту спектрам их распределения они характеризуются преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми и наличием в отдельных пробах отрицательного минимума по европию при общем низком содержании редкоземельных элементов.

На мультиэлементных спектрах для таннуольских гранитов отмечаются положительные аномалии по K, Sr и Pb, отрицательные аномалии по Ta и Nb, La и Ce, минимумы по P и Ti (см. рис. 5).

Тантал-ниобиевая аномалия, вероятно, унаследованная от базитовых источников, максимумы по Sr и Pb позволяют предполагать, что родоначальные для пород таннуольского комплекса магмы образовались при плавлении метабазитового субстрата с добавлением древнего корового материала в область магмогенерации. На дискриминационных диаграммах фигуративные точки пород таннуольского комплекса попадают в поля пород островных дуг и коллизионных обстановок (см. рис. 5).

Для гранитоидов таннуольского комплекса в пределах западной части Восточно-Таннуольский рудного района известна одна $510 \pm 6,3$ [2] U-Pb датировка по циркону и вновь получено четыре. Для роговообманковых диоритов первой фазы (образцы 77 и 2168-2) получены значения возраста U-Pb методом – $496 \pm 4,9$ и $492,2 \pm 5,5$ млн. лет. Для плагиогранитов второй фазы (образцы 2012-2 и 2025-1) – 505 ± 3 и $507,8 \pm 6,4$ млн. лет. Таким образом, по геохронологическим данным время формирования пород таннуольского комплекса ограничивается интервалом 510–492 млн. лет.

Арголикский комплекс представлен двуполевошпатовыми, аляскитовыми гранитами, лейкократовыми мелкозернистыми гранитами и гранит-порфирами, которые слагают небольшие, нередко сближенные тела и группы тел. Массивы приурочены к синхронным по возрасту тектоническим зонам субширотного и северо-восточного направлений. Все массивы комплекса, в отличие от массивов таннуольского комплекса, имеют однородный состав и простое строение. Массивы арголикского комплекса прорывают раннекембрийские вулканогенно-осадочные породы, поздне-среднекембрийские гранитоиды таннуольского комплекса и ордовикские вулканы деспенской толщи с возрастом $453,1 \pm 3,2$ млн. лет (см. табл. 3).

По петрогеохимическому составу гранитоиды арголикского комплекса относятся к породам известково-щелочного ряда повышенной калиевоности. В ряду от гранодиоритов к лейкогранитам отмечается закономерное возрастание содержаний $K_2O + Na_2O$ (6,5–8,5%), главным образом, за счет увеличения содержаний калия ($K_2O = 2–5\%$) (см. рис. 3). Содержания натрия в породах, в отличие от калия, варьируют незначительно и уменьшаются по мере увеличения кремнекислотности от 5 до 2,5%. При этом натрий преобладает над калием и лишь в наиболее кислых разностях иногда отмечаются обратные соотношения. Арголикские гранитоиды относятся к железистому типу $FeOt/(FeOt+MgO) = 0,8–1,0$ щелочно-известковой и известково-щелочной сериям.

По содержанию редкоземельных элементов и нормированным по хондриту спектрам их распределения они характеризуются преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми и наличием отрицательного минимума по

европию. Умеренно повышенное значение $(La/Yb)_N$ в сочетании с небольшой отрицательной «европиевой аномалией» характерно для гранитоидов, образующихся за счет коровых сиалических источников. На мультиэлементных спектрах для арголикских гранитов отмечаются положительные аномалии по K и Pb, слабые отрицательные аномалии по Ta и Nb, La и Ce на фоне общего обогащения высокочargedными элементами, ярко выраженные минимумы по Sr, P и Ti. На дискриминационных диаграммах фигуративные точки пород арголикского комплекса попадают преимущественно в поля внутриплитных и коллизионных гранитоидов (см. рис. 5).

Изотопное датирование пород арголикского комплекса проведено U-Pb методом (SHRIMP II) по лейкократовым гранитам Кызылдагского массива (обр. 2226-1) и гранитам Биче-Серлигского массива (обр. 2422). Для образца 2226-1 по 10 зернам получен конкордантный возраст 451 ± 4 млн. лет. Учитывая магматическую природу цирконов, эта изотопная дата принимается авторами за возраст кристаллизации пород арголикского комплекса. Близкий изотопный возраст получен и по биотит-роговообманковым гранитам (обр. 2422) – 447 ± 2 млн. лет. Кроме того, продатирована вновь выделенная по комплексу геологических, изотопно-геохронологических и геохимических данных деспенская вулканогенная толща, которая прорывается лейкогранитами Кызылдагского массива. Конкордантный возраст риодацитов деспенской толщи, определенный по 10 зернам цирконов, составил $453,1 \pm 3,2$ млн. лет (см. табл. 3).

Закономерности размещения полезных ископаемых. Восточно-Таннуольский рудный район расположен на западе Таннуольско-Улугуйской металлогенической зоны (см. рис. 1). С запада и с севера он граничит с Центрально-Тувинской минерагенической зоной, приуроченной к структурам Центрально-Тувинского прогиба, которая характеризуется преобладанием полезных ископаемых осадочного генезиса (см. рис. 2). Здесь установлены месторождения каменного угля коксующихся марок (Актальский и Онкажинский угленосные районы), урана (Южно-Тувинский ураноносный район), галита и гипса (Дус-Дагский соленосный район). С этапом девонской и мезозойской тектономагматической активизации связано формирование медно-никель-кобальт-арсенидного оруденения Баян-Хольского рудного района, где выявлено крупное, в настоящее время отработанное, Хову-Аксинское месторождение и ряд более мелких объектов.

