

## МЕХАНИЗМЫ ЭКСГУМАЦИИ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

**Е.В. Складаров**

*