

УДК: 552.3:550.4:550.42:550.93

## ПЕТРОЛОГИЯ ЗОЛОТОГЕНЕРИРУЮЩИХ ГРАНИТОИДОВ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

Гусев А.И.

*Алтайская государственная академия образования им. В.М. Шукшина, Бийск,  
e-mail: anzerg@mail.ru*

Приведены данные по петрологии, геохимии, флюидному режиму золотогенерирующих гранитоидов Алтае-Саянской складчатой области. Гранитоиды отнесены к петрогенетическим типам: I, AD, SH. В них выявляются различная степень контаминации корового материала, восстановленность и окисленность магматогенных флюидов. Генерация золотогенерирующих гранитоидов происходила в процессе мантийно-корового взаимодействия. Геодинамическая обстановка связана с плюмовой активностью и выбросом в области магмо-и рудогенерации мощных инъекций мантийных восстановленных флюидов.

**Ключевые слова:** петрогенетические типы гранитоидов, I, AD, SH типы гранитов, геохимия, плавление мантийных источников, контаминация, плюмтектоника

## PETROLOGY OF GOLD-GENERATION GRANITOIDS OF ALTAI-SAJAN FOLDED PROVINCE

Gusev A.I.

*The Shukshin Altai State Academy of Education, Biisk e-mail: anzerg@mail.ru*

Data on petrology, geochemistry, fluid regime of gold-generation granitoids Altai-Sajan folded province lead. Granitoids refer to petrogenetic types: I, AD, SH. Different degrees contamination of crust material by mantle magmas, reduction and oxidation of magmatic fluids revealed. Generation of gold generating granitoids took place in process mantle-crust interaction. Geodynamic setting related with active plum and exclusion in area magmo- and ore generating powerful injection of mantle reduced fluids.

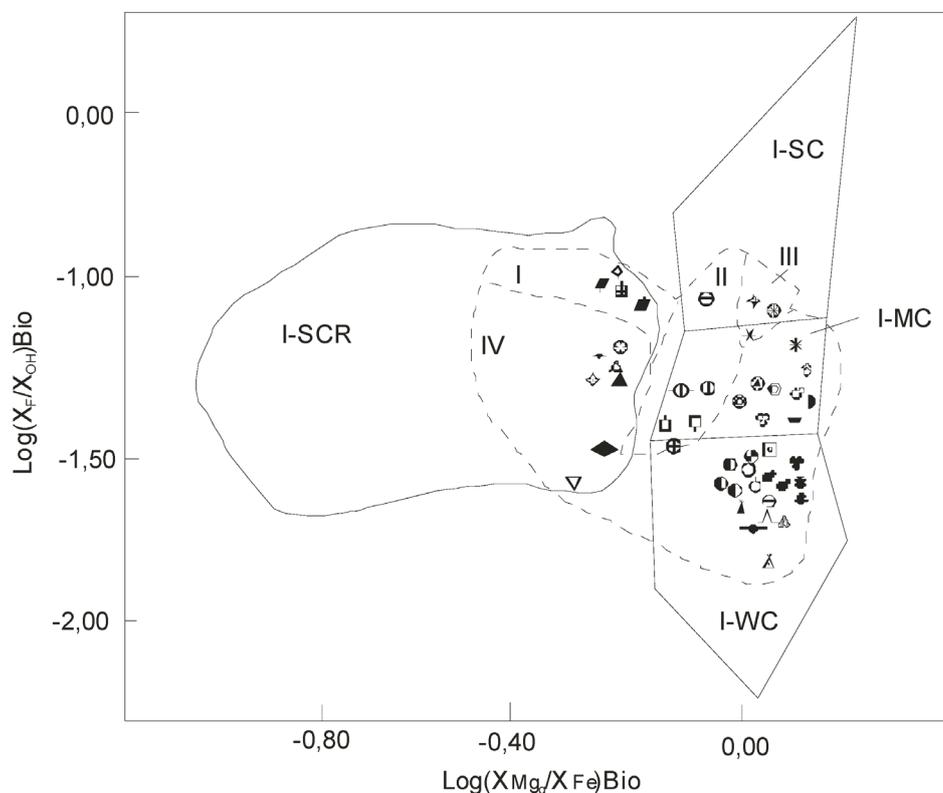
**Keywords:** petrogenetic types granitoids, I, AD, SH- types granites, geochemistry, melting of mantle sources, contamination, plumbtectonic

