

**К ПРОБЛЕМЕ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ГРАНИТОИДНЫХ ФЛЮИДНО-  
МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЗОЛОТО ИЛИ ОЛОВО  
(НА ПРИМЕРЕ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ)**

***И.И. Фатьянов, В.Г. Хомич***

*Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку 159,*

*г. Владивосток, 690022, e-mail: khomich79@mail.ru*

Поступила в редакцию 18 июля 2006 г.

В основе обособления крупных скоплений Au и Sn с образованием самостоятельных металлогенических провинций, зон и рудных узлов лежит не только гетерогенное строение земной коры и верхней мантии с вытекающими из этого следствиями в виде разнообразия источников магм и рудогенных элементов, но и отличие этих элементов по геохимическим свойствам. При транспорте Au и Sn флюидно-магматическими колоннами поляризующее влияние на подвижность металлов оказывало их различное сродство к силикатообразующим кластерам расплавов, кислороду, другим сильным окислителям. Это влияние способствовало индивидуализации миграционных путей элементов к уровням рудоконцентрирования. К моменту обособления рудоносных флюидов металлогеническая специфика контрастных по редокс-потенциалу расплавов обычно была уже определена, что подтверждается преимущественной ассоциацией оловянного оруденения с гранитоидами ильменитовой, золотого – магнетитовой серий. Потенциальными продуцентами совмещенных концентраций металлов могли быть флюидно-магматические системы с промежуточной степенью окисленности-восстановленности расплавов. Однако и в этих случаях совместное концентрирование олова и золота затруднялось противоположно направленным протеканием окислительно-восстановительных реакций при образовании самых распространенных их минералов: основная миграционная форма олова  $\text{Sn}^{+2}$  должна быть окислена (с выделением касситерита), а формы золота –  $\text{Au}^+$  или  $\text{Au}^{+3}$  – восстановлены (с выделением металла в самородном виде). Вероятно поэтому совместные концентрации олова и золота характеризуются доминирующей ролью одного из металлов с тенденцией накопления их в разностадийных минеральных комплексах. Степень окисленности-восстановленности расплавов, “регулирующая” миграционную активность металлов, зависела от продолжительности перемещения флюидно-магматических колонн к уровням рудоконцентрирования – функции глубины их зарождения и скорости движения, которые обуславливались геодинамическими режимами.

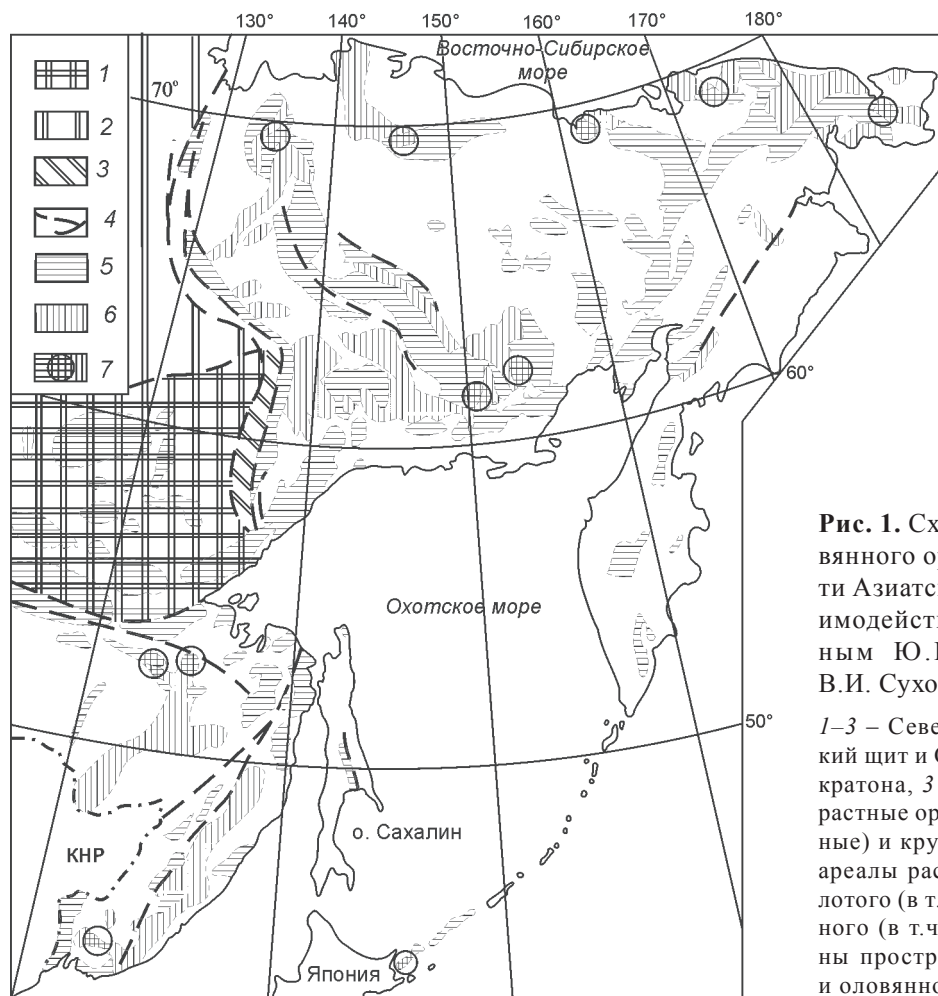
**Ключевые слова:** золото, олово, гранитоиды, флюидно-магматические системы, окислительно-восстановительный потенциал, Дальний Восток России.

**ВВЕДЕНИЕ**

Среди обширного спектра рудных элементов, накопление которых связано со сложными процессами взаимодействия флюидов с расплавами и породами, Au и Sn привлекают исследователей обособленностью значимых концентраций. Месторождения этих элементов обычно сгруппированы в самостоятельных золотоносных и оловоносных металлогенических провинциях; совмещение их крупных по масштабам проявлений в рудных узлах является скорее исключением, чем правилом. Случаи промышленно

значимых скоплений минеральных форм Au и Sn в одних месторождениях весьма редки; минеральные ассоциации, в которых совместно присутствуют самородное золото и касситерит, относятся к разряду экзотических. В этой связи Au и Sn известны в литературе как “элементы-антагонисты”. Именно в таком качестве их рассматривали С.С. Смирнов, Ю.А. Библибин, Р.М. Константинов, другие известные специалисты в области геологии рудных месторождений.

Обособленность золотоносных и оловоносных поясов и зон достаточно четко демонстрирует север-



**Рис. 1.** Схема размещения золотого и оловянного оруденения северо-западной части Азиатско-Тихоокеанской мегазоны взаимодействия литосферных плит (по данным Ю.И. Бакулина, Н.П. Лошака, В.И. Сухова, В.Г. Хомича с упрощениями).

