

О ЮБИЛЕЙНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ГЕОХИМИИ»

А.А. Воронцов¹, М.И. Кузьмин¹, А.Б. Перепелов¹, В.С. Шацкий^{2,1}

¹ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского 1а, Россия

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

21—25 ноября 2022 г. Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук организовал и провел юбилейную Всероссийскую конференцию, посвященную 65-летию со дня своего основания и 105-летию со дня рождения его директора академика Льва Владимировича Таусона, руководившего институтом в период с 1961 по 1989 гг. На конференции были представлены результаты исследований, которые связаны с широким кругом вопросов современной геохимии, включая следующие направления: «Изотопно-геохимические исследования магматических, метаморфических и осадочных комплексов пород различных геодинамических обстановок»; «Геохимические исследования рудно-магматических систем и современные методы поисков и прогнозирования месторождений полезных ископаемых»; «Геохимия окружающей среды, геоэкология и палеоклимат»; «Экспериментальное и физико-химическое моделирование природных и техногенных процессов, физическое материаловедение»; «Современные аналитические методы исследований и информационные технологии в науках о Земле».

В вводной статье показана неразрывная связь творческого пути Льва Владимировича с развитием Института геохимии СО РАН и приведен обзор материалов, представленных на конференции и затрагивающих ряд проблем формирования геологических комплексов разной природы, включая оценку источников вещества, геодинамических условий их проявления и характеристику рудообразующих процессов.

Геологические комплексы, геохимия, геодинамика, рудообразование

MODERN LINES IN GEOCHEMISTRY: ANNIVERSARY CONFERENCE

А.А. Vorontsov, М.И. Kuzmin, А.Б. Perepelov, В.С. Shatsky

On 21–25 November, 2022, Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk), organized an All-Russian anniversary conference celebrating 65 years to the date of the Institute foundation and 105 years to the birth of its first director, Lev Vladimirovich Tauson, Full Member of the Russian Academy of Sciences. The results reported at the conference encompass a wide range of research fields in modern geochemistry, including isotope geochemistry of igneous, metamorphic, and sedimentary rocks in various geodynamic settings; chemistry of ore-magmatic systems and modern methods of mineral exploration; environmental geochemistry, geoecology, and paleoclimate; laboratory modeling and thermodynamic calculations of natural and production-related processes and materials; advanced analytical methods and information technologies for geosciences. The conference presentations pay tribute to Lev Tauson whose academic carrier, as well as all creative activity, had been closely related with the development of the Institute of Geochemistry. The preface paper provides a review of topics discussed at the conference concerning various geodynamic and geochemical problems, including sources of material, petrogenesis, and metallogeny.

Rock complexes, major- and trace-element chemistry, geodynamics, ore formation

Этот выпуск посвящен юбилейному событию, которое обозначило связь творческой деятельности академика Льва Владимировича Таусона с развитием геохимической науки в Сибири и созданием в г. Иркутске Института геохимии (постановление Президиума АН СССР № 794 от 29 ноября 1957 г.).

Лев Владимирович Таусон (27.10.1917—23.11.1989) совместно с А.П. Виноградовым принимал активное участие в организации Института геохимии и в период с 1961 по 1989 гг. являлся его бессменным директором [Летопись..., 2007]. Невозможно переоценить роль научного наследия Льва Владимировича, который большое значение уделял изучению распределения и форм нахождения химических элементов в различных геологических средах. Важное место в исследованиях Льва Владимировича занимали проблемы рассеяния и концентрирования редких, особенно рудных, элементов, стадийности рудообразующих процессов [Таусон..., 2007]. Эти наработки легли в основу первоначальной структуры Института геохимии, предусматривающей 7 подразделений: 1) лаборатория геохимии рудных процес-

сов; 2) лаборатория геохимии магматических процессов; 3) лаборатория геохимии изотопов; 4) лаборатория геохимии гипергенных процессов; 5) лаборатория геохимических методов поисков; 6) химико-аналитическая лаборатория; 7) лаборатория спектральных методов анализа. За период существования института эта структура неоднократно видоизменялась, появились новые направления и подразделения, изменились названия лабораторий, однако основная направленность работ не претерпела существенных изменений. Развитие научных направлений привело к появлению новых задач, связанных с характеристиками источников вещества геологических объектов и оценкой геодинамических условий их формирования на разных этапах эволюции Земли, палеоклиматическими реконструкциями и изучением антропогенного загрязнения. Совершенствовались методы изучения вещества и расширялась приборная база института.