Гранитоидные плутоны, малые интрузии и дайки, генерирующие золотое оруденение, характеризуются специфическими особенностями. Они относятся к габбро-плагиогранитовым, габбро-диорит-тоналитовым, реже гранодиорит-гранитовым формационным типам. Петрологические особенности таких магм играют важную роль в генерации оруденения и их изучение является актуальным. Гибридный характер этих магм обусловлен процессами глубинного мантийно-корового взаимодействия, синтексиса, а потенциальная рудогенерирующая способность определяется сложными сценариями экстракции компонентов из расплавов под воздействием летучих компонентов. Цель исследования – выявить петрологические особенности золотогенерирующих гранитоидов Алтае-Саянской складчатой области.

### Петрология золотогенерирующих гранитоидов

Большая группа гранитоидов золотосодержащих магмо-рудно-магматических систем (МРМС) Алтае-Саянской складчатой области (АССО): относится к слабо контаминированному I типу (рисунок): Беркульской, Центральнинской, Федоровской

(Кузнецкий Алатау), Кварцитовой Сопки (Салаир), Майской (Горная Шория), Синохинской (Горный Алтай), Дарасунской (Забайкалье). На Урале к этому типу относится Пластовская МРМС. Отношение изотопов стронция ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) в гранодиоритах, тоналитах, плагиогранитах этих систем варьируют от 0,70450 до 0,70610, указывая на мантийную природу. Гранитоиды анализируемого типа принадлежат к I-типу Sr-недеплементированному, Y-деплементированному [2, 3] в понимании Л. Вайборна и др. [14]. Выплавление их происходит из верхнемантийного источника, обогащенного гранатом, что подтверждается деплементированностью на иттрий. При глубинном синтексисе и последующей раскристаллизации таких расплавов образуются многофазные интрузии, в которых темноклетчатые минералы – биотит и, особенно роговая обманка, обогащены золотом [1-3]. Преобладающая часть гранитоидов вышеперечисленных систем характеризуется высокой восстановленностью флюидов, а их кристаллизация происходила в промежуточных условиях между никель-бунзениновым и магнетит-гематитовым буферами при температурах от 740 до 850 °C и давлениях 1,5-2,2 МПа.



- 1 ⊕ 2 × 3 ▲ 4 ◆ 5 ○ 6 ⊖ 7 ⊗ 8 ⊙ 9 ✦ 10 ⊕ 11 \* 12 ▣ 13 ▲ 14 ◇ 15 ▼ 16 ⊗ 17 ⊕ 18  
 ⊕ 19 ▽ 20 ◆ 21 ▲ 22 ✦ 23 ⊗ 24 ⚡ 25 ⊙ 26 ⊕ 27 ▲ 28 ▲ 29 ▲ 30 ▼ 31 ◆ 32 ▣ 33 ▣ 34  
 ⊙ 35 ⊙ 36 ○ 37 ⊕ 38 ▲ 39 ⊕ 40 ▣ 41 ◆ 42

Диаграмма  $\text{Log}(X_{Mg}/X_{Fe}) - \text{Log}(X_F/X_{OH})$  в биотитах гранитоидов, генерирующих различные типы оруденения.