1–3 – Северо-Азиатский кратон: 1 – Алданский щит и Становой блок, 2 – опущенная часть кратона, 3 – краевое поднятие; 4 – разновозрастные орогенные сооружения (нерасчлененные) и крупные линейaments; 5–6 – основные ареалы распространения оруденения: 5 – золотого (в т.ч. золото-серебряного), 6 – оловянного (в т.ч. вольфрам-оловянного); 7 – районы пространственного совмещения золотого и оловянного оруденения.

ное звено Азиатско-Тихоокеанской мегазоны взаимодействия литосферных плит (рис. 1). В складчатонадвиговых сооружениях и магматических дугах этой планетарной структуры ареалы золотоносности тяготеют к протяженным мобильным палеорифтовым (по заложению) системам с сокращенной мощностью сиалической части коры и известково-щелочным магматизмом среднего и умеренно-кислого состава. Оловоносные пояса и зоны размещены здесь в горст-антиклинорных сооружениях, характеризующихся увеличенной мощностью сиалической части коры и известково-щелочным умеренно-кислым и кислым магматизмом.

Вместе с тем, на Востоке России известны площади пространственной сопряженности золотой и оловянной минерализации. Они обычно невелики по размерам, чаще всего тяготеют к пограничным областям рифтогенных структур с горст-антиклинорными и обладают промежуточной мощностью сиалической части коры. Полиформационные рудные узлы при этом характеризуются доминирующим развитием оруденения одного из металлов относительно другого.

Примеры сонахождения Au и Sn в рудных сообществах служат основой для представлений о достаточно тесных отношениях Au и Sn в рудообразующих процессах. Показательно в этом плане исследование В.И. Гаврилова и В.В. Онихимовского [3]. Проанализировав концентрации Au и Sn в первичном метеоритном веществе, мантийных породах и глубинных дифференциатах, они сочли возможным “перекинуть мостик” между данными о глубинном сонахождении элементов и примерами пространственного совмещения их скоплений в верхних горизонтах земной коры. Привлекают внимание взгляды И.Я. Некрасова по этой проблеме [15, 17, 18]. Одну часть проявлений с комплексным золото-серебро-оловянным оруденением он отнес к многоэтапным полиформационным, другую – к одноэтапным с выделением в особую олово-золото-серебряную, позднее – в золото-касситерит-кварцевую и золото-касситерит-силикатную

и оловянного оруденения. Привлекают внимание взгляды И.Я. Некрасова по этой проблеме [15, 17, 18]. Одну часть проявлений с комплексным золото-серебро-оловянным оруденением он отнес к многоэтапным полиформационным, другую – к одноэтапным с выделением в особую олово-золото-серебряную, позднее – в золото-касситерит-кварцевую и золото-касситерит-силикатную

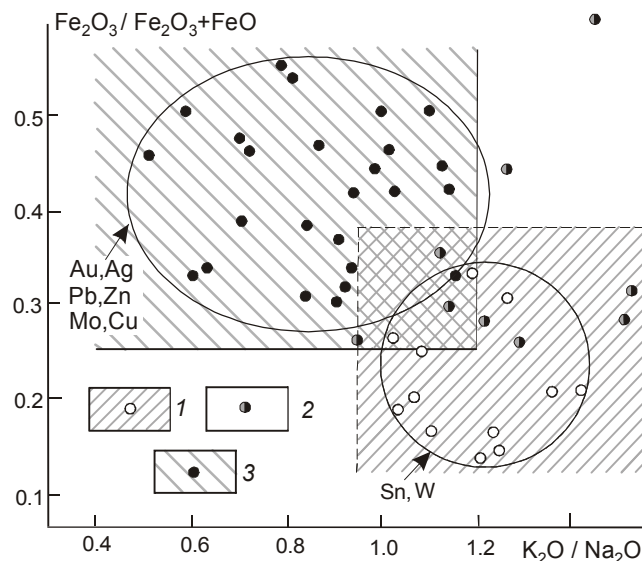
формации. Представления И.Я. Некрасова о комплексной специализации кислого магматизма на Sn, Au и Ag получили развитие в работах Г.Н. Гамянина [4, 5 и др.].

Сохраняющаяся противоречивость взглядов на причинность возникновения обособленных и совмещенных концентраций металлов не способствует адекватной прогнозно-металлогенической оценке территорий. Актуальность анализа этой проблемы очевидна. В основу такого анализа, по нашему мнению, должен быть положен факт пространственной обособленности экономически значимых концентраций Au и Sn с учетом ярко выраженного различия металлов по ряду геохимических свойств и вытекающей из этого логической предпосылкой: *среди множества известных (разноранговых) факторов, влияющих на миграцию и концентрирование каждого из рассматриваемых металлов, существуют такие, которые могли препятствовать их синхронному поступлению в гидротермальные системы, а в случаях совместного поступления – синхронному концентрированию*. Анализ этой проблемы в обозначенном контексте представлен ниже.

#### О ПОЛЯРИЗАЦИИ МИГРАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ Au И Sn ПРИ ДВИЖЕНИИ МЕТАЛЛОВ К УРОВНЯМ РУДОАКОПЛЕНИЯ

Во многих работах, касающихся аспектов миграционной активности и концентрирования Au и Sn, отмечается значимость окислительно-восстановительного потенциала в процессах их переноса и отложения [7, 16, 18 и др.]. В этом же контексте обращаем внимание на основополагающую работу А.А. Маракушева [11] по геохимической систематике элементов, раскрывающую особенности поведения металлов в процессах петрогенезиса и рудообразования. На основе анализа химического сродства рудных элементов к флюидным компонентам А.А. Маракушев показал различие их соотношений с водородом, кислородом, серой, фтором, хлором. Его расчетами подчеркнуты оксифобные свойства Au и оксифильные – Sn.

Поляризующее влияние редокс-потенциала флюидно-магматических систем (ФМС) на подвижность Au и Sn при движении металлов к уровням рудолокализации подтверждает пространственная ассоциация золотого и оловянного оруденения с гранитоидами разной степени намагниченности (рис. 2): оловоносные площади на восточной окраине Азии тяготеют преимущественно к ареалам развития гранитоидов ильменитовой, а золотоносные – магнетитовой серии [20, 21, 29–31 и др.]. На Востоке России 85 % оловоносных узлов пространственно связаны с



**Рис. 2.** Положение мезозойско-кайнозойских гранитоидных комплексов Тихоокеанского пояса с разной металлогенической специализацией на петрохимической диаграмме (по Н.П. Романовскому [21] с изменениями).