Восточно-Таннуольский рудный район, как и вся Таннуольско-Улугуйская минерагеническая зона, характеризуется преобладанием оруденения, связанного с магматическими комплексами. В пределах западной части ВТРП распространены поисковые признаки золотого, золотосодержащего полиметаллического (Cu, Pb, Zn, Au, Ag), медного, железного и молибденового оруденения (см. рис. 2). Проведенный авторами

комплексный анализ геологических, геофизических и геохимических данных в пределах ВТРП позволил обосновать выделение прогнозируемых Ирбитейского полиметаллического, однотипных Элегест-Межегейского, Аптаринского и Шивилигского золоторудных узлов, а также медно-молибденового Улуг-Сайлыгского и молибден-медного Ак-Чиринского рудных полей.

Ирбитейский прогнозируемый золото-серебро-полиметаллический узел (II.1.2) расположен в юго-западной части Восточно-Таннуольского района (см. рис. 2). Он выделен на основе результатов геолого-съёмочных и тематических работ геологов Тувинской геологоразведочной экспедиции (В.И.Лебедев, В.Н.Чучко, С.А.Яровой и др.), научно-исследовательских работ [1, 6, 7] и вновь полученных авторами настоящей публикации данных.

Поисковые признаки полиметаллической минерализации (Cu, Pb, Zn) приурочены к раннекембрийским вулканогенно-осадочным породам серлигской и ирбитейской свит, которые прослеживаются в юго-западной части ВТРП в виде полосы северо-восточного простирания на протяжении 40 км при ширине 5–10 км (рис. 6). Наиболее широко рудопродуктивные раннекембрийские вулканы представлены в составе серлигской свиты. Среди них преобладают андезиты, дациты, риодациты, туфы кислого и смешанного составов, менее распространены базальты, риолиты, туфы основного и среднего составов, туффиты. Осадочные породы – известняки, песчаники, алевролиты, часто с примесью туфового материала, слагают прослои, линзы среди вулкаников. В выше залегающей ирбитейской свите количество вулкаников уменьшается.

Полиметаллическая минерализация приурочена к вулканикам, преимущественно среднего и кислого составов серлигской свиты, реже – к породам ирбитейской свиты. Наиболее изученным объектом является проявление цинка, меди и свинца Подперевальное, выявленное по результатам ГСР-50 в 1969 г. (В.И.Лебедев и др.). Оно расположено в верховьях р. Холу (см. рис. 6). Проведенные здесь позднее С.А.Яровым с коллегами геохимические работы позволили на площади 14×3 км выявить участки хлоритовых и кварц-серицитовых метасоматитов протяженностью первые километры и шириной выхода на дневной поверхности от десятков до первых сотен метров. К полю распространения метасоматитов приурочены вторичные ореолы размером до 1×2 км и потоки рассеяния цинка (0,015–0,5%), свинца (0,005–0,2%), бария (0,05–0,5%), меди (0,01–0,5%), марганца (0,01–0,6%), серебра, кадмия, сульфат-иона и золота. Заверка одного из таких ореолов единичными канавами и шурфами позволила установить среди кварц-серицитовых метасоматитов с линзами вторичных кварцитов потенциально рудные зоны с большим количеством пирита (5–20%), сфалерита (1–7%), халькопирита (0,5–5%) и галенита (0,5–3%). Для одной из таких зон в канавах установлены три рудных пересечения с содержанием суммы металлов (Zn+Pb+Cu) около 3,5%

на 2,5 м; около 9% на 7 м и 5% на 20 м. Содержания серебра достигали 131 г/т, а золота – 0,55 г/т. На участках развития сульфидной минерализации отмечается высокая интенсивность аномалии вызванной поляризации (до 5–8%). По геофизическим данным потенциальные полиметаллические рудные зоны предположительно прослеживаются до глубины 300 м.

В процессе проведенных работ авторами установлены поисковые признаки золотосодержащей полиметаллической минерализации северо-восточнее и юго-западнее проявления Подперевальное, во всем поле развития пород серлигской и ирбитейской свит. Выявлены участки развития кварц-серицитовых метасоматитов, вторичных кварцитов и сульфидной минерализации. Наибольшим распространением в зонах сульфидизации пользуются пирит, халькопирит, сфалерит, галенит. Проведенное штучное и бороздвое опробование позволило выявить первичные геохимические аномалии с содержанием (в %): меди 0,1–14,2, свинца 0,01–0,13, цинка 0,1–0,84, бария до >2, а серебра 1–126,6 г/т и золота 0,1–1,6 г/т в пределах Ирбитейского прогнозируемого узла. В аллювиальных отложениях рек Дувилиг, Диргиш, Правый Тэли и др. авторами установлены шлиховые потоки и отдельные шлиховые пробы с баритом, золотом, галенитом, малахитом, anomalно высоким содержанием пирита.

По подавляющему большинству геолого-структурных, геологических, минералогических и геохимических критериев оруденение Ирбитейского прогнозируемого узла подобно оруденению Кызыл-Таштыгского (Туматтайгинского) полиметаллического узла в северо-восточной части Таннуольско-Улугойской металлогенической зоны. Здесь известно крупное по запасам Кызыл-Таштыгское месторождение и несколько недоизученных объектов – Кызыл-Ташское, Улуг-Ойское и другие проявления. Проведенные авторами работы и ранее полученные данные позволили оценить прогнозные ресурсы Ирбитейского узла категории P₃ и апробировать их на НТС ФГБУ ВСЕГЕИ для Zn – 1,2 млн. т, Pb – 0,182 млн. т, Cu – 0,124 млн. т и Ag – около 2 тыс. т.

В южной части Восточно-Таннуольского района авторы выделили *Аптаринский золоторудный прогнозируемый узел* (II.1.3) (см. рис. 2). Он приурочен к юго-восточному контакту Восточно-Таннуольского массива таннуольского комплекса и мелким массивам-сателлитам, прорывающим породы серлигской и ирбитейской свит. Для данного узла установлено наличие потенциально промышленного оруденения золотосульфидно-кварцевой формации жильного и жильно-прожилкового (штокверкового) типов (рис. 7). Поисковые признаки золотой минерализации прослеживаются в полосе, вытянутой вдоль зоны эндо- и экзоконтакта Восточно-Таннуольского массива в северо-восточном направлении шириной около 6–14 км и длиной 44 км.