Петрогенетические типы гранитоидов по [10]: I-WC – I тип слабо контаминированный; I-MC – I тип умеренно контаминированный; I-SC – I тип сильно контаминированный; I-SCR – I тип сильно контаминированный и редуцированный. Поля гранитоидов, с которыми связано оруденение (выделены автором): I – медно-порфировое и медно-золото-порфировое; II – скарновое железорудное; III – золоторудное (мелкие месторождения и проявления); IV – золоторудное (средние, крупные и уникальные месторождения), золото-медно-скарновое, золото-платинометалльное. Гранодиориты магмо-рудно-метасоматических систем: 1 – Бериккульской, 2 – Фёдоровской, 3 – Натальевской, 4 – Центральнинской (Кузнецкий Алатау); 6 – Кварцитовая Сопки (Салаир); 9 – Тарданской (Тува); 13 – Ольховской (Восточный Саян); 14 – Синюхинской, 15 – Даек Синюхинской, 16 – Арганакской, 21 – Чойской, 24 – даек Караминской (Горный Алтай); 31 – Сухого Лога (Забайкалье); 30 – Олимпиадинской (Енисейский Кряж); 32 – Мурунтау (Узбекистан); 33- Тельбесской, 35 – Таштагольской (Горная Шория); 34 – Саксырской (Кузнецкий Алатау); 37 – Моджейв Дисот (Калифорния, США); кварцевые диориты: 5 – даек Центральнинской (Кузнецкий Алатау); 36 – Ванкувер Айленд (Канада); 38 – Сарбайской (Казахстан); тоналиты: 7 – Майской (Горная Шория); 11 – Зун-Холбинской (Восточный Саян); монзониты: 8 – даек Майской (Горная Шория); 19 – Югалинской (Горный Алтай); монцодиориты: 10 – Зубовской (Тува); 39 – Санта Рита (Нью Мексика, США); 40- Чукикамата, 41 – Эль-Сальвадор (Чилийские Анды); 42 – Лоун Стар (Аризона, США); гранит-порфиры: 12 – даек Зун-Холбинской (Восточный Саян); кварцевые монзониты: 18 – Ульменской, 20 – Югалинской, 25 – Караминской (Горный Алтай); плагиограниты: 26 – Дарасунской (Забайкалье); 27 – Бакырчикской (Казахстан); 28 – Пластовской, 29 – Воронцовской (Урал)

Для них типичны высокие фугитивности воды, соляной кислоты и низкие значения  $fO_2$ . Исключение составляют тоналиты и гранодиориты Синюхинской МРМС, которые кристаллизовались в обстановке повышенной  $fO_2$  выше магнетит-гематитового буфера и сравнительно невысокой летучести воды (температуры кристаллизации 830-845 °С, давления 1,3-1,5 МПа). Специфические особенности флюидного режима Синюхинской МРМС отразились на её металлогении. Наряду с золотом, она генерировала и медное оруденение, которое характерно для более окисленного состояния магмы [2, 3]. Из аксессуаров в синюхинских гранитоидах присутствуют пирит и магнетит. Золото концентрируется в дисульфиде железа (до 70 мг/т), превышая на порядок величины содержания металла в магнетите (4-8 мг/т). Установлено, что если золото предпочтительней концентрируется в магматических сульфидах, чем в магнетите, то такие высоко окисленные магмы I-типа будут благоприятны для генерации медных и золото-обогащенных месторождений [5]. Другим специфическим объектом рассматриваемой группы РМС следует считать Дарасунский. Наряду с плагиигранитами на месторождении развиты граносиениты, сиенодиориты, граниты, обнаруживающие близость к шошонитовой серии. Кроме того, во флюидах всех интрузивных пород значительную роль играли комплексы бора. Высокая бороносность магматических флюидов Дарасунской РМС характерна также и для гидротермальных растворов, выразившаяся в обширных полях турмалинизации, сопровождающих золоторудные жилы. Высокая бороносность это один из главных признаков шошонитовой серии гранитоидов.