1–3 – комплексы с разной магнитной восприимчивостью: 1 – менее  $100 \cdot 1.3 \cdot 10^{-5}$ , 2 –  $100 \cdot 1.3 \cdot 10^{-5}$ – $300 \cdot 1.3 \cdot 10^{-5}$ , 3 – более  $300 \cdot 1.3 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ. Штриховкой выделены поля различной металлогенической специализации комплексов.

гранитоидами, магнитная восприимчивость которых менее  $100 \cdot 1.3 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ, и 90 % золотоносных – с магматитами, у которых этот показатель более  $300 \cdot 1.3 \cdot 10^{-5}$  [21]. В этой связи представляется естественным рассмотреть отчетливо проявленную тенденцию пространственного обособления крупных скопления Au и Sn в свете влияния на миграционную активность этих металлов, прежде всего, их сродства к кислороду и другим сильным окислителям.

По Ф.А. Летникову [10], флюидные системы, зарождавшиеся на границе мантии с ядром и формировавшие водородные плюмы, изначально были специализированы на перенос углерода и серы. С приближением таких плюмов к областям подкорковых глубин происходило преобразование их в водно-водородные с обогащением рудогенными элементами и летучими соединениями. С возникновением очагов магмогенерации на фронте восходящих интрателлурических потоков некоторые из рудогенных элементов мигрировали в составе флюидных потоков, несколько опережавших в движении вследствие высокой подвижности, зарождавшиеся флюидно-магматические колонны (ФМК). В этот процесс могло вовлекаться и Au. При понижении температуры углеродная специализация флюидов способствовала раз-

виту реакций диспропорционирования с выделением углеродистых веществ и синхронной трансформацией миграционных соединений Au с частичным осаждением металла в самородном виде и повышением степени окисления его миграционной формы [12]. Перемещенное таким образом Au накапливалось в так называемых промежуточных коллекторах – зонах рассеяной сульфидной вкрапленности и углеродистого метасоматоза, обычных элементах складчатых сооружений на востоке Азии. Дальнейшая его миграция, если она имела место, была связана с развитием сложных по генезису (полигенных) гидротермальных систем, возникавших синхронно с интрузиями магм в общем тепловом поле [25].

Другая часть рудогенных элементов (в их числе Sn и также Au) транспортировалась ФМК. В зависимости от сродства элементов к силикатообразующим кластерам, одни из них занимали связующее положение между кремнекислородными тетраэдрами, обеспечивая энергетическую стабильность кластерных группировок, другие оставались в расплаве в атомарном состоянии [19]. Структурно-химическое взаимодействие больше присуще Sn, в глубинных условиях, по [16], находившемуся в низшей степени окисления, чем Au, пребывающему в расплаве, по [18], в атомарном состоянии. В этой связи Au, при возникновении оптимальных условий, могло перейти в подвижную форму на любом этапе развития ФМК, в то время как Sn, удерживаясь силикатной матрицей, получало перспективу для образования подвижных соединений лишь при дестабилизации кремнекислородных связей в расплаве. Окончательное же высвобождение  $\text{Sn}^{+2}$  из структуры расплавов (с возможностью накопления во флюидном остатке) связано с этапом кристаллизации магм. Отмеченные особенности перемещения металлов в составе ФМК к верхним этажам земной коры нашли свое отражение во взаимоотношениях оруденения с магматитами: они более разнообразны и сложны, часто парагенетические, – у Au и обычно генетические – у Sn. Таким образом, действие **первого фактора**, не способствовавшего синхронному поступлению Au и Sn во флюидную фазу магматических колонн на путях движения в сторону палеоповерхности, связано с местом металлов в структуре расплавов в соответствии со сродством к силикатообразующим кластерам.

По достижении ФМК верхних горизонтов земной коры реализация их металлогенической потенции могла протекать по следующим сценариям. В магмах, продуцировавших гранитоиды ильменитовой серии, основная часть Au удерживалась в атомарном состоянии и при кристаллизации расплавов

рассеивалась в больших объемах образующихся пород; Sn же с началом кристаллизации, высвобождаясь из состава алюмокремнекислородных группировок в виде иона, способно было экстрагироваться флюидом. В магмах с более высокой степенью окисления, продуцировавших гранитоиды магнетитовой серии, ярко выраженная оксифильность Sn способствовала переводу основных количеств металла при кристаллизации расплавов в инертное состояние, тем самым ограничивая его возможности для накопления во флюидной фазе. Оксифобность Au не мешала переходу металла в таких магмах в подвижную форму (в присутствии элементов VII, VI или V групп Периодической системы) и накоплению во флюидном остатке. Таким образом, действие **второго фактора**, приводившего к специализации контрастных по редокс-потенциалу ФМС только на Au или Sn, основано на поляризации их миграционной активности в таких системах вследствие кардинальных различий сродства металлов к кислороду.

На миграционную активность Au и Sn оказывало влияние также их химическое сродство к другим компонентам флюидов, являющихся сильными окислителями и выступающих также в качестве комплексообразователей. Покажем это на примере галогенов. Химическое сродство Au к хлору, а Sn – к фтору (при слабых, как и у Au, связях с алюмосиликатными расплавами у хлора и более выраженных, как и у Sn, этих связях у фтора) [11, 12] проявлялось в сопряженной миграции каждого из металлов со “своим” галогеном. При этом, магмофобность хлора усиливала возможности Au к миграции с флюидной фазой на разных этапах развития ФМК, а относительная магмофильность фтора поддерживала “стремление” Sn к накоплению во флюидном остатке лишь к завершающему этапу эволюции колонн. Таким образом, действие **третьего фактора**, также способствовавшего разъединению металлов на путях к зонам рудоконцентрирования, основано на предпочтительной миграции Au и Sn с теми из флюидных компонентов, с которыми их связывает химическое сродство.

Как видим, синхронному движению Au и Sn к уровням рудолокализации в составе ФМК препятствовал труднопреодолимый **геохимический барьер** из трех ключевых факторов, интегральное влияние которых приводило к поляризации миграционной активности рассматриваемых элементов. В контрастных по редокс-потенциалу расплавах, продуцировавших гранитоиды ильменитовой или магнетитовой серии, возможности для накопления во флюидной фазе возникали только у одного из элементов, и к моменту обособления рудоносного флю-

ида металлогеническая специализация таких ФМС в основном уже была определена.

Показательно, что и гидротермальный перенос Au осуществлялся в более окислительной, чем Sn, обстановке, поскольку отделявшиеся от материнских расплавов гидротермы естественным образом наследовали основные особенности магматических флюидов [14]. Это подтверждают и термобарогеохимические исследования Т.М. Сушевой [23] ряда золото- и оловорудных проявлений. Соответствуют этому положению и геологические факты: тяготение золотого оруденения к восстановительным средам – углеродистым (черносланцевым) толщам, обогащенным органикой пачкам пород, горизонтам и зонам с сульфидной вкрапленностью. Для оловянного оруденения четкого геохимического контроля со стороны рудовмещающих осадочных пород не прослеживается. Можно предположить, что для мигрировавшего в низшей степени окисления Sn универсальным окислительным барьером (при низкой активности серы) служили инфильтрационные термы (метеорные, морские, ископаемые), которые на определенном уровне глубинности неизбежно вовлекались в сферу деятельности ювенильных флюидных систем.