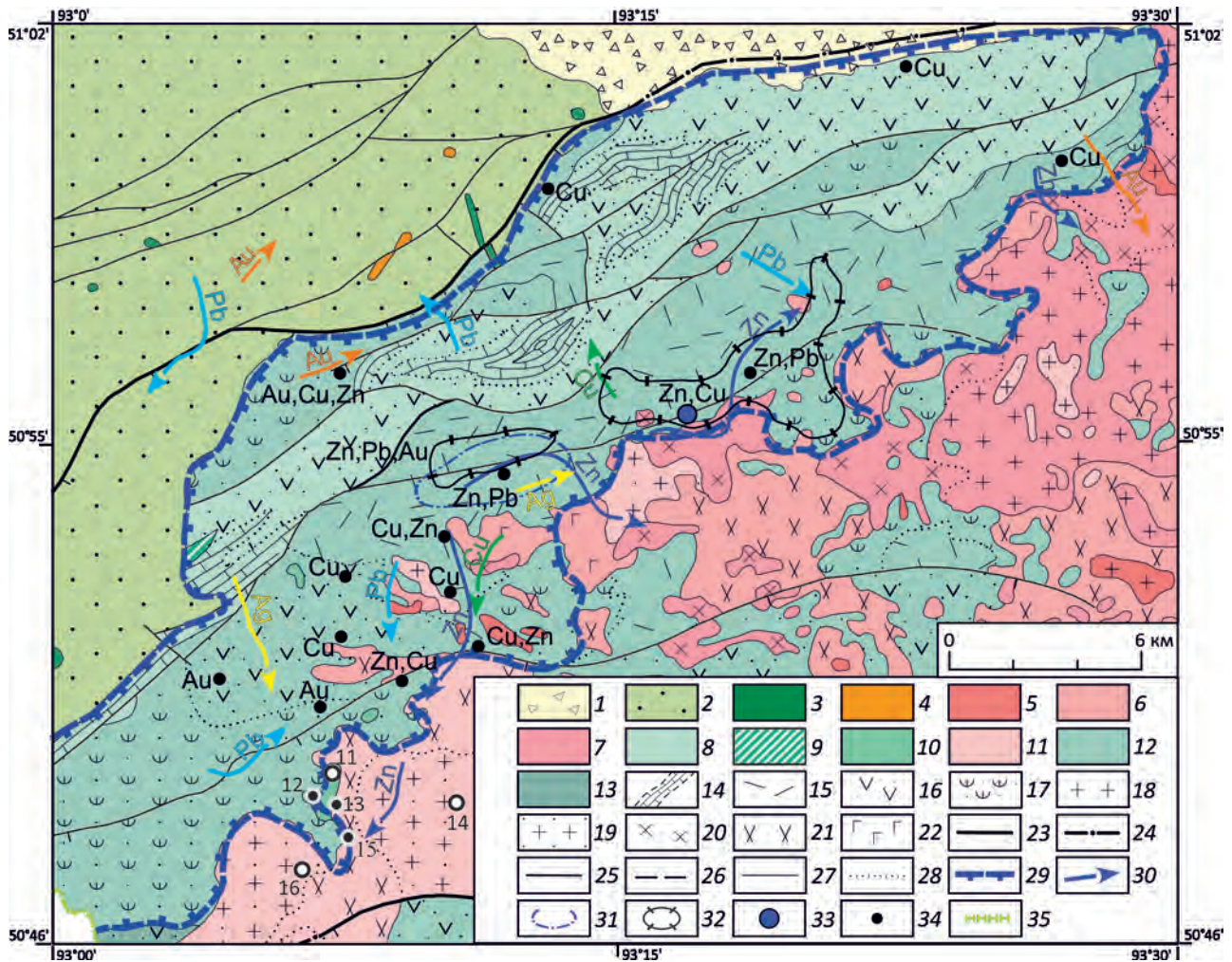


Рис. 6 Геолого-поисковая схема Ирбитейского прогнозируемого золото-серебро-полиметаллического рудного узла:

1 – четвертичные отложения (Q); 2 – ордовикско-девонские терригенные и терригенно-карбонатные отложения Центрально-Тувинского прогиба (O₃–D₃); 3–4 – породы торгалыгского сиенит-габбрового комплекса (D₃–C₁): 3 – основного и 4 – щелочного составов; 5 – породы арголикского гранодиорит-гранитового комплекса (O); 6–7 – породы таннуольского габбродиорит-гранодиорит-плагиигранитового комплекса (Є₂₋₃): 6 – габбродиориты и диориты первой фазы, 7 – кварцевые диориты, гранодиориты и плагииграниты второй фазы; 8–9 – вулканогенно-осадочные породы ирбитейской свиты (Є₁): 8 – базальты, туфы среднего состава, прослои известняков и туфитов, 9 – силлы базальтовых порфиритов и габбродиабазов; 10–11 – породы майнского габбро-плагиигранитового комплекса (Є₁): 10 – габброиды первой фазы, 11 – плагииграниты второй фазы; 12 – риолиты, риодациты, андезиты, базальты, туфы среднего, реже кислого и основного составов, туфопесчаники серлигской свиты (Є₁); 13 – туфы и базальты кадвойской свиты (Є₁); 14 – рифогенные известняки; 15 – лавы кислого состава; 16 – туфы среднего состава; 17 – туфопесчаники; 18 – граниты; 19 – гранит-порфиры; 20 – гранодиориты; 21 – диориты, кварцевые диориты; 22 – габбро; 23–26 – разрывные нарушения: 23 – главные установленные, 24 – главные предполагаемые, 25 – второстепенные установленные, 26 – второстепенные предполагаемые; 27–28 – геологические границы: 27 – между разновозрастными подразделениями, 28 – литофациальные и интрузивных фаций; 29 – контуры Ирбитейского рудного узла; 30 – литохимические потоки рассеяния в донных отложениях Zn, Pb, Cu, Ag, Au; 31 – первичный литохимический ореол Cu, Zn, Pb, Au; 32 – аномалия вызванной поляризации по изолинии 2%; 33 – проявление Cu, Pb, Zn Подперевальное; 34 – пункты минерализации полезных ископаемых; 35 – Российско-Монгольская государственная граница