В группу гранитоидов I типа умеренно контаминированного (рис. 1) попадают РМС: Натальевская (Кузнецкий Алатау), Тарданская (Тува), Ольховская, Зун-Холбинская (Восточный Саян), Югалинская, Ульменская, Караминская (Горный Алтай). Соотношение изотопов  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  более высокое, чем в предыдущей группе РМС (от 0,70550 до 0,70812). Мультиэлементная модель умеренно контаминированных гранитоидов позволяет их относить к Sr-деплементированному и Y-деплементированному I-типу [2, 3]. Такая модель указывает на выплавление магм из верхнемантийного источника, в котором одновременно присутствовали гранат и плагиоклаз [14], а возможно, происходила контаминация мантийной магмой корово-

го материала, обогащенного плагиоклазом. Присутствие последнего в протолите обуславливает появление в дифференциатах этой группы РМС более фельзических интрузивных фаз (гранитов и лейкогранитов). По параметрам флюидного режима гранитоидов в характеризуемой группе МРМС отмечаются широкие вариации. Наиболее продуктивные гранит-аплиты Зун-Холбинского месторождения кристаллизовались при температурах 700-730 °С, и давлениях выше 6 МПа. Они характеризуются максимальными величинами восстановленности флюидов, низкими значениями  $fO_2$ , очень высокими летучестями  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$  и парциальными давлениями  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ . Оптимальное сочетание параметров флюидного режима определяет поле кристаллизации таких пород вблизи никель-бузениитовой буферной смеси. Высоко восстановленное состояние магматического расплава создаёт условия для кристаллизации таких аксессуаров, как ильменит и пирит. В сильно восстановленных магмах сера присутствует в виде  $\text{HS}^-$ , который более растворим в силикатных расплавах и способствует образованию сульфидных глобулей, захватывающих золото из расплава. Содержание золота в пирите гранит-аплитов Зун-Холбинского месторождения составляет 10-20 мг/т при общем количестве дисульфида железа не более 0,5%. В силу дефицита серы в расплаве, основная масса золота экстрагируется в гидротермальные растворы после полной раскристаллизации пород. Биотиты гранит-аплитов характеризуются самыми высокими уровнями условного потенциала ионизации из всех известных золотогенерирующих гранитоидов, что указывает на более кислотную среду их кристаллизации. Высокая активность  $\text{HCl}$  во флюидах предполагает существенную роль хлоридных комплексов, являющихся одними из главных в переносе золота в гидротермальных растворах. Известно, что переход хлора во флюидную фазу является функцией режима воды в магматическом процессе. Отделение водной газовой фазы от расплава, вследствие очень высоких коэффициентов распределения хлора между расплавом и газовой фазой, приводит к интенсивному высвобождению хлора из магмы. Последний, в силу высокой активности в случае Зун-Холбинской МРМС, образовывал комплексы, которые экстрагировали золото из расплава. Это, вероятно, способствовало генерации концентрированного и масштабного оруденения в благоприятных условиях на Зун-Холбинском месторождении.

Среди золотоносных гранитоидов сильно контаминированного I- типа (рисунок) отмечены малопродуктивные монцониты Майской РМС (Горная Шория), монцодиориты Зубовского участка Тарданской МРМС (Тува), сиениты Ульменской МРМС (Горный Алтай). Они сформировали мелкие месторождения золота. Сильная контаминация мантийной магмой корового материала, вероятно, не способствует образованию масштабного золотого оруденения. Несмотря на то, что интрузии анализируемых МРМС классифицируются I – типом Sr – деплетированным, Y – деплетированным и характеризуются высокой восстановленностью флюидов, как и предыдущая группа МРМС, в них заметно пониженная фугитивность HCl. Вероятно последнее обстоятельство было решающим в масштабах экстракции золота из расплава.

В группе сильно контаминированного и редуцированного I типа оказались гранодиориты, сиениты, лейкограниты Чойской и Караминской РМС Горного Алтая. Соотношение изотопов  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  оценивается в них от 0,70618 до 0,70786. Это I-тип Sr- недеплетированных и Y-недеплетированных гранитоидов, формировавшихся в результате плавления плагиоклаз-содержащего протолита и сильной контаминации корового материала. Термодинамические параметры анализируемых магматитов оцениваются в 610-730 °C и общих давлениях 1÷3 МПа при кристаллизации в промежуточных условиях между никель-бунзенитовой и магнетит-гематитовой буферными смесями. Высокая восстановленность флюидов и повышенная фугитивность HCl способствовали формированию золотого оруденения. Однако дефицит  $\text{HS}^-$  и некомплексированность с хлоридами в расплавах анализируемой группы гранитоидов не способствовали формированию крупных месторождений в изученных МРМС [5].