#### О СИНХРОННОМ ДВИЖЕНИИ Au И Sn К УРОВНЯМ РУДОЛОКАЛИЗАЦИИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ СОВМЕСТНОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ

Как было показано, в контрастных по редокс-потенциалу ФМС возможности для накопления во флюидном остатке возникали только у одного из металлов, в то время как другой удерживался в расплаве в инертном состоянии. В промежуточных же по степени окисленности-восстановленности ФМС (или при заметных флуктуациях этого показателя) редокс-потенциал, как “регулятор” инертности-подвижности Au и Sn, уже не мог быть столь эффективным. Вероятно, в таких ФМС и возникали условия для их комплексной (на Au и Sn) специализации с перспективами концентрирования металлов в единый этап минерализации. Косвенное подтверждение этого мы находим у Н.П. Романовского [21], показавшего, что вулcano-плутоническим зонам с промежуточными значениями магнитной восприимчивости пород свойственно разнотипное оруденение.

Совместное движение Au и Sn к уровням рудо-локализации могло обеспечиваться достаточно высокой (относительно фугитивности кислорода) активностью Cl, F, S, Te, Se, Bi, Sb, As. Если следы участия хлора в процессах миграции и концентрирования Au и Sn в связи с геохимической спецификой этого галогена удастся фиксировать только с помощью изу-

чения газовой-жидких включений в минералах [9, 13, 14, 23 и др.], то роль других элементов в синхронном переносе и отложении металлов отчетливо отражают минеральные составы руд. Так, на ряде эпитеpmальных месторождений золота Евразии (Озерновское, Прасоловское, Елшица, Челопеч, Актурпак, Кайрагач, Бургунда) В.А. Коваленкером [9] описана ассоциация висмут- и теллуросодержащих блеклых руд, теллуридов Au и сульфостаннатов. В золото-редкометалльных проявлениях Северо-Востока России, содержащих Sn, нередко отмечаются теллуриды и сульфотеллуриды висмута [5, 8 и др.]. В свою очередь, на ряде месторождений олова золотосодержащие ассоциации часто характеризуются висмут-теллуруровым геохимическим профилем [18].

Как видим, потенциальные возможности для синхронного движения Au и Sn к уровням рудо-локализации если и возникали, то, вероятнее всего, в ФМС с промежуточными по степени окисленности-восстановленности расплавами. Однако и в этих случаях перспектива совместного накопления металлов могла реализоваться далеко не всегда, что отчетливо проявляется при анализе распределения их минеральных форм в промышленном балансе руд.

Экономически значимые концентрации Au обычно связаны с объектами, в которых оно присутствует в самородном состоянии (от дисперсных до визуально наблюдаемых выделений), реже – в виде соединений с теллуrom, в то время как промышленные концентрации Sn представлены скоплениями касситерита, иногда станнина. Главные источники олова России – месторождения касситерит-силикатной, касситерит-сульфидной и касситерит-кварцевой формаций, а большая часть эндогенного Au извлекается из руд тех формаций, где оно находится в самородном виде [28]. Прочие минеральные формы (сульфиды, сульфотеллуриды, сульфоселениды и селениды Au; сложные сульфиды, сульфостаннаты и силикаты Sn) в формировании экономически значимых концентраций Au и Sn играют подчиненную роль. Из этого следует, что для образования крупных скоплений миграционные формы металлов ( $Au^{+1}$  и  $Au^{+3}$ ,  $Sn^{+2}$  и  $Sn^{+4}$ ) на уровнях рудо-локализации должны были быть в случае с Au в основном восстановлены до самородного состояния, а в случае с Sn (в связи с миграцией преимущественно в форме  $Sn^{+2}$  [16, 18]) – в основном окислены (с образованием касситерита). Таким образом, противоположно направленное течение окислительно-восстановительных реакций при образовании самых распространенных минералов Au и Sn – еще один важный **фактор**, пре-

пятствовавший, уже на гидротермальном этапе, образованию крупных совместных скоплений металлов.

Предпосылки для концентрации Au и Sn в единый этап минерализации возникали, вероятно, в тех случаях, когда степень окисленности миграционных форм металлов при рудоотложении в целом могла сохраняться с образованием, к примеру, теллуридов золота, станнина, возможно и касситерита. Судя по геологическим наблюдениям, рудоконцентрация при этом протекала с доминирующей ролью одного из металлов и тенденцией накопления каждого в разностадийных минеральных комплексах. Так, в ряде золото-редкометалльных проявлений Верхояно-Колымского орогенного пояса отмечены оловосодержащие (обычно сульфидные) ассоциации [8], которые, заметим, предшествуют золотоносным (нередко содержащим теллуриды и сульфотеллуриды висмута). В свою очередь, на некоторых месторождениях Sn в качестве попутного компонента отмечается Au, отлагавшееся на позднем (полисульфидном, по И.Я. Некрасову [18]) отрезке гидротермального процесса в рудогенных ассоциациях с висмут-теллуровой геохимической спецификой.

#### **Об иных возможных причинах совмещения концентраций Au и Sn**

Из изложенного вытекает, что совместное концентрирование Au и Sn в экономически значимых масштабах если и возможно, то в таких условиях, которые обеспечивали бы синхронное накопление металлов во флюидном остатке кристаллизующегося магматического очага, а затем – концентрирование в единый этап минерализации. В других случаях сонахождения заметных скоплений этих металлов необходим поиск причин, объясняющих совмещение их концентраций. Возможные варианты такого сонахождения в разноранговых рудных сообществах рассмотрены ниже.