Специализированные поисковые работы на золото на площади Аптаринского узла проводились только в его южной части сотрудниками АО «СНИИГГиМС» в 2012–2014 гг. В результате выявлено Деспенское

золоторудное поле с типичным для Восточно-Таннуольского района золотосульфидно-кварцевым оруденением, наложенным на магнетитсодержащие скарны [1, 7]. Деспенское золоторудное поле (11 км²)

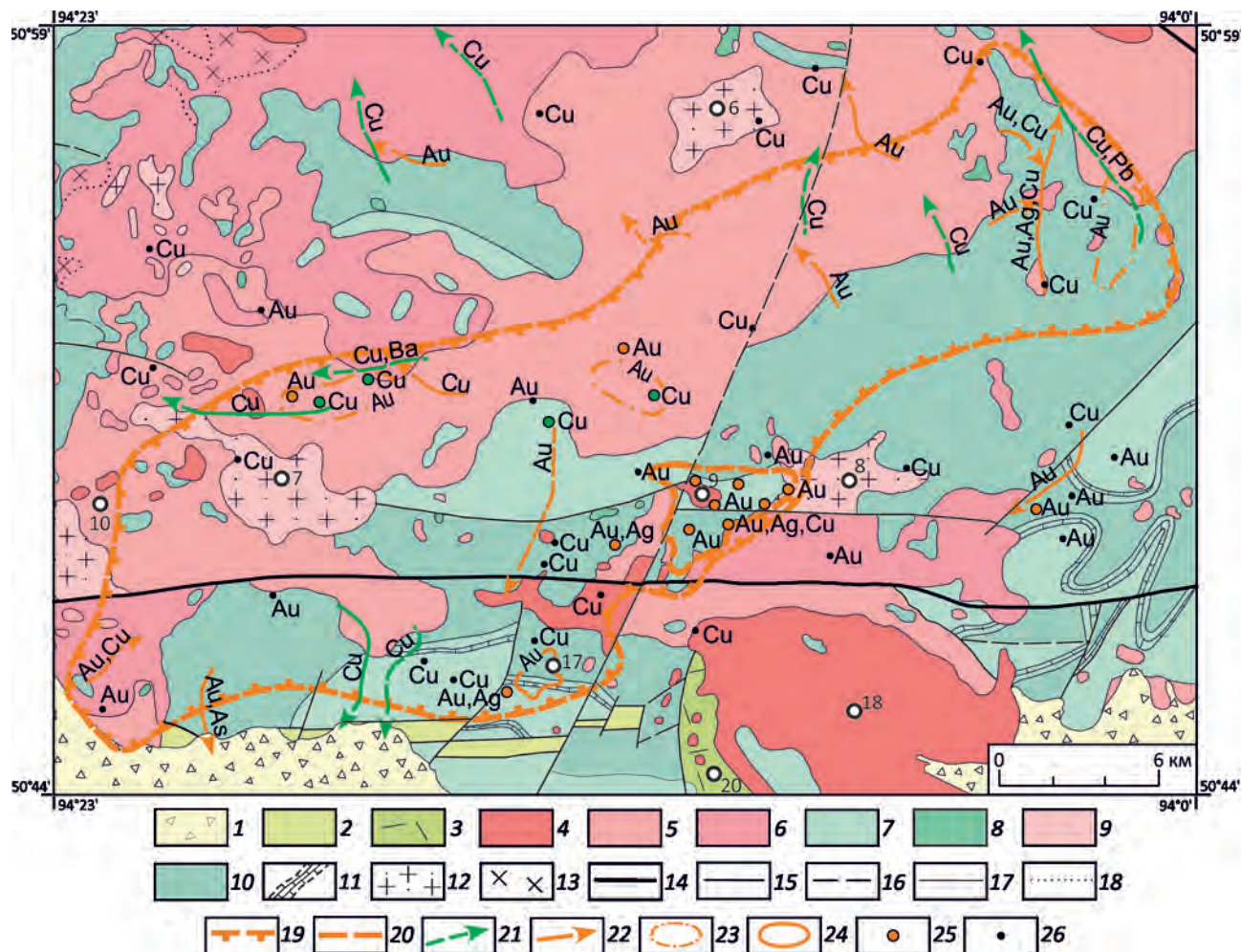


Рис. 7. Геолого-поисковая схема Аптаринского прогнозируемого золоторудного узла:

1–2 – отложения: 1 – четвертичные (Q), 2 – ордовикско-силурийские терригенные и терригенно-карбонатные (O_3-S_2); 3–6 – породы: 3 – деспенской андезит-риодацитов толщи (O_3), 4 – арголикского гранодиорит-гранитового комплекса (O), 5–6 – таннуольского габбродиорит-гранодиорит-плагиигранитового комплекса (ϵ_{2-3}): 5 – диориты первой фазы, 6 – гранодиориты и плагииграниты второй фазы; 7 – базальты, андезиты и их туфы, туффиты и рифогенные известняки ирбитейской свиты (ϵ_1); 8–9 – породы майнского габбро-плагиигранитового комплекса (ϵ_1): 8 – габброиды первой фазы, 9 – гранит-порфиры и мелкозернистые плагииграниты второй фазы; 10 – андезиты, базальты, риодациты, риолиты, туфы, туффиты, глинистые известняки серлигской свиты (ϵ_1); 11 – известняки; 12 – гранит-порфиры; 13 – гранодиориты; 14–16 – разрывные нарушения: 14 – главные установленные, 15 – второстепенные установленные, 16 – второстепенные предполагаемые; 17–18 – геологические границы: 17 – между разновозрастными подразделениями, 18 – литофациальные и интрузивных фаций; 19 – контуры Аптаринского прогнозируемого золоторудного узла; 20 – контуры Деспенского золоторудного поля; 21 – шлиховые потоки халькопирита и малахита (Cu), галенита (Pb), барита (Ba), золота (Au); 22 – литохимические потоки рассеяния Au, As, Cu; 23 – первичные литохимические ореолы Au; 24 – вторичные литохимические ореолы Au; 25 – проявления Au, Ag, Cu; 26 – пункты минерализации Au, Cu