Во всех группах МРМС встречаются дайки «второго этапа», сопровождающие золотогенерирующие плутоны и интрузии. На некоторых из них они составляют до 40-60% по объему в разрезе (Синюхинская, Центральнинская, Зун-Холбинская, Чойская, Дарасунская МРМС и др.). Существенно то, что при формировании даек создавался более оптимальный режим флюидов, чем при становлении плутонов. Вероятно, остаточные глубинные расплавы, из которых возникали порфировые дайковые комплексы, имели более высокие значения летучестей, парциальных давлений воды,

углекислоты, HCl и были более агрессивны в экстрагировании металлов из расплавов (Синюхинская, Чойская, Центральнинская Дарасунская МРМС и др.). Во многих МРМС отмечается более тесная связь золотого оруденения с дайками, биотиты, роговые обманки, сульфиды которых обогащены золотом, чем с плутонами [2]. Этот вывод подтверждает результаты, полученные при изучении петрогенезиса гранитоидных пород – отделение гидротермальных флюидов на поздних этапах эволюции глубинных очагов создает более концентрированные флюидные системы, обогащенные различными металлами [5, 9, 11, 12, 13].

Особую группу золотогенерирующих магматитов составляют сильно восстановленные гранитоиды адакитового типа (AD-тип), представителем которых является Бакырчикская МРМС Казахстана. По составу адакитовые гранитоиды Калбы относятся к тоналит-гранодиоритовой серии магматитов, для которых применима метабазитовая модель формирования, предусматривающая возможность образования тоналит-плагиогранитоидных магм при дегидратированном плавлении мафических субстратов в диапазоне давлений от 3 до 25 кбар и температурах 900-1100 °C. По изотопно-геохимическим данным плагиогранитоиды кунушского комплекса относятся к  $+\epsilon_{\text{Nd}}$  – типу ( $\epsilon_{\text{Nd}}(0)=+3,8$ ;  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)=+6,7$ ), а по петрогеохимическим – к высокоглинозёмистым плагиогранитам. Необходимым условием генерации плагиогранитоидов такого типа служит высокое давление (больше или равное 10-12 кбар) и равновесие расплава с гранатсодержащим реститом [5].

К шошонитовому типу (SH) гранитоидов относится караминский комплекс даек (диоритов, кварцевых сиенитов, спессаритов, гранит-порфиров, лейкогранитов) месторождения Лог № 26 (Горный Алтай) [7]. На спайдер-диаграммах нормированных по примитивной мантии элементов для даек караминского комплекса нет ясно выраженного деплетирования по неодиму, и не отчётливое деплетирование по танталу, указывающего на возможную близость даек караминского комплекса к формированию за счёт метасоматически изменённых расплавов и флюидов, высвобождавшихся из субдуцирующего слэба. Обогащение LILE, LREE и HFSE деплетирование в породах даек подтверждают, что источником плавления их были композиционно близкие породы мантийного клина. По соотношению La – Nb породы даек кара-

минского комплекса в большинстве случаев тяготеют к литосферному источнику, а спессартиты и умеренно-щелочные лейкограниты – к астеносферному источнику. Следовательно, неоднозначные геодинамические обстановки генерирования даек предполагают участие не только ювенильных мантийных источников плавления для спессартитов и умеренно-щелочных лейкогранит-порфиоров, но и процессы мантийно-корового взаимодействия в становлении остальных разностей дайковых пород.