*В металлогенических зонах с профилирующим оруденением одного из металлов присутствие проявлений другого может быть следствием длительной и сложной эволюции геотектонических структур. Примером могут служить золотоносные металлогенические зоны Верхояно-Колымского складчато-надвигового пояса с локальными ареалами многометалльного профиля и нарушением здесь тенденции пространственной ассоциации золотого оруденения с магнитными гранитоидами. Н.П. Романовский [21] такое нарушение объяснил ассоциацией золото-кварцевого оруденения не с батолитоподобными гранитоидными массивами пониженной магнитности, а с малыми интрузиями повышенной основности, магнитные свойства которых детально не изуча-*

*лись и потому при статистическом анализе не могли быть учтены. Приуроченность же доботолитовых золото-кварцевых проявлений к зонам зеленосланцевого метаморфизма послужила основанием для представлений о метаморфогенном (по Л.В. Фирсову и В.А. Серебрякову), плутоногенно-метаморфогенном (по М.Л. Гельману), гидротермально-метаморфогенном (по Н.А. Горячеву), тектоно-метаморфогенном (по В.Ю. Фридовскому) их генезисе. Позднее Г.Н. Гамянин с соавторами [5] предложили рассматривать золоторудные проявления региона в рамках единой региональной рудно-магматической системы, связав золото-кварцевое и золото-редкометалльное оруденение с разными этапами ее развития. В рамках этой модели можно представить возможность локального проявления золотой минерализации в связи с развитием ильменитовых гранитоидных серий, если на одном из этапов функционирования региональной рудно-магматической системы в таких сериях достигался оптимальный для миграции Au окислительно-восстановительный режим (что можно допустить, учитывая значительную емкость ильменитовой фазы в отношении гематитовой молекулы). Заметим при этом, что широкий спектр взглядов на проблему генезиса золотого оруденения этого региона хорошо иллюстрирует известные представления о возможности независимого от магматитов зарождения золотоносных гидротермальных потоков при дальнейшей автономной или совместной с магматогенными флюидами их эволюции в едином тепловом пространстве [25, 27 и др.].*

*Полиформационные рудные узлы могли возникнуть вследствие деятельности разновременных ФМС. Классические примеры таких узлов можно найти на Северо-Востоке России. Один из них – Майский рудный узел с месторождениями золото-сульфидного (Майское), касситерит-сульфидного (Сильное и др.) и золото-серебряного (Сопка Рудная) типов [22]. Другой пример – Пионерский рудный узел с доботолитовыми месторождениями Au (Игуменовское и др.) и более поздними проявлениями Sn и Mo, генетически связанными с Улаханским и Севастопольским гранитоидными массивами [24 и др.].*

*Нельзя исключать возможность совмещения разнотипной минерализации в рудных узлах в связи с развитием ФМС по схеме, когда окислительно-восстановительное равновесие магм, достигавших верхних этажей земной коры, во все более поздних интрузиях заметно смещалось в какую-либо сторону. Примером такой эволюции мог бы служить Комсомольский рудный район, в пределах которого оловянное оруденение и ареал золотоносности ассоциируют, соответственно, с ранним силинским и более*

поздним пурильским интрузивными комплексами, заметно различающимися петрохимическими характеристиками и окислительно-восстановительными условиями формирования [7]. Однако здесь сохраняется неясность в отношении общности очага магмогенерации комплексов. Эволюцию ФМС, но уже с противоположной тенденцией изменения окислительно-восстановительного режима, можно продемонстрировать на примере Бекчиулского вулканоплутонического сооружения [26]. Ранняя андезит-гранодиоритовая ассоциация сооружения характеризуется повышенной магнитной восприимчивостью, и с ней связано золотое и золото-серебряное оруденение. Поздняя монцогранодиорит-гранитная ассоциация слабомагнитна, с ней сопряжены турмалин-кварцевые жильно-прожилковые зоны, что позволяет рекомендовать их для оценки на Sn.

В рудных полях при изучении случаев сонахождения разнометалльных комплексов следует учитывать, что наложение оловоконцентрирующих ФМС на золоторудные узлы могло сопровождаться явлениями частичной мобилизации Au вследствие его высокой подвижности в эндогенных процессах. Возможно золотосодержащие ассоциации некоторых оловорудных объектов имеют именно такое происхождение. В подвергшихся же регенерации золоторудных проявлениях могут отмечаться признаки оловоносности. Так, на уже упоминавшемся Игуменовском золоторудном месторождении, расположенном в приконтактовой зоне гранитоидного массива Улахан, описан редкометалльный минеральный комплекс, включающий, в частности, касситерит и регенерированное Au [24]. Заметим, что явления регенерации Au в рудных полях с совмещенным разнометалльным оруденением трудно выявляемы, часто остаются незамеченными, и в этой связи сонахождение металлов может иметь некорректную интерпретацию. На детально изученных объектах причины сонахождения металлов обычно не вызывают дискуссий. Характерный пример – Майское месторождение (Северо-Восток России), где, по Н.С. Бортникову с соавторами [1], совмещено три “...генетически различных, разновременных типа оруденения...”, – золото-сульфидный, редкометалльный и золото-антимонитовый.

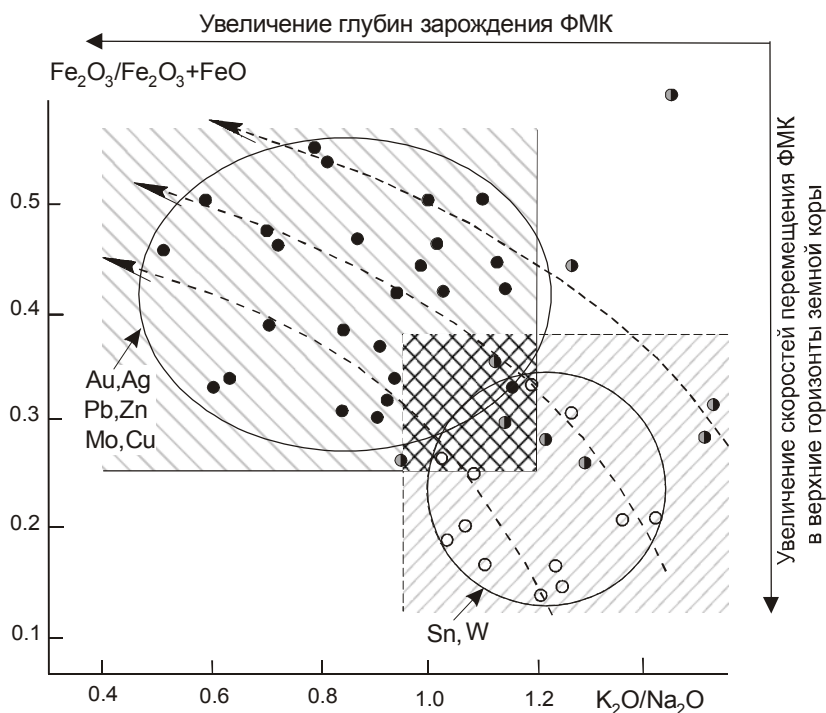
#### ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ

Представление о том, что редокс-потенциал очагов магмогенерации задавался режимом восходящих флюидных потоков, подтверждено исследованиями гранитоидных серий юга Дальнего Востока [6], показавшими, что “...исходное состояние гранитоидных расплавов...” характеризовалось “...как весьма восстановленное”. Появление же на верхних этажах

земной коры гранитоидных масс с иным, чем восстановленное, состоянием расплавов может быть следствием не только интегрального влияния вмещающей среды, процессов дифференциации магм, ассиляции и контаминации. После фундаментальных разработок Д.С. Коржинского в качестве одной из причин, заметно повлиявших на физико-химические характеристики магм, был признан фактор взаимодействия потока трансмагматических флюидов с расплавами.