21—25 ноября 2022 г. Институт геохимии СО РАН организовал и провел юбилейную Всероссийскую конференцию, посвященную 65-летию со дня своего основания и 105-летию со дня рождения академика Льва Владимировича Таусона. Программа конференции включала следующие направления: «Изотопно-геохимические исследования магматических, метаморфических и осадочных комплексов пород различных геодинамических обстановок»; «Геохимические исследования рудно-магматических систем и современные методы поисков и прогнозирования месторождений полезных ископаемых»; «Геохимия окружающей среды, геэкология и палеоклимат»; «Экспериментальное и физико-химическое моделирование природных и техногенных процессов, физическое материаловедение»; «Современные аналитические методы исследований и информационные технологии в науках о Земле». В работе конференции приняли участие более 250 ученых из 20 городов России и ближнего зарубежья (Апатиты, Архангельск, Баку, Владивосток, Екатеринбург, Иркутск, Казань, Красноярск, Магадан, Москва, Новосибирск, Санкт-Петербург, Сыктывкар, Ташкент, Томск, Улан-Батор, Улан-Удэ, Хабаровск, Чита, Якутск), заслушаны 101 устный доклад, 33 онлайн-доклада, представлены 22 стеновых доклада.

В настоящий спецвыпуск включена лишь часть статей, в которых обсуждаются актуальные вопросы, рассмотренные на конференции.

В первом разделе представлены материалы, объединяемые в рамках проблем геодинамики, петрологии и геохимии.

В статье *В.Ф. Полина и Д.С. Остапенко* [2024] приведены геологические сведения и петрогохимические характеристики магматитов позднемелового курунгского комплекса Кеткапско-Юнской магматической провинции Алданского щита. Формирование провинции связано с процессами тектономагматической активизации, которые проявились в виде окраинно-континентального рифтинга, сопряженного с коренной структурной перестройкой юго-западного, южного и юго-восточного обрамлений Сибирской платформы. Как следует из результатов петрогохимического изучения магматитов комплекса, разноосновные группы пород в его пределах не связаны между собой отношениями фракционной или иного типа дифференциации, а являются, вероятно, производными флюидно-синтексического взаимодействия мантийного щелочно-базитового расплава и кислых коровых выплавок. Зарождение мантийных областей плавления было связано с присдвиговым рифтингом, обусловленным существованием обстановки скольжения литосферных плит. Образование щелочно-салических магм курунгского комплекса увязывается с масштабным избирательным усвоением корового материала высокотемпературными флюидизированными мантийными магмами в процессе их подъема к поверхности.

В статье *Л.Г. Кузнецовой с соавторами* [2024] обсуждаются результаты геологических, петрогохимических, изотопных (Sm-Nd) и геохронологических U-Th-Pb (LA-ICP-MS по детритовым цирконам) исследований терригенных пород из мощной толщи в южной части Сангиленского блока, входящего в состав Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП). Геохронологические данные по детритовым цирконам из преобладающих граувакковых песчаников позволяют выделить следующие интервалы конкордантных оценок их возраста (млн лет): 787—907, 1873—2236, 2613—2725 и 2902—2977. С учетом максимального из установленного на сегодняшний день раннекембрийского (520 млн лет) возраста прорывающихся их интрузивных пород, возможный период накопления терригенных толщ южной части Сангиленского блока оценивается значительным интервалом 790—520 млн лет. На основании анализа полученных геохимических, изотопных (Sm-Nd) и геохронологических (U-Th-Pb) данных, вероятными источниками сноса для терригенных отложений являлись неопротерозойские и раннедокембрийские островодужные и окраинно-континентальные комплексы. Их относительные пропорции в составе осадков, по-видимому, изменились с удалением от бассейна седиментации (в современных координатах с запада на восток): снижалась доля ранненеопротерозойских ювенильных пород и возрастала доля раннедокембрийских метаморфических комплексов.

