

УДК 552.164:550.42

## РОЛЬ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЗОЛОТА В УЛЬТРАМАФИТАХ БАЙКАЛО-МУЙСКОГО ОФИОЛИТОВОГО КОМПЛЕКСА

А.И. Чернышов\*, Е.Е. Пугачева\*\*

\*Томский государственный университет, \*\*Томский государственный педагогический университет  
E-mail: petro@ggf.tsu.ru

*Рассматривается распределение золота в пластически деформированных ультрамафитах Байкало-Муйского офиолитового комплекса. Показана анизотропная деформационная структура Парамского и Шаманского ультрамафитовых массивов, сформировавшаяся в процессе их мантийно-коровой эволюции. Проведена типизация и динамокинематическая интерпретация микроструктур оливина. Анализ распределения золота в ультрамафитах позволил выявить определяющую роль пластических деформаций в его ремобилизации и перераспределении. Значительная миграционная подвижность золота устанавливается в породах, претерпевших синтетектоническую рекристаллизацию в условиях земной коры в режиме широких вариаций температур ( $T \approx 1000...500$  °C), больших напряжений (100...120 МПа) и высокой скорости деформации (до  $10^{-2}$  с $^{-1}$ ). Аномально высокие содержания золота выявлены в ультрамафитах, испытавших наиболее интенсивные пластические деформации.*

В последние годы обсуждается проблема о мантийном источнике благородных металлов [1–3]. В ультрамафитах офиолитовых комплексов фоновые содержания золота варьируют в широких пределах и, как правило, оказываются выше кларковых [1, 4]. Существует мнение, что породы офиолитовых комплексов являются первоисточником рудопроявлений и месторождений золота [5].

Целью настоящей работы является выявление роли пластических деформаций в перераспределении и сегрегировании золота в процессе эволюции вещества верхней мантии на примере ультрамафитов Парамского и Шаманского массивов Байкало-Муйского офиолитового комплекса (рис. 1).

### Внутренняя деформационная структура ультрамафитовых массивов

Парамский и Шаманский ультрамафитовые массивы располагаются на восточном фланге Байкало-Муйского офиолитового пояса [6, 7]. В структурном плане ультрамафиты приурочены к Муйской структурно-фациальной зоне внутреннего пояса байкалитид, которая прослеживается вдоль восточной окраины архейского кристаллического фундамента, представленной Северо-Муйской и Южно-Муйской глыбами [8]. Эта зона включает фрагменты тектонически сближенных палеоостроводужных систем, границы между которыми представлены сутурами, являющимися зонами субдукции [9]. При этом "офиолиты входили в состав аккреционных призм островных дуг и в процессе коллизии были выведены на поверхность" [9, С. 83]. В настоящее время сутуры картируются зонами глубинных разломов и маркируются массивами ультрамафитов.

Структурно-петрологическим исследованием в ультрамафитах изученных массивов выявлены иерархические ряды структурных форм и элементов, отражающие тектонические события двух этапов – протометаморфического и синметаморфического, объединяемых в единый тектоно-деформационный цикл [10]. Наиболее ранним структурным элементом является полосчатость, обусловленная неравномерным распределением ортопироксена в