### Интерпретация результатов

Гранитоиды рассмотренных ассоциаций классифицируются I- SH- и AD-типами, являющимися мантийными магмами с различной степенью контаминации корового материала [5]. Их генерация происходила в процессе мантийно-корового взаимодействия по различным сценариям: контаминация корового материала, синтексис. Астеносферно-литосферные процессы, наблюдаемые в золотогенерирующих гранитоидах, сопровождалась мощными импульсами восстановленных мантийных флюидов, обеспечиваемых плюмами. Отмечается весьма благоприятный режим сильной контаминации углеродистых компонентов коры мантийными магмами, что способствовало переносу золота в последующих гидротермальных растворах и комплексах с углеродом. Это обеспечивало формирование крупных золото-черносланцевых месторождений мирового класса Мурунтау и Барырчик [4 – 6].

### Заключение

Главные золотогенерирующие гранитоиды в АССО представлены петрогенетическими типами: I, AD, SH. Глубинные петрологические условия генерации золотогенерирующих гранитоидов в АССО для всех петрогеохимических типов обеспечивались функционированием плюмовых обстановок. Это приводило к астеносфер-

но-литосферному взаимодействию в формировании золотогенерирующих глубинных очагов с участием мощных инъекций восстановленных мантийных флюидов.

### Список литературы

1. Гусев А.И. Интрузивный магматизм Синюхинского золоторудного узла // Геология и геофизика, 1994. – № 11. – С. 28-40.
2. Гусев Н.И., Гусев А.И. Золотогенерирующие рудно-магматические системы Горного Алтая // Руды и металлы, 1998. – № 2. – С. 67-78.
3. Гусев А.И., Гусев Е.А. Некоторые петрохимические особенности золотоносных гранитоидов Алтае-Саянской складчатой области // Руды и металлы, 2000. – № 5. – С. 25-32.
4. Гусев А.И., Коробейников А.Ф. Мантийно-коровое взаимодействие в генерации различных типов оруденения: геофизический и петрологический аспекты // Известия Томского политехнического университета, 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 18-25.
5. Гусев А.И. Петрология золотогенерирующего магматизма. – М.: Изд-во РАЕ, 2012. – 160 с.
6. Гусев А.И., Гусев Н.И. Флюидный режим и петрология шохонитовых гранитоидов супергигантского золоторудного месторождения Мурунтау // Фундаментальные исследования, 2012, № 6 (часть 1). – С. 13-18.
7. Гусев А.И., Гусев Н.И., Табакаева Е.М., Дзагоева Е.А., Кукоева М.А. Петрология и рудоносность магмо-рудно-метасоматических систем Солонешенского рудного района Алтая. – Бийск: АГАО, 2013. – 204 с.
8. Коробейников А.Ф., Гусев А.И. Поведение золота в расплавах и особенности его фракционирования // Известия Томского политехнического университета, 2013. – № 1. Т.323. – С. 142-148.
9. Шилин Н.Л., Колосков А.В. Об источниках золота в гранитоидных магмах // Изв. АН СССР, сер. геол., 1982. – № 3. – С. 49-58.
10. Ague J.J., Brimhall G.H. Regional variations in bulk chemistry, mineralogy, and compositions of mafic and accessory minerals in the batholiths of California // Bull. Geol. Soc. Amer., 1988. – V. 100. – № 6. – Pp. 891-911.
11. Candella P.A., Whitney J.A., Naldrett A.J. Felsic magmas, volatiles, and metallogenesis // Ore Deposition Associated with Magmas: Reviews in Economic Geology, 1989. – V.4. – Pp. 222-233.
12. Gusev A.I. The petrology of gold-generating granitoids of Russia // International journal of applied and fundamental research, 2008. – № 3. – P.58-61.
13. Meinert L.D. Igneous Petrogenesis and Skarn Deposits / Mineral Deposit Modeling. Geological Assoc. of Canada Special Paper. – V.40. – Canada, Ontario, 1995. – Pp. 569-583.
14. Wyborn L.A.I., Wyborn D., Warren R.G., Drummond D.J. Proterozoic granite types in Australia : implications of lower crust composition, structure and evolution // Trans. Royal. Edinburgh : Earth Sciences. 1992. – V. 83. – Pp.201-209.