По И.М. Волохову [2], следствием флюидно-магматического взаимодействия при развитии ФМК на глубинных уровнях в пластичных средах (когда подъем расплавов осуществлялся в условиях относительно закрытых систем) было проявление эффектов, обуславливавших перераспределение в магмах подвижных компонентов. Более высокая скорость диффузии водорода, чем кислорода и особенно гидроксидов, в расплавах вела к заметной дифференциации компонентов воды с увеличением концентрации водорода в головной части ФМК. Проявлявшийся при этом “фильтрационный эффект”, обусловленный более высокой проницаемостью экранирующего субстрата для элементов с малым размером атомов, интенсифицировал миграцию за пределы ФМК, прежде всего, водорода. Совокупное действие дифференциации компонентов воды в расплавах и «фильтрационного эффекта» могло приводить к смещению редокс-потенциала магм в сторону окислительных значений.

В этой связи показателен поиск связей между степенью окисленности-восстановленности расплавов, достигших уровней рудоконцентрирования, и глубиной зарождения магм, предпринятый М. Такахаши с соавторами [33]. Ими установлено, что в пределах Тихоокеанского подвижного пояса гранитоиды магнетитовой и ильменитовой серий не являются точным эквивалентом серий I и S типов, хотя в отдельных регионах пояса гранитоиды I-типа приближаются к таковому магнетитовой, а S-типа – ильменитовой серии. Достигнутый упомянутыми авторами именно такой результат весьма примечателен. По нашему мнению, для получения более четких коррелятивных связей между названными группами гранитоидов необходим учет еще одной важной геодинамической характеристики – скорости перемещения ФМК в верхние этажи земной коры, так как *время* пребывания ФМК в условиях относительно закрытых систем, в течение которого и могло происходить заметное изменение величины редокс-потенциала, – *функция глубины* их зарождения *и скорости* перемещения в зоны хрупких деформаций. Как нам представляется, одна из диаграмм Н.П. Романовского [21] в предложенной авторами интерпретации это иллюстрирует (рис. 3).



**Рис. 3.** Положение мезозойско-кайнозойских гранитоидных комплексов Тихоокеанского пояса с разной магнитной восприимчивостью и специализацией (данные Н.П. Романовского [21]) в условных координатах: глубина зарождения очагов магмогенерации – скорость перемещения ФМК в сторону палеоповерхности. Стрелки отражают тенденцию вероятного увеличения продолжительности перемещения ФМК в верхние горизонты земной коры. Условные обозначения см. на рис. 2.

**О глубинах** зарождения ФМК можно составить представление по данным о распределении плотностных неоднородностей земной коры и верхней мантии в рудных провинциях Приамурья [32]. Корреляция между специализацией рудных районов и глубиной конденсации гравитирующих масс позволяет рассматривать последнюю в качестве опосредованного показателя глубины залегания магмогенерирующих очагов. Под оловорудными районами значимые показатели плотностных неоднородностей не распространяются глубже 30–50 км, под вольфрам-оловянными – глубина конденсации гравитирующих масс не превышает 70 км, а под золоторудными – может достигать 100 км.

**О скоростях** перемещения ФМК в верхние этажи земной коры можно судить, исходя из заключения Н.П. Романовского [21] о преимущественном образовании магнитных гранитоидов в условиях растяжения, а слабомагнитных – сжатия. В структурах, испытывавших растяжение, очаги магмогенерации зарождались на фронте восходящих интрателлурических потоков в условиях больших глубин. Скорости подъема магм в сторону палеоповерхности на таких глубинах, хотя и находились в сложной зависимости от состава, флюидонасыщенности и температуры выплавок, не могли быть высокими, пока их перемещение происходило в близком по плотности субстрате. В областях же, испытывавших сжатие, очаги магмогенерации обычно зарождались в участках разуплотнения (под тектоноформами выжимания) на меньших глубинах. В подобных условиях, в связи с

подключением к “всплывавшему” расплаву механизма “выдавливания”, скорости подъема магм на верхние этажи земной коры могли заметно возрастать.

Приведенные данные позволяют, в качестве возможного варианта, предложить следующую схему появления на верхних этажах земной коры потенциально золотоносных и потенциально оловоносных гранитоидных ФМС. В структурах растяжения очаги магмогенерации зарождались на фронте восходящих интрателлурических потоков. Вследствие значительного расстояния очагов до зоны хрупких деформаций и невысоких скоростей подъема выплавок, ФМК находились в условиях относительно закрытых систем длительный промежуток времени. Опережающее при этом удаление водорода из головных частей колонн (вследствие проявления рассмотренных выше эффектов) могло приводить к смещению изначально присущего очагам магмогенерации восстановительного потенциала в сторону окислительных значений и появлению на верхних этажах земной коры гранитоидов магнетитовой серии (перспективных в отношении Au). В областях же сжатия очаги магмогенерации зарождались в участках разуплотнения (под тектоноформами выжимания). Меньшие глубины зарождения очагов и возросшие скорости подъема магм позволяли расплавам достигнуть верхних этажей земной коры с сохранением изначально присущего очагам магмогенерации восстановительного режима и формированием гранитоидов ильменитовой серии (потенциально оловоносных). В условиях сменя геодинамических режимов верхних этажей зем-

ной коры могли достигать (в зависимости от стадии развития при этом ФМК) расплавы с промежуточными значениями редокс-потенциала или разъединенные во времени и различающиеся по петромагнитным свойствам их порции.

На примере Au и Sn нами проиллюстрировано известное положение о том, что образование месторождений – составная часть сложных геодинамических процессов развития земной коры. Если на характер флюидно-магматического взаимодействия оказывали влияние геодинамические условия, определявшие не только глубину зарождения магматических очагов, но и динамику развития ФМК, то периоды формирования золото- и оловоконцентрирующих ФМС должны отражать особенности геодинамических режимов в истории развития крупных структурно-металлогенических элементов подвижных зон Земли.

### ВЫВОДЫ

1. Обособление крупных скоплений Au и Sn обусловлено не только гетерогенным строением земной коры и верхней мантии с вытекающими из этого следствиями в виде разнообразия источников магм и рудогенных элементов. В основе образования самостоятельных металлогенических провинций, рудных узлов, месторождений этих металлов лежат также их различия по ряду геохимических свойств, обуславливавшие реализацию миграционной потенции Au и Sn в разных геодинамических условиях.