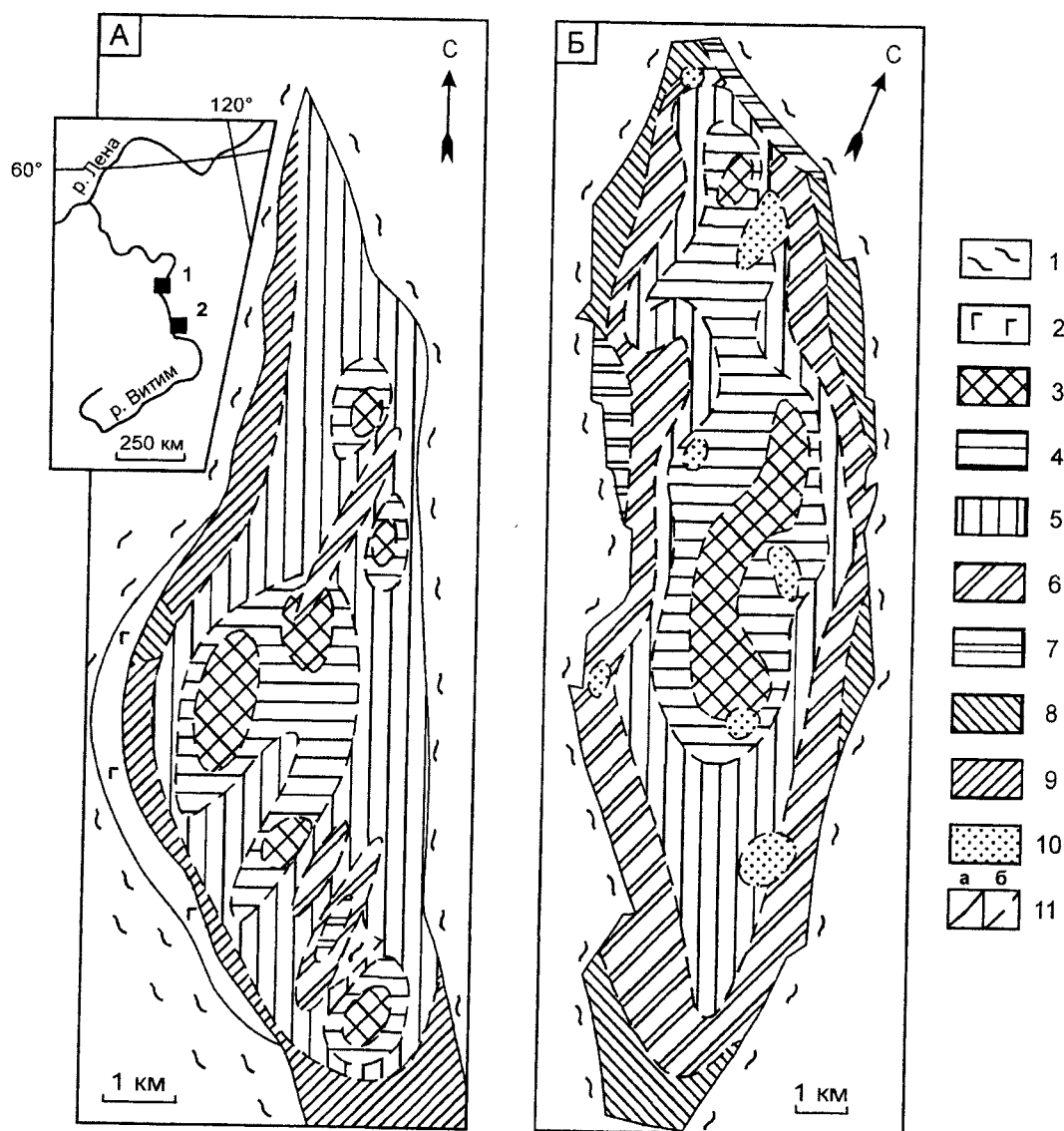
ультрамафитах, пространственная ориентировка которой фиксируется в складках цилиндрического типа. Динамическая обстановка на ранних стадиях протометаморфического этапа соответствовала уровню верхней мантии и способствовала послонд-сдвиговому вязкопластическому течению мантийного рестита с формированием полосчатого дунит-гарцбургитового субстрата [11]. Формирование складчатой структуры отражает подъем мантийного диапира в условиях океанического спрединга [12, 13].

Синметаморфический этап обусловлен перемещением и консолидацией ультрамафитов в структурах земной коры. Перемещение осуществлялось по зоне глубинного надвига и сопровождалось их пластическими деформациями сдвигового и взбросо-сдвигового характера. В условиях возрастающей роли стресса и дифференциальных напряжений образовались линейные структуры пластического течения и складки конического типа. На уровнях консолидации интенсивное пластическое течение происходило преимущественно в субгоризонтальном направлении, согласно структурам, контролирующим размещение массивов, и в режиме сочетания осевых и сдвиговых деформаций. В результате синметаморфических процессов сформировались конформные изоклинально-складчатые и линейные структуры в ультрамафитах и породах обрамления.