Характеристике первичных расплавных, газовых и флюидных включений в кварце и делиите кальцит-кварцевых карбонатитоидов (торголитов) Мурунского массива посвящены исследования *И.А. Сотниковой с коллегами* [2024]. В первичных расплавных и флюидных включениях установлено присутствие CO₂, N₂, CH₄, C₂H₆, C₃H₈, H₂ и H₂S, а также сульфатов и гидрокарбонатов, в качестве твер-

дых дочерних фаз. Растворы включений содержат HS^- и хлориды. Кроме того, в составе включений присутствуют неупорядоченный углерод и битум. Показано, что магматическая флюидная фаза, находившаяся в равновесии с кварцем характеризовалась преимущественно $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{S}$ составом и восстановленным состоянием. Это объясняет появление сульфидов на магматической стадии кристаллизации кальцит-кварцевых карбонатитоидов Мурунского массива. Сульфаты, углеводороды и H_2 , обнаруженные в составе включений, образуются при понижении температуры в результате смешения окислительно-восстановительного равновесия.

В статье В.И. Гребенщиковой с соавторами [2024] оценивается разнонаправленная динамика изменения химического состава воды Ангары на основе многолетних (1950—2021 гг.) мониторинговых исследований водных компонентов Байкальской экосистемы. Циклически-волновой характер изменения межгодового химического состава байкальской воды свидетельствует о наличии эффекта долговременной памяти в химических временных рядах элементов. Проявлены положительные и отрицательные температурные и химические тренды состояния воды истока Ангары, обусловленные изменением климата, влиянием приуроченности Байкала к рифтовой зоне, составом вмещающих пород. Текущие значения контролируемых элементов в воде истока Ангары зависят и от их прошлых значений, но могут резко изменяться при катастрофических нарушениях окружающей среды за счет природных и антропогенных катализмов. Прослежена связь между повышенными значениями урана в воде с сейсмическим процессом в районе оз. Байкал.

Во втором разделе рассмотрены некоторые проблемы металлогенеза.

Характеристике платинометалльного рудообразования посвящены исследования К.Н. Малича с коллегами [2024]. В статье представлен обширный набор данных, включая: 1) содержания высокосидеофильных элементов (ВСЭ) в породах и минералах платиновой группы (МПГ); 2) Re-Os и Pt-Os изотопные вариации в хромитите, Os-Ir сплавах и Ru-Os сульфидах; 3) изотопный состав серы Ru-Os и Ir-Rh сульфидов в составе первичных и вторичных минеральных ассоциаций МПГ; 4) изотопный состав меди Pt-Fe минералов из хромититов и россыпных месторождений Гулинского массива ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами в Полярной Сибири и зональных Нижнетагильского и Светлоборского клинопироксенит-дунитовых массивов на Среднем Урале. Re-Os и Pt-Os изотопные данные свидетельствуют, что содержания ВСЭ в хромититах и МПГ Гулинского массива в значительной степени контролировались составом мантийного источника, который эволюционировал с долгосрочными околохондритовыми Re/Os и Pt/Os отношениями. Значения $\delta^{65}\text{Si}$ для изученных образцов железистой платины и изоферроплатины характеризуются изотопными составами меди, близкими к 0 ‰, что типично для высокотемпературных Cu-содержащих минералов. Особенности изотопного состава серы Ir-Rh сульфидов в составе первичных ассоциаций МПГ свидетельствуют в пользу ее хондритового источника, что находится в согласии с данными по изотопии осмия для Ru-Os сульфидов и Os-Ir сплавов. Изотопно-тяжелый состав серы ($\delta^{34}\text{S} = 5.6 \pm 1.5 \text{ } \%$) As-содержащего эрликоманита согласуется с его вторичным происхождением.