2. “Фундамент” для обособленного концентрирования рассматриваемых металлов закладывался еще на этапе движения ФМК к уровням рудолокализации. Синхронной их миграции препятствовал труднопреодолимый барьер из **трех** ключевых **геохимических** факторов, в основе действия которых лежит отчетливо выраженное различие Au и Sn по сродству к силикатообразующим кластерам расплава, к кислороду, другим сильным окислителям. **Первым фактором**, обусловленным неодинаковой позицией Au и Sn в структуре расплавов, металлам предоставляются неравные возможности для образования подвижных соединений с перспективой асинхронной миграции при их движении в составе ФМК к уровням рудолокализации. **Вторым фактором**, обусловленным влиянием окислительно-восстановительного режима ФМС на миграционную активность Au и Sn, создаются условия для поляризации их миграционной активности с перспективой специализации контрастных по редокс-потенциалу ФМС только на один из металлов. **Третьим фактором**, обусловленным предпочтительной миграцией Au и Sn с теми из флюидных компонентов (окислителей и комплексобразо-

вателей), с которыми их связывает более высокая степень химического сродства, поддерживаются условия для асинхронного движения металлов к уровням рудоконцентрирования. К моменту обособления рудоносного флюида металлогеническая специфика окисленных и восстановленных ФМС обычно была определена, что косвенно подтверждается преимущественной ассоциацией золотого оруденения с гранитоидами магнетитовой, оловянного – ильменитовой серии.

3. Синхронная миграция Au и Sn к уровням рудонакопления эффективнее всего могла осуществляться в условиях промежуточной степени окисленности расплавов. При этом, предпосылки для концентрирования Au и Sn в единый этап минерализации возникали в тех случаях, когда степень окисленности миграционных форм металлов при рудоотложении в целом могла сохраняться (с образованием, к примеру, теллуридов золота, станнина, возможно и касситерита). Реализация таких случаев осуществлялась обычно при доминирующей роли одного из металлов с концентрацией их в разностадийных минеральных комплексах. Однако чаще рудонакопление происходило с восстановлением Au<sup>+1</sup> или Au<sup>+3</sup> до самородного состояния металла и окислением Sn<sup>+2</sup> с выделением касситерита. Противоположно направленное течение окислительно-восстановительных реакций при образовании самых распространенных промышленно значимых минералов Au и Sn – еще один **геохимический фактор**, действие которого препятствовало появлению крупных совместных скоплений металлов, но уже на этапе рудоконцентрирования.

4. В качестве возможного варианта, объясняющего появление на верхних этажах земной коры специализированных на Au или Sn гранитоидных серий, предложено рассмотреть влияние геодинамических обстановок на транспорт металлов ФМК со следующими сценариями развития событий. В условиях растяжения образование магмогенерирующих очагов инициировалось восходящими интрателлурическими потоками на больших (до 100 км) глубинах, а подъем магм в близком по плотности субстрате осуществлялся с невысокой скоростью. Длительность продвижения ФМК в условиях относительно закрытых систем создавала возможности для опережающего удаления водорода из их головных частей за счет “фильтрационного эффекта”, проявлявшегося на фоне дифференциации компонентов воды в расплаве. Это могло приводить к смещению восстановительного потенциала магм в сторону окислительных значений и появлению на верхних этажах земной коры гранитоидов магнетитовой серии, потенциаль-

но золотоносных. В обстановках же сжатия заложение очагов происходило на меньших (до 50 км) глубинах в участках разуплотнения под тектоноформами выжимания. Время достижения ФМК верхних этажей земной коры при этом значительно сокращалось вследствие уменьшения глубин магмогенерации и возрастания скоростей подъема магм за счет подключения к “всплывавшему” расплаву механизма “выдавливания”. Это позволяло расплавам сохранять изначально присущий очагам магмогенерации восстановительный режим до уровней кристаллизации с последующим формированием гранитоидов ильменитовой серии, потенциально оловоносных. В условиях смены геодинамических режимов верхних этажей земной коры могли достигать расплавы с промежуточными значениями редокс-потенциала (и возможностью для синхронного накопления металлов во флюидной фазе) или разъединенные во времени их порции, различающиеся окислительно-восстановительным потенциалом (и специализацией).

5. Присутствие минеральных форм одного из металлов в рудных сообществах другого обусловлено разными причинами. Только для части таких случаев может быть подтверждена их связь с деятельностью единых ФМС. Возможен при этом вариант совмещения разнометалльных сообществ в связи с появлением на уровнях рудоконцентрирования контрастных по редокс-потенциалу, но разъединенных во времени порций расплавов, генерируемых единым очагом. Вероятны, но трудно выявляемы, случаи совмещения разнометалльного оруденения в связи с явлениями регенерации золоторудных концентраций оловоносными ФМС. Однако чаще сонахождение таких проявлений в рудных узлах и полях, вероятно, связано с деятельностью разновременных ФМС.

6. Периоды формирования золото- и оловоконцентрирующих ФМС отражают специфику геодинамических режимов в истории развития крупных структурно-металлогенетических элементов подвижных зон Земли.