приурочено к провисам кровли Восточно-Таннуольского, Биче-Серлигского и Деспенского массивов в зоне пересечения крупных разломов северо-восточного (Биче-Сайлыгского) и субширотного (Южно-Таннуольская тектоническая зона) направлений (см. рис. 7).

В пределах Деспенского золоторудного поля по результатам горных, буровых и маршрутных работ уста-

новлены многочисленные проявления и пункты минерализации золота, железа и меди. Выделяется золотая минерализация двух типов – золотоскарновая и золото-сульфидно-кварцевая. Содержание золота в скарнированных породах и скарнах варьирует на уровне 0,01–0,1 г/т. Повышение содержания золота в скарнах до 2–7 г/т, иногда до 86 г/т, отмечается на участках наложенного прожилкового окварцевания и сульфидизации.

Сульфиды представлены преимущественно халькопиритом и борнитом. Золотосульфидно-кварцевая минерализация накладывается на все типы пород – вулканиды, известняки, скарны, диориты и др. По результатам изучения борздовых и керновых проб атомно-абсорбционным и пробирным анализами установлены минерализованные зоны, прослеженные на 1–2 км при средней мощности 8–32 м и среднем содержании золота от 0,2 до 3,2 г/т. В пределах минерализованных зон породы интенсивно окварцованы и сульфидизированы, характерно наличие многочисленных мелких, часто субпараллельных, сульфидно-кварцевых прожилков, реже крупных сульфидно-кварцевых жил. Внутри минерализованных зон выявлены рудные сечения мощностью от 1 до 19,6 м со средним содержанием золота от 2 до 7,4 г/т. По Деспенскому золоторудному полю ФГУП ЦНИГРИ апробированы прогнозные ресурсы золота категории P_2 42,3 т до глубины 100 м и при среднем содержании золота в рудных интервалах более 2 г/т [6].

В пределах всего Аптаринского узла прослеживаются поисковые признаки золотой минерализации, аналогичные выявленной на Деспенском золоторудном поле. В экзоконтактной части Восточно-Тануольского и Биче-Серлигского массива известны находки скарнированных пород с кварц-сульфидной минерализацией и не изученной золотоносностью. Кварцевые жилы образуют одиночные тела, линзы или серии жил мощностью обычно от 0,5 до 1,5 м, в единичных случаях до 9 м. В большей степени жилы распространены в поле интрузивных пород. К участкам повышенной дислоцированности, преимущественно раннекембрийских вулканогенно-осадочных пород, приурочены штокверковые зоны шириной 7–80 м, сложенные маломощными (1–10 см) кварцевыми прожилками. Иногда в штокверках выделяются ствольные жилы мощностью до 1 м, однако потенциально золотоносными являются все породы, насыщенные кварцевыми прожилками.

Кроме кварца в жилах и прожилках встречаются эпидот, хлорит, альбит и анкерит. Рудные минералы – пирит, халькопирит, борнит, халькозин, магнетит, гематит содержатся в переменных количествах, как правило, на уровне 1–5%. Распределение сульфидов в жилах гнездово-вкрапленное, на отдельных участках их количество может достигать 15–25%. Выделяются жилы с преобладанием пирита или халькопирита. Как правило, в жилах с преобладающей халькопиритовой и борнитовой минерализацией содержание золота более высокое и выдержанное. С поверхности в сульфидсодержащих жилах развиты лимонит, малахит, хризокolla, азурит, гетит, гидрогетит.

На водоразделе рек Чайлыг-Хем и Хошуктыг, на площади около 5,4 км², установлено широкое развитие кварцевых жил и прожилков как с пиритовой, так и с халькопиритовой минерализацией. Большая часть обнаруженных жил приурочена к контакту пород таннуольского комплекса и вулканогенных пород, слагающих

небольшие фрагменты (0,5×1 км) в провисах кровли Восточно-Таннуольского массива. Содержания золота в кварцевых жилах меняются в значительных пределах и, вероятно, отражают его крайне неравномерное распределение. В отдельных жилах авторы определили содержания золота до 1,55 г/т. На одном из участков установлена штокверковая зона с сульфидно-кварцевыми прожилками шириной выхода на поверхности около 120 м. В кварцевых жилах штокверка встречаются халькопирит, гетит, азурит и малахит.

В юго-восточной части территории листа М-46-Х авторы выделили *Шивилигский прогнозируемый золоторудный узел* (II.1.4), большая часть площади которого находится восточнее – на территории планшета М-46-ХI (см. рис. 2). Шивилигский узел аналогичен по строению и типу оруденения Аптаринскому. В междуречье Сувактыг и Онгеш по результатам поисковых работ на Деспенской площади выявлено несколько проявлений золота, приуроченных к кварцевым жилам и скарнированным породам в экзоконтактных зонах небольших массивов таннуольского комплекса. Наиболее изученным является выделенное у западной границы планшета М-46-ХI Овур-Онгешское золоторудное поле с преобладающим жильным золотосульфидно-кварцевым оруденением. В результате поисковых работ по Овур-Онгешскому золоторудному полю оценены прогнозные ресурсы золота в авторском варианте P_2 около 22 т [6].