Установленное поэтапное развитие пластической деформации ультрамафитов Парамского и Шаманского массивов находит отражение в разнообразных микроструктурах, типизация которых проводилась по морфологическим признакам оливина. Они объединяются в четыре основных последовательно образовавшихся типа: протогранулярный, мезогранулярный, порфирукластовый и мозаичный. Среди двух последних выделяются разновидности микроструктур со строго выраженной предпочтительной ориентировкой ленточных зерен оливина: порфиroleйстовый и мозаично-лейстовый. Правомерность существования выделенных микроструктур оливина подтверждается петроструктурными, рентгеноструктурными исследованиями и

особенностями вещественного состава [14–16]. Протогранулярный и мезогранулярный типы сформировались в глубинных мантийно-коровых условиях протометаморфического этапа, пластические деформации при этом реализовывались в режиме осевых деформаций, низкой скорости и осуществлялись, преимущественно, высокотемпературным трансляционным скольжением и статической рекристаллизацией отжига. На синметаморфическом этапе в режиме сдвиговых и осевых деформаций пластическое течение ультрамафитов обусловлено механизмом трансляционного скольжения в оливине с увеличением роли синтектонической рекрис-

таллизации. Изменение термодинамических условий способствовало эволюции микроструктур оливина с образованием порфирокластового и мозаичного типов. В зонах интенсивного сдвига пластические деформации протекали с возрастанием скорости деформаций и сопровождалась формированием порфиroleйстовых и мозаично-лейстовых микроструктур. На заключительном этапе консолидации ультрамафиты локально под термическим воздействием более поздних интрузий габбро подвергались вторичной рекристаллизации отжига с образованием мозаично-паркетовидной микроструктуры.



**Рис. 1.** Схемы динамометаморфической зональности Парамского (А) и Шаманского (Б) ультрамафитовых массивов. 1) кристаллические сланцы; 2) габбро; 3–9 – деформационные типы микроструктур оливина в дунитах и гарцбургитах: 3) протогранулярный, 4) мезогранулярный, 5) порфирокластовый, 6) порфиroleйстовый, 7) мозаично-лейстовый, 8) мозаичный, 9) мозаично-паркетовидный; 10) кляважированные ультрамафиты; 11) границы: а) геологические, б) петрографические. На врезке показано географическое положение ультрамафитовых массивов: 1) Парамский, 2) Шаманский

**Таблица 1.** Статистические характеристики распределения содержания золота (мг/т) в ультрамафитах Байкало-Муйского офиолитового комплекса

Массивы	Породы	n	min	X	max	$\sigma^2$	A	E
Шаманский	Дуниты	27	0,3	21,4	176,0	1376,4	3,2	11,8
	Гарцбургиты	74	0,2	10,7	76,8	222,2	2,4	6,5
Парамский	Дуниты	21	0,7	5,5	11,7	15,3	0,4	-1,4
	Гарцбургиты	25	0,6	10,0	33,9	98,3	1,4	0,8

Анализы выполнены в НИЛ СПМ Томского госуниверситета, метод инверсионной вольтамперометрии [23], аналитики Л.А. Швец и Н.В. Куруленко; n – количество проб; min, max – пределы измеряемых величин; X – среднеарифметические значения;  $\sigma^2$  – среднеквадратичное отклонение; A – асимметрия; E – эксцесс

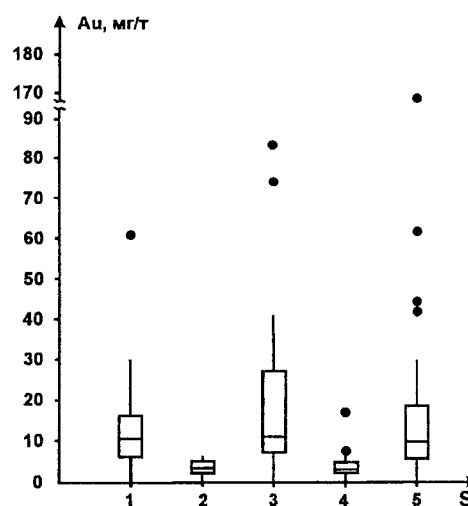
Пространственное распределение микроструктур оливина в Парамском и Шаманском массивах от центра к периферии характеризуется общей тенденцией уменьшения размера зерен в породах, выявляя динамометаморфическую зональность (рис. 1) [15], аналогичную описанную ранее для ультрамафитовых массивов других регионов [1].