Работа выполнена при содействии совместного фонда РФФИ-ДВО РАН (грант № 06-05-96013), Интеграционного научного проекта № 06-П-СО-08-029 ДВО РАН – СО РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бортников Н.С., Брызгалов И.А., Кривицкая Н.Н. и др. Майское многоэтапное прожилково-вкрапленное золото-сульфидное месторождение (Чукотка, Россия): минералогия, флюидные включения, стабильные изотопы (О и S), история и условия образования // Геология руд. месторождений. 2004. Т. 46, № 6. С. 475–509.
2. Волохов И.М. Магмы, интрателлурические растворы и магматические формации. Новосибирск: Наука, 1979. 167 с.
3. Гаврилов В.И., Онихимовский В.В. Связи олова и золота // Сов. геология. 1982. № 10. С. 63–68.
4. Гамянин Г.Н., Бахарев А.Г., Горячев Н.А., Алпатов В.В. Мезозойская металлогения золота и серебра Северо-Востока Азии // Геология и тектоника платформенных и орогенных областей Северо-Востока Азии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1999. С. 136–141.
5. Гамянин Г.Н., Горячев Н.А., Бахарев А.Г. и др. Условия зарождения и эволюции гранитоидных золоторудно-магматических систем в мезозоидах Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. 196 с.
6. Гоневчук В.Г., Худоложкин В.О., Гоневчук Г.А. Окислительно-восстановительные условия образования гранитоидов ильменитовой и магнетитовой серий // Тихоокеан. геология. 1992. № 1. С. 23–30.
7. Гоневчук В.Г. Оловоносные системы Дальнего Востока: магматизм и рудогенез. Владивосток: Дальнаука, 2002. 298 с.
8. Горячев Н.А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 210 с.
9. Коваленкер В.А. Минералого-геохимические закономерности формирования эпитермальных руд золота и серебра: Автореф. дис.... д-ра геол.-минер. наук. М.: ИГЕМ РАН, 1995. 103 с.
10. Летников Ф.А. Сверхглубинные флюидные системы Земли и проблемы рудогенеза // Геология руд. месторождений. 2001. Т. 43, № 4. С. 291–307.
11. Маракушев А.А. Петрогенезис и рудообразование. М.: Наука, 1979. 262 с.
12. Маракушев А.А., Сук Н.И., Новиков М.П. Хлоридная экстракция рудогенных металлов и проблема их миграции из магматических очагов // Докл. РАН. 1997. Т. 352, № 1. С. 83–86.
13. Моисеенко В.Г. Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока. М.: Наука, 1977. 304 с.
14. Моисеенко В.Г., Сахно В.Г., Хомич В.Г., Малахов В.В. Вулканизм, флюиды и оруденение в зоне перехода от Тихого океана к континентам // Геохимическая модель земной коры и верхней мантии в зонах перехода от континентов к Тихому океану. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 94–99.
15. Некрасов И.Я. О соотношении золотого и оловянного оруденения // Геология руд. месторождений. 1973. Т. 15, № 3. С. 16–23.
16. Некрасов И.Я. Олово в магматическом и постмагматическом процессах. М.: Наука, 1984. 239 с.
17. Некрасов И.Я. О причинах совмещения оловянной, серебряной и золотой минерализации в месторождениях Тихоокеанского рудного пояса // Геология руд. месторождений. 1990. Т. 32, № 1. С. 98–104.
18. Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 303 с.
19. Рехарский В.И., Диков Ю.П. Проблема концентрирования и рассеяния рудогенных и петрогенных элементов в геохимических системах // Геология руд. месторождений. 2004. Т. 46, № 2. С. 147–157.
20. Романовский Н.П. Магнитная восприимчивость и некоторые металлогенетические особенности гранитоидов Востока СССР // Сов. геология. 1976. № 12. С. 64–77.

21. Романовский Н.П. Петрофизика гранитоидных рудно-магматических систем Тихоокеанского пояса. М.: Наука, 1987. 192 с.
22. Сидоров А.А., Волков А.И. Уникальный рудный район Чукотки (Северо-Восток России) // Тихоокеан. геология. 2001. Т. 20, № 4. С. 3–18.
23. Сущевская Т.М. Оценка рН и Eh рудоносных гидротермальных растворов по данным о составе включений // Условия образования рудных месторождений. М.: Наука, 1986. Т. 2. С. 503–508. (Тр. VI симпози. МАГРМ).
24. Тюкова Е.Э. Минералого-генетические особенности месторождений Пионерского рудного узла (Северо-Восток СССР). Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1989. Ч. 1. 60 с.
25. Фатьянов И.И., Хомич В.Г. К проблеме формирования золотоконцентрирующих рудно-магматических систем // Золотое оруденение и гранитоидный магматизм Северной Пацифики. Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1997. С. 179–180.
26. Фатьянов И.И., Хомич В.Г. Бекчиулское золотоносное вулканоплутоническое сооружение: магматические ассоциации, особенности развития, схема формирования (Нижнее Приамурье) // Тихоокеан. геология. 1997. Т. 16, № 1. С. 32–44.
27. Фатьянов И.И., Хомич В.Г. К проблеме взаимоотношений флюидной и магматической составляющих в золотоконцентрирующих рудно-магматических системах // Закономерности строения и эволюции геосфер: IV междунар. междисциплинар. науч. симпози. Хабаровск, 1998. С. 272–274.
28. Хомич В.Г. Металлогения вулканоплутонических поясов северного звена Азиатско-Тихоокеанской мегазоны взаимодействия. Владивосток: Дальнаука, 1995. 343 с.
29. Эйриш Л.В. О связи золотого оруденения с магнитными гранитоидами // Тихоокеан. геология. 1983. № 4. С. 64–68.
30. Ishihara S. Lateral variation of magmatic susceptibility of the Japanese granitoids // J. Geol. Soc. Jap. 1979. V. 85, N 8. P. 509–523.
31. Ishihara S., Sawata H., Takahashi M. The magnetite-series and ilmenite-series granitoids and their bearing on tin mineralization, particularly of the Malay Peninsula region // Malays. Bull. 1979. N 11. P. 103–110.
32. Petryshchevsky A.M., Khomich V.G., Boriskina N.G. Deep Metallogenic Speciality of Lithosphere in Amur Province, Russia // J. Geosci. Res. NE Asia. 2003. V. 6, N 2. P. 166–174.
33. Takahashi M., Aramaki S., Ishihara S. Magnetite-series and ilmenite-series vs. I-type/S-type granitoids // Granitic magmatism and related mineralization. Mining Geology Special Issue, Tokyo, 1980. N. 8. P. 13–28.

*Рекомендована к печати Н.А. Горячевым*

*I.I. Fatyanov, V.G. Khomich*

### **The problem of specialization of granitoid fluid-magmatic systems regarding gold or tin (as exemplified by the Russian Far East)**

Not only the heterogeneous structure of the Earth's crust and upper mantle resulting in diverse sources of magmas and ore elements, but also different geochemical properties of Au and Sn are responsible for isolation of their large concentrations followed by the formation of independent metallogenic provinces, zones, and ore clusters. During transportation of Au and Sn by fluid-magmatic columns, the polarizing impact on metal mobility manifested itself in their different relation to silicate-forming melt clusters, oxygen, and other strong oxidizers. This impact favored individualization of migration ways of the elements to the levels of ore concentration. By the moment when the ore-bearing fluids became isolated, the metallogenic specific character of the melts, contrasting in their redox potential, had been already defined. This is confirmed by the dominating association of tin mineralization with granitoids of the ilmenite series; and gold mineralization, with the magnetite series. The fluid-magmatic systems with an intermediate degree of the melts reduction-oxidation could be potential producers of the combined metal concentrations. In these cases, however, the combined concentrating of tin and gold was hampered by the reverse direction of oxidation-reduction reactions when their most common minerals formed: the basic migration form of tin  $\text{Sn}^{+2}$  must be oxidized (with cassiterite isolation), and the forms of gold –  $\text{Au}^+$  or  $\text{Au}^{+3}$  must be reduced (with metal isolation in its native form). Probably, that is why the combined tin and gold concentrations are dominated by one of the metals with a tendency of their accumulation in different-stage mineral complexes. The degree of oxidation-reduction of melts which "regulated" the migration activity of the metals, depended on the duration of the fluid-magmatic column movement to the levels of ore concentration – the function of the depth of their origin and the rate of movement which were controlled by geodynamic regimes.

**Key words:** gold, tin, granitoids, fluid-magmatic systems, oxidation-reduction potential, the Russian Far East.