В северной части Восточно-Таннуольского рудного района в междуречье Кызыл-Эрик и Чумуртук расположен западный фланг *Элегест-Межегейского золоторудно-россыпного узла* (II.1.1) (см. рис. 2). Здесь известно мелкое россыпное месторождение золота в долине р. Кызыл-Эрик и ее правого притока руч. Джаралыг и многочисленные пункты минерализации золота, меди и железа в кварцевых жилах и скарнированных породах. Восточнее на территории планшета М-46-ХI в центральной и восточной частях Элегест-Межегейского узла в данный момент ведутся поисковые работы на Ургайлыгской площади. В 1950–1960 гг. здесь были выявлены проявления золота в кварцевых жилах и прожилках – Ургайлыг-1, Ургайлыг-2 и Адырское. В ходе текущих поисковых работ сотрудниками АО «СНИИГГиМС» дополнительно установлено несколько жильных проявлений с золотом и новый тип золотой минерализации – метасоматиты лиственит-березитового типа с кварцевыми прожилками.

Таннуольско-Улугойская зона рассматривается авторами как одна из наиболее перспективных в Алтае-Саянской минерагенической провинции на золото-содержащее молибден-медно-порфировое оруденение. В ее северо-восточной и центральной частях известны крупное Ак-Сугское месторождение, Кызык-Чадрское и ряд других проявлений. В северо-западной части Восточно-Таннуольского района авторы выделили *Улуг-Сайлыгское прогнозируемое медно-молибденовое рудное поле* (II.1.0.1) (см. рис. 2), сложенное породами

второй фазы таннуольского комплекса, которые прорываются небольшим телом гранитов арголигского комплекса. В кровлях интрузий присутствуют останцы вулканогенно-осадочных пород серлигской свиты. Широко распространены разновозрастные дайки кислого состава.

Ранее в северной части Улуг-Сайлыгского поля при проведении геохимических работ С.А.Яровым с коллегами был выявлен контрастный аномальный поток рассеяния молибдена (0,0005–0,002%), вольфрама (0,0006–0,001%) и литохимический вторичный ореол рассеяния молибдена с содержанием 0,0005–0,005%, в эпицентре до 0,012%. Авторами в районе вторичного ореола Мо маршрутными работами выявлены и прослежены зоны калишпатизации и пиритизированные кварц-биотит-альбитовые метасоматиты, развитые как по гранитоидам, так и по вулканитам. Среди гранитоидов и метасоматитов обнаружены многочисленные сульфидно-кварцевые прожилки, в которых, как и в гранитах таннуольского комплекса, установлена вкрапленность молибденита и халькопирита. По данным количественного спектрального анализа штучных проб определены содержания Мо от 0,002–0,006 до >0,05% и Си от 0,012 до 0,028%, в единичных случаях до 0,37%.

В юго-западной части Восточно-Таннуольского района выделено *Ак-Чаринское прогнозируемое золото-медно-порфиоровое рудное поле* (см. рис. 2). Наиболее крупное Ак-Чаринское проявление меди и золота приурочено к небольшому гранитному массиву, предположительно второй фазы таннуольского комплекса, прорывающему вулканиты серлигской свиты и перекрытому в южной части кайнозойскими отложениями. Массив гранитов вытянут в субмеридиональном направлении. В его центральной части находится зона дробления и гидротермальной проработки шириной 50–150 м и протяженностью более 2 км, насыщенная кварцевыми прожилками. В пределах зоны распространена вкрапленная пиритовая и халькопиритовая минерализация. По данным геохимических работ С.А.Ярового (1990) минерализованная зона трассируется вторичными ореолами меди (0,01–0,3%), молибдена (до 0,0004%), цинка (0,01–0,04%), серебра. По результатам опробования на разных участках зоны установлено содержание меди 0,03–0,6%, максимально до 4,5%, молибдена до 0,008%, золота 0,06–0,15 г/т (в отдельных пробах до 1,17 г/т). По результатам пунктирно-бороздового опробования вкост простирания зоны установлен интервал длиной 127 м со средним содержанием меди 0,44%, золота – 0,2 г/т.

Обсуждение результатов. Территория Республики Тыва характеризуется наиболее слабой средне- и крупномасштабной геологической и поисковой изученностью среди всех складчатых регионов Южной Сибири. Поисково-оценочные работы на полиметаллические руды в Тыве велись в небольшом объеме только в северо-восточной части Таннуольско-Улугуйской зоны

(район Кызыл-Таштыгского месторождения). При этом в пределах всей металлогенической зоны известны многочисленные проявления полиметаллической минерализации. Предполагается, что полиметаллическое оруденение в Восточно-Таннуольском рудном районе генетически связано с поствулканической гидротермальной деятельностью при формировании островодужных вулканитов серлигской и ирбитейской свит, аналогичных по составу и условиям формирования вулканитам туматтайгинской свиты – рудовмещающей для Кызыл-Таштыгского месторождения.

Возраст полиметаллического оруденения по геологическим и изотопно-геохронологическим данным определяется возрастом вулканитов серлигской и ирбитейской свит. Верхняя граница возраста пород серлигской свиты ограничивается возрастом прорывающих их интрузий майнского комплекса на уровне 518–539 млн. лет, а вулканитов ирбитейской свиты – прорывающих их массивов таннуольского комплекса на уровне 505–510 млн. лет. То есть можно предположить, что формирование полиметаллического оруденения происходило в период 510–540 млн. лет.