В статье Н.В. Бердникова с соавторами [2024] приведены результаты исследований микроформ самородного золота и его сплавов в магматических породах, в разной степени измененных наложенными процессами. Обсуждаются характеристики состава и состояния как глубинных магматических золотосодержащих сплавов, так и продуктов их трансформации в условиях верхних горизонтов земной коры. Золотосодержащие адакиты и анкарамиты Камчатки, базит-ультрабазиты массива Ильдеус и адакиты Становой складчатой области, дакиты Боливийских Анд образовались непосредственно при плавлении надсубдукционного мантийного клина или погружающейся океанической коры. В деплетированных перidotитах Авачинского вулкана на Камчатке, надсубдукционных офиолитах Полярного Урала, Восточного Саяна и Бетско-Рифейского пояса Западного Средиземноморья золотосодержащее мантийное вещество подверглось глубинному воздействию высокотемпературных расплавов и флюидов субдукционного происхождения. Вулканиты, связанные с железомарганцевыми месторождениями Малого Хингана и месторождением Золотая Гора на Южном Урале, а также ультрамафиты Тарагайского массива в Южном Хингане обнаруживают субдукционные геохимические характеристики. Золотосодержащие трахиты Аппалач (Вирджиния, США) представляют собой кислые дифференциаты внутриплитных магм. Предполагается, что одной из основных форм транспорта золота в верхние горизонты земной коры являются частички состава Cu-Ag-Au, выделяющиеся из обогащенного халькофильными и сидерофильными элементами силикатного расплава, образовавшегося в результате плавления мантийных источников, в той или иной степени претерпевших воздействие субдукционных процессов.

Результаты изучения золоторудной минерализации месторождения Угахан, расположенного в пределах крупнейшей в России Ленской золоторудной провинции, представлены в статье А.Е. Будяка с соавторами [2024]. Последовательность минералообразования на месторождении включает пять стадий: 1) в течение ранней (синдиагенетической) стадии происходило образование фрамбоидного пирита-1, обогащенного Au, Ni, Co, As; 2) на стадии катагенетического преобразования рудоносных осадков происходила перекристаллизация раннего пирита-1 и кристаллизация пирита-2, также обладающего повышенными

содержаниями Au, Ni, Co, As; 3) формирование в рудах пирротина происходило на стадии прогрессивного метаморфизма из водно-углекислого флюида с повышенным содержанием H_2S ; 4) собственно рудная стадия, представленная на месторождении минеральной ассоциацией пирит-3, галенит, сфалерит, халькопирит, самородное золото, коррелирует с развитием в регионе регрессивного метаморфизма; 5) кристаллизация пострудного идиоморфного крупного пирита-4. Комплекс геохимических и изотопных ($\delta^{34}S$ и $Pb-Pb$) данных позволяет исключить привнос минералообразующих компонентов при гидротермально-метасоматическом преобразовании рудовмещающих пород из дополнительного (внешнего) источника. Минералогические и геохимические особенности месторождения Угахан согласуются с представлениями о метаморфогенном происхождении золоторудных месторождений «сухоложского» типа.