#### Результаты исследований

Ультрамафиты Парамского и Шаманского массивов характеризуются неоднородным распределением золота (табл. 1). Следует отметить, что преобладающие в массивах гарцбургиты имеют близкие средние содержания элемента, а в дунитах они существенно отличаются.

Детальным исследованием установлено, что неоднородное распределение золота зависит от степени деформирования ультрамафитов, определяемой различными микроструктурными типами оливина (рис. 2; табл. 2). Исходные наименее деформированные крупнозернистые ультрамафиты с протогранулярной микроструктурой характеризуются широким диапазоном содержаний золота, при этом его средняя величина оказывается повышенной относительно фоновое содержание металла в ультрамафитах офиолитовых комплексов [2]. В мезогранулярных дунитах и гарцбургитах, пластически деформированных трансляционным скольжением, отмечается значительное уменьшение содержания золота и более однородное его распределение. Пяти, шестикратное возрастание среднего содержания золота и резкое увеличение уровня его рассеивания осуществляется в процессе синтетектонической рекристаллизации с образованием порфирокластовой микроструктуры оливина. В породах с порфиroleйстовым агрегатом оливина, наблюдаемых в линейных структурах и обусловленных сдвиговыми деформациями, происходит уменьшение концентраций до наименьшего уровня с минимальным рассеиванием. Существенное перераспределение золота со значительными вариациями его содержаний отмечается в ультрамафитах с мозаичными микроструктурами в периферийных частях массивов и центральных зонах линейных структур. При этом средняя концентрация элемента возрастает и соответствует уровню, от-

мечаемому в протогранулярных и порфирокластовых ультрамафитах. Следует отметить, что в дунитах и гарцбургитах с мозаично-лейстовой микроструктурой выявляются anomalно высокие содержания золота до 176 мг/т, а с мозаично-паркетовидной – anomalно низкие, менее 1 мг/т.



**Рис. 2.** Диаграмма распределения содержаний золота в зависимости от степени пластической деформации ультрамафитов.

Деформационные типы микроструктур оливина (S): 1) протогранулярный, 2) мезогранулярный, 3) порфирокластовый, 4) порфиroleйстовый, 5) мозаичный

#### Обсуждение результатов

Функциональная связь между фоновой золотоносностью ультрамафитов и степенью пластической деформации впервые была установлена в некоторых массивах офиолитовых комплексов Алтае-Саянской складчатой области [1].

Ультрамафиты Парамского и Шаманского массивов в процессе мантийно-коровой эволюции претерпели значительные структурно-вещественные преобразования, что находит отражение в петроструктурных особенностях оливина и химическом составе пород и их золотоносности. Пластические

Таблица 2. Статистические характеристики распределения содержания золота в зависимости от микроструктур оливина

Массивы	S	n	min	X	max	$\sigma^2$	A	E
Шаманский	1	13	0,2	19,4	64,0	278,8	1,6	3,6
	2	22	0,8	3,3	7,8	4,1	0,6	-0,7
	3	22	0,8	22,9	86,2	551,4	1,5	2,0
	4	25	0,3	2,9	17,2	11,2	3,5	14,4
	5	19	2,7	24,9	176,0	1612,2	3,3	12,2
Парамский	1	12	0,9	8,3	17,5	29,0	0,7	-0,8
	2	8	0,6	2,6	4,4	1,3	-0,3	0,8
	3	13	1,0	12,2	33,6	81,6	1,4	1,9
	4	7	1,8	3,0	5,3	1,9	1,1	-0,4
	5	6	0,7	10,8	33,9	179,5	1,3	0,6

Примечание. Деформационные типы микроструктур оливина в ультрамафитах (S, рис. 2)

деформации протометаморфического этапа осуществлялись при очень высоких температурах (1100...1400 °С), низком стрессе (10...20 МПа) и низкой скорости ( $10^{-7} \text{ c}^{-1}$ ) [17, 18]. В результате неоднородных послойно-сдвиговых деформаций происходило деплетирование вещества верхней мантии, которое сопровождалось ремобилизацией и перераспределением золота при его высоком среднем содержании в ультрамафитах с протогранулярной микроструктурой оливина (рис. 1, 2, табл. 2). В регрессивную стадию подъема мантийного диапира в условиях океанического спрединга ультрамафиты претерпели синтетектоническую рекристаллизацию, что способствовало распаду крупных индивидов оливина на равновесный мезогранулярный агрегат субизометричных зерен. В процессе пластических деформаций пород с участием метаморфогенных флюидов создавались термодинамические условия, благоприятные для выщелачивания золота [19] и повышения уровня его миграции. В процессе последующей серпентинизации, возможно, понижается фугитивность кислорода [20], что могло быть причиной осаждения золота в петельчатых лизардитовых серпентинитах, обогащенных магнетитом (до 189 мг/т).

На синметаморфическом коровом этапе в результате перемещения по глубинным надвигам ультрамафиты претерпели интенсивное пластическое течение в условиях сочетания осевых и сдвиговых деформаций, осуществлявшихся при снижении температуры ( $T \approx 1000...500 \text{ }^\circ\text{C}$ ), высоких напряжениях (100...120 МПа) и высокой скорости (до  $10^{-2} \text{ c}^{-1}$ ) [18]. Пластические деформации контролировались механизмами катакластического течения, трансляционного скольжения и, главным образом, синтетектонической рекристаллизации, существенный вклад в реализацию которых вносит химическая свободная энергия [21]. Наличие многочисленных полос излома в оливине свидетельствует о неоднородной пластической деформации кристаллического агрегата. Дифференциальные напряжения способствуют повышению подвижности золота, что фиксируется максимальной величиной его диспер-

сии в ультрамафитах с порфирокластовой микроструктурой оливина (рис. 1, 2).

При этом миграция металла, очевидно, обуславливается градиентами химических потенциалов [22]. В линейных сдвиговых зонах интенсивного пластического течения процессы перераспределения и сегрегации золота проявились наиболее контрастно. Во внешних частях этих зон в ультрамафитах с порфиroleйстовой микроструктурой отмечаются минимальные содержания золота с невысоким уровнем рассеивания, а во внутренних наиболее пластически деформированных – с мозаично-лейстовой микроструктурой средние содержания вновь возрастают, с максимальным накоплением (176 мг/т).

В процессе вторичной рекристаллизации отжига, в условиях повышения температур и увеличения количества поровых флюидов, в ультрамафитах возрастала дифференциальная подвижность элементов. В таких локальных зонах в эндоконтакте массивов происходил интенсивный вынос золота, что фиксируется его аномально низким содержанием (менее 1 мг/т) в дунитах и гарцбургитах с мозаично-паркетовидной микроструктурой.

#### Выводы

1. На основе структурно-вещественного исследования выявлена связь пластических деформаций с распределением золота в ультрамафитах Шаманского и Парамского массивов Байкало-Муйского офиолитового комплекса.
2. Установлено три максимума накопления золота. Первый из них связан с деплетированием вещества верхней мантии и формированием мантийного рестита в условиях высокотемпературных пластических деформаций. Два других обусловлены процессами перемещения и консолидации ультрамафитов в земной коре и отмечаются в породах, претерпевших пластические деформации при доминирующей роли синтетектонической рекристаллизации.

3. Анализ данных по распределению золота в ультрамафитах офиолитовых комплексов свидетельствует об универсальной роли процессов пластической деформации в эволюции мантийного вещества, сопровождаемых повышением концентрации золота.