Авторы предполагают, что образование золотого оруденения Восточно-Таннуольского рудного района связано с интрузивными комплексами. Проведенные исследования, с учетом ранее полученных данных [3–5], позволили выделить два этапа интрузивного магматизма, отражающих их формирование в двух геодинамических режимах – раннекембрийском островодужном (майнский комплекс) и позднекембрийско-ордовикском аккреционно-коллизийном (таннуольский комплекс). С габброидами и плагиогранитами островодужного этапа связаны зоны скарнированных пород, роговиков и в незначительном объеме кварцевые жилы с золотосульфидной минерализацией. Возраст первого этапа формирования золотого оруденения определяется возрастом интрузивных пород островодужной ассоциации, то есть на уровне 518–539 млн. лет.

Второй этап образования скарнов, кварцевых жил, жильно-прожилковых зон связан с породами позднекембрийского таннуольского комплекса. Большая масштабность рудообразующих процессов этого этапа определяется, с одной стороны, большими объемами проявленного магматизма, а с другой – большей пронцаемостью интенсивно дислоцированных в аккреционно-коллизийных условиях островодужных вулканогенных и интрузивных комплексов. Кроме того, рудная минерализация первого этапа, вероятно, перераспределялась и концентрировалась в позднекембрийское время.

На основе имеющихся данных можно предположить, что формирование скарнированных пород связано преимущественно с габбродиоритами, диоритами, кварцевыми диоритами первой фазы таннуольского комплекса. Это определяется тесной пространственной ассоциацией скарнов с массивами диоритового и

габбродииоритового составов. Для скарнов этого этапа характерно присутствие магнетита, вплоть до формирования небольших линз сливных магнетитовых руд. Возраст диоритов первой фазы по изотопно-геохронологическим данным составляет 492–496 млн. лет. Однако по многочисленным геологическим данным [3–5, 7 и др.] породы первой фазы прорываются и преобразовываются породами второй фазы с возрастом 505–510 млн. лет. Можно предположить, что возраст пород первой фазы таннуольского комплекса составляет 510–515 млн. лет, а наблюдаемое «омоложение» дат пород первой фазы связано с термальным воздействием пород второй фазы.

Формирование кварцевых жил связывается с гидротермальной деятельностью при образовании гранодиоритов и плагиогранитов второй фазы таннуольского комплекса и оценивается на уровне 505–510 млн. лет. Косвенным подтверждением этого вывода является тот факт, что все известные кварцевые жилы с золотом локализируются в кембрийских породах. Среди более молодых ордовикских и девонских пород золотосульфидно-кварцевых жил пока неизвестно. Кроме того, в пределах Деспенского золоторудного поля установлено, что золотоносные скарны с золотосульфидно-кварцевыми прожилками (проявление Кварцевое) прорываются пострудным массивом гранитов арголикского комплекса с возрастом 447 млн. лет.

Концентрация сульфидно-кварцевых жил в пределах Восточно-Таннуольского рудного района наблюдается в юго-западной части – междуречье Ирбитей и Диргиш (Ирбитейский узел), в южной – верховья рек Апгара и Биче-Сайлыг и в восточной – верховья р. Унгеш (Аптаринский узел), а также в юго-восточной части – бассейн р. Сувактыг (Шивилигский узел). Возможно, большее количество кварцевых жил, по сравнению с северной частью хребта Восточный Танну-Ола, связано с лучшей изученностью южного склона, его относительно хорошей доступностью и обнаженностью.

Одним из новых важных результатов проведенных авторами работ стало выявление халькопирит-молибденитовой минерализации в кварцевых прожилках и гранитах второй фазы таннуольского комплекса и выделение Улуг-Сайлыгского прогнозируемого рудного поля. В сочетании с ранее известным Ак-Чаринским проявлением, неизученными пунктами минерализации Au, Cu, Mo в бассейне р. Кызыл-Эрик, в нижнем течении Холь-Ожу, Овур-Онгеш, находками молибденита в шлихах комплексных геохимических аномалий Cu и Mo Восточно-Таннуольский рудный район можно рассматривать перспективным в отношении поиска золотосодержащего молибден-медно-порфинового оруденения. Вероятность выявления месторождений молибден-медно-порфиновой формации в юго-западной части Таннуольско-Улугуйской металлогенической зоны подтверждается наличием в ее северо-восточной части крупного Ак-Сугского месторождения, Кызык-Ча-

дырского и других проявлений. Изучение молибденита Re-Os методом показало возраст Ак-Сугского месторождения на уровне 511 ± 2 – 518 ± 2 млн. лет [11]. Эти данные близки возрасту гранитоидов второй фазы таннуольского комплекса, которые рассматриваются как рудогенерирующие для молибден-медно-порфинового оруденения Кызык-Чадырского проявления [2]. Таким образом, исходя из аналогии с Ак-Сугским месторождением и Кызык-Чадырским проявлением и полученных авторами изотопно-геохронологических данных можно предположить связь молибден-медно-порфинового оруденения ВТРП с породами второй фазы таннуольского комплекса с возрастом 505–510 млн. лет.

В заключение отметим следующее. Западная часть Восточно-Таннуольского рудного района характеризуется широким распространением вулканогенных и интрузивных пород различных комплексов. На основе полученных геологических, геохимических и изотопно-геохронологических данных выделены три интрузивных комплекса, отличающихся возрастом, вещественным составом, металлогенией и геодинамическими условиями формирования. Наиболее древней является островодужная ассоциация пород с раннекембрийским возрастом вулканитов (древнее 508 млн. лет), габброидов и плагиогранитов (518–539 млн. лет). С вулканитами этого этапа связано формирование золотосодержащего полиметаллического оруденения, а с интрузивными – золотосульфидно-кварцевых жил и прожилков.

На ранней стадии аккреционно-коллизийного этапа развития региона происходило формирование пород первой фазы, предположительно с возрастом 510–515 млн. лет, и второй фазы таннуольского комплекса с возрастом 505–510 млн. лет. Со становлением масштабно проявленного интрузивного магматизма этой стадии связано формирование магнетитсодержащих скарнов и многочисленных жильно-прожилковых зон золотосульфидно-кварцевого оруденения. Исходя из имеющихся данных можно предположить, что с гранитоидами таннуольского комплекса связано образование золотосодержащей молибден-медно-порфиновой минерализации ВТРП. На поздней стадии аккреционно-коллизийного этапа формировались гранитоидные массивы арголикского комплекса (447–451 млн. лет), которые могли служить дополнительным фактором регенерации золотой и медной минерализации с ее концентрированием в пределах ранее сформированных рудных полей.

Анализ всех материалов позволил провести детальное металлогеническое районирование западной части Восточно-Таннуольского рудного района и выделить ряд перспективных таксонов: Ирбитейский (Cu, Pb, Zn, Au, Ag) и Аптаринский (Au) узлы, Деспенское (Au), Улуг-Сайлыгское (Mo, Cu) и Ак-Чаринское (Cu, Mo, Au) рудные поля. Апробированные (ФГБУ ВСЕГЕИ) прогнозные ресурсы категории P_3 составили: Аптаринского узла – Au 93 т, Ирбитейского узла – Zn 1,2 млн. т, Pb 0,182 млн. т, Cu 0,124 млн. т, Ag около 2 тыс. т.

В пределах Восточно-Таннуольского рудного района необходимо продолжение работ по составлению Госгеолкарты-200/2 в его центральной и восточной частях (листы М-46-ХІ, ХІІ). Для более детального изучения золотого, полиметаллического и молибден-медно-порфирового оруденения необходима постановка специализированных прогнозно-металлогенических работ с оценкой прогнозных ресурсов категорий P_2 и P_3 и выделением участков для поисковых работ. На основе полученных данных можно рекомендовать для проведения поисковых работ в пределах западной части ВТРР на цветные металлы участок Подперевальный (Ирбитейский узел), а на золото – участок в бассейне р. Хошуктыг (Аптаринский узел).

Авторы выражают благодарность Е.Д.Шабалинской, начальнику отдела геологии и лицензирования по Республике Тыва, за постоянную поддержку геологических работ в регионе, И.В.Арсентьевой и Е.А.Баженовой за техническую помощь в оформлении статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологическое строение и условия локализации золотого оруденения Деспенской площади Восточно-Таннуольского района (Республика Тыва) / А.И.Черных, А.Ю.Широбоков, М.В.Викторов и др. // Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири. Сб. тезисов 2-й науч.-практич. конференции. – Новосибирск, 2015. С. 204–206.
2. Гусев Н.И., Берзон Е.И., Семенов М.И. Кызыкчадрское меднопорфировое месторождение (Тува): геохимические особенности и возраст магматизма // Региональная геология и металлогения. 2014. № 59. С. 70–79.
3. Кахемский полихронный батолит (Восточная Тува): состав, возраст, источники и геодинамическая позиция / С.Н.Руднев, А.Г.Владимиров, В.А.Пономарчук и др. // Литосфера. 2006. № 2. С. 3–33.
4. Руднев С.Н. Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области и озерной зоны Западной Монголии. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
5. Тектономагматическая эволюция структурно-вещественных комплексов Таннуольской зоны Тувы в позднем венде–раннем кембрии / А.А.Монгуш, В.И.Лебедев, В.П.Ковач и др. // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 5. С. 649–665.
6. Черных А.И. Металлогения Восточно-Таннуольского рудного района Алтае-Саянской складчатой области (Республика Тыва) // Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири. Сб. тезисов 2-й науч.-практич. конференции. – Новосибирск, 2015. С. 202–204.
7. Черных А.И. Особенности распределения и перспективы освоения золотого оруденения Восточно-Таннуольского района, Республика Тыва // Руды и металлы. 2014. № 5. С. 10–18.
8. Cabanis B., Lecolle M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de mélange et / ou de contamination crustale // C.R.Acad.Sci.Ser.II. 1989. Vol. 309. Pp. 2023–2029.
9. Chernykh A.I. Gold Mineralization in the Eastern Tannu-Ola Ore District of the Altai-Sayan Folded Area (Russia) // The 14th quadrennial international association on the genesis of the ore deposits symposium. 2014. Kunming, China. Vol. 88 (supp. 2). Pp. 679–680.
10. Chernykh A.I. Eastern Tannu-Ola ore district of the Altai-Sayan folded area (Republic Tuva, Russia): the structural features and metallogeny // Electronic publishing 35 International Geological Congress. www.35igc.org. 2016.
11. Berzina A.N., Stein H.I., Zimmerman A., Sotnikov V.I. Re-Os ages for molybdenite from porphyry Cu-Mo and greizen Mo-W deposits of Southern Siberia (Russia): preserve metallogenic record // Mineral Exploration and Sustainable Development, Eliopoulos et al. (eds.). Rotterdam: Millpress. 2003. Pp. 231–234.
12. Harris N.B.W., Pearce J.A., Tindle A.G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism / M.P. Cowards, A.C. Ries (Eds.). Collisions tectonics. Geological Society. London, Special Publication. 1986. Vol. 19. Pp. 67–81.
13. Hawkins J.W. Petrology of back arc basins and island arcs: their possible role in the origin of ophiolites // Proc. Int. Ophiolite Symp. Nicosia. 1980. Pp. 244–254.
14. Pearce J.A. Trace element characteristics of lava from destructive plate boundaries. In: Thorpe RS (ed) Andesites. Wiley, Chichester. 1982. Pp. 525–548.
15. Pearce J.A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth CJ, Norry MJ (eds) Continental basalts and mantle xenoliths. Shiva, Nantwick. 1983. Pp. 230–249.
16. Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // J. Petrol. 1984. Vol. 25. Pp. 956–983.
17. Rapp R.P., Watson E.B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling // J. Petrol. 1995. Vol. 36. Pp. 891–931.
18. Sun S.-s., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Society. London, Special Publications. 1989. Vol. 42. Pp. 313–345.