Исследования В.Н. Кардашевской с коллегами [2024] направлены на изучение условий образования руд Алгоминского рудного узла (месторождение Бодороно и рудопроявление Дывок), расположенного на сочленении Алданского щита и Становой области. При изучении руд месторождения Бодороно выделены две продуктивные стадии минералообразования: Au-полиметаллическая и Au-Bi-Te, являющиеся продуктами эволюции гидротермальной системы, в ходе которой происходило постепенное снижение температур (от 300 до 145 °C) и солености (от 5 до 1.9 мас. % NaCl-экв.) флюида. Установлено изменение состава газовой фазы флюидных включений от CH_4 - CO_2 до преимущественно CO_2 с примесью N_2 и CH_4 . Результаты $^{40}Ar/^{39}Ar$ -датирования предрудных метасоматитов свидетельствуют о развитии рудообразующих процессов на месторождении Бодороно около 150 ± 1.8 млн л. н. Анализ изотопного состава свинца в галенитах выявил доминирующую роль древнекорового источника рудного вещества. Рассчитанный состав $\delta^{18}O$ в рудоносных кварцах варьирует от 1.0 до 7.3 ‰, что соответствует водному флюиду смешанного источника. На рудопроявлении Дывок выделены четыре минеральные стадии: золото-арсенопирит-пирит-кварцевая, пирит-халькопирит-сфалеритовая, кварц-буланжеритовая и теллуридная. Золотоносная стадия формировалась из флюида с умеренно концентрированной соленостью (0.9—9.2 мас. % NaCl-экв.) при среднетемпературных условиях (310—360 °C) с преобладающим присутствием CO_2 и примесью CH_4 в газовой фазе. Величины $\delta^{34}S$ и $\delta^{18}O$ изменялись от 2.2 до 3.0 ‰ и от 0.6 до 12.0 ‰ соответственно. Возраст золотого оруденения ($^{40}Ar/^{39}Ar$) составляет 124 ± 1.5 млн лет.

Представленные статьи показывают многообразие геохимических подходов к оценке геологических явлений на основе современных методов изучения вещества и позволяют наметить перспективы дальнейших фундаментальных геохимических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

Бердников Н.В., Кепежинская П.К., Невстроев В.Г., Круткова В.О., Коновалова Н.С. Магматическое самородное золото: состав, формы выделения, генезис и эволюция в земной коре // Геология и геофизика, 2024, т. 65 (3), с. 427—445.

Будяк А.Е., Чугаев А.В., Тарасова Ю.И., Горячев Н.А., Блинов А.В., Абрамова В.Д., Рассохина И.В., Реутский В.Н., Игнатьев А.В., Веливетская Т.А., Ванин В.А. Геолого-минералогические и геохимические особенности золоторудного месторождения Угахан «сухоложского» типа (Байкало-Патомское нагорье) // Геология и геофизика, 2024, т. 65 (3), с. 446—470.

Гребенщикова В.И., Кузьмин М.И., Демьянович В.М. Разносторонняя динамика химического состава воды Байкальской экосистемы (Байкал, притоки, исток р. Ангара) // Геология и геофизика, 2024, т. 65 (3), с. 386—400.

Кардашевская В.Н., Анисимова Г.С., Баданина Е.В., Саватенков В.М., Травин А.В. Алгоминский золоторудный узел (Алдано-Становой щит): минералогия, условия образования, источники рудного вещества и возраст оруденения // Геология и геофизика, 2024, т. 65 (3), с. 471—495.

Кузнецова Л.Г., Дриль С.И., Школьник С.И. Состав, возраст и источники сноса терригенных пород южной части Сангиленского блока Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геология и геофизика, 2024, т. 65 (3), с. 353—375.

Летопись Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН. 1957—1976 года / В.А. Макрыгина. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2007, 340 с.

Малич К.Н., Пухтель И.С., Баданина И.Ю., Вотяков С.Л., Солошенко Н.Г., Белоусова Е.А., Веливецкая Т.А., Игнатьев А.В. Источники рудного вещества платинометаллических месторождений Поларной Сибири и Среднего Урала по данным радиогеновых (Re-Os, Pt-Os) и стабильных (Cu, S) изотопов // Геология и геофизика, 2024, т. 65 (3), с. 401—426.

Полин В.Ф., Остапенко Д.С. Щелочно-салический курунгский комплекс Кетканско-Юнской магматической провинции (Алданский щит, Россия): петрогенезис и геодинамические условия формирования // Геология и геофизика, 2024, т. 65 (3), с. 325—352.

Сотникова И.А., Боровиков А.А., Колотилина Т.Б., Алымова Н.В. Флюидный режим кристаллизации графических кальцит-кварцевых карбонатитоидов Мурунского массива // Геология и геофизика, 2024, т. 65 (3), с. 376—385.

Таусон Лев Владимирович. Ученый, педагог, гражданин / Ред. М.И. Кузьмин, Новосибирск: Изд-во «Гео», 2007, 243 с.