тической деформации в эволюции мантийного вещества, сопровождаемых повышением концентрации золота.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаренко А.И. Деформация и петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1989. – 400 с.
2. Коробейников А.Ф. Геохимия золота в габбро-плагиогранитных системах складчатых структур // Геохимия. – 1997. – № 1. – С. 513–520.
3. Миграция вещества в зонах метаморфизма / М-во геологии СССР. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т синтеза минер. сырья. – М.: Недра, 1983. – 123 с.
4. Коробейников А.Ф., Гончаренко А.И. Золото в офиолитовых комплексах Алтае-Саянской складчатой области // Геохимия. – 1986. – № 1. – С. 49–61.
5. Гребенщикова В.И., Шмотов А.П. Этапы формирования Зун-Холбинского золоторудного месторождения // Геол. и геофиз. – 1997. – Т. 38. – № 4. – С. 756–764.
6. Клитин К.А., Домнина Е.А., Риле Г.В. Строение и возраст офиолитового комплекса Байкало-Витимского поднятия // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Нов. сер. Отд. геол. – 1975. – Т. 30. – № 1. – С. 82–94.
7. Добрецов Н.Л. Офиолиты и проблемы Байкало-Муйского офиолитового пояса // Магматизм и метаморфизм зоны БАМ и их роль в формировании полезных ископаемых. – Новосибирск: Наука, 1983. – С. 11–19.
8. Салоп Л.И. Геология Байкальской горной области. Т. 2. – М.: Недра, 1967. – 699 с.
9. Гусев Г.С., Песков А.И., Соколов С.К. Палеогеодинамика Муйского сегмента протерозойского Байкало-Витимского пояса // Геотектоника. – 1992. – № 2. – С. 72–87.
10. Пугачева Е.Е., Гончаренко А.И. Модель эволюции ультрамафитов Шаманского массива // Магматизм и геодинамика Сибири. – Томск: ЦНТИ, 1996. – С. 77.
11. Щербаков С.А. Механизм пластических деформаций ультрабазитов Войкаро-Сынынского массива (Поярный Урал) // Геотектоника. – 1981. – № 4. – С. 44–56.
12. Пучков В.Н. Геодинамический контроль регионального метаморфизма на Урале // Геотектоника. – 1996. – № 2. – С. 16–33.
13. Nicolas A., Boudier F., Ceulener G. Mantle flow the Oman ophiolite // Mar. Geophys. Res. – 1988. – V. 9. – № 4. – P. 293–310.
14. Леснов Ф.П., Ломоносова Е.И., Гончаренко А.И., Шипицин Ю.Г., Гора М.П., Пугачева Е.Е. Распределение редкоземельных элементов в оливинах из ультрамафитов офиолитовой ассоциации // Геол. и геофиз. – 1995. – Т. 36. – № 2. – С. 50–61.
15. Чернышов А.И., Гончаренко А.И., Гертнер И.Ф., Бетхер О.В. Петроструктурная эволюция ультрамафитов. – Томск: Том. ун-т, 1997. – 160 с.
16. Chernishov A.I., Tuhfatullin A.A., Pochivalov Y.I. Crystal structure of olivine as an indicator of plastic deformation in ultramafites // Computer Aided Design of Advanced Materials and Technologies (V Inter. Conf.). – Tomsk, 1997. – P. 98–99.
17. Щербаков С.А. Микроструктурный анализ ультрабазитов Тихого и Индийского океана // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1985. – № 3. – С. 54–65.
18. Nicolas A., Boudier F., Boullier A.M. Mechanisms of flow in naturally and experimentally deformed peridotites // Amer. J. Sci. – 1973. – № 10. – P. 853–876.
19. Красников Н.Н. Генетические особенности золотого оруденения в архейских зеленокаменных поясах // Сов. геол. – 1985. – № 7. – С. 33–40.
20. Buisson G., Leblanc M. Gold in mantle peridotites from upper proterozoic ophiolites in Arabia, Mali, and Morocco // Econ. Geol. – 1987. – V. 82. – № 8. – P. 2091–2097.
21. Николая А. Основы деформации горных пород. – М.: Мир, 1992. – 107 с.
22. Вернон Р.Х. Метаморфические процессы. – М.: Недра, 1980. – 226 с.
23. Швец Л.А., Куруленко Н.В., Гаврилей В.А. Электрохимический способ определения золота и палладия в гипербазитах // Рациональное использование природных ресурсов Сибири. – Томск: Том. ун-т, 1989. – С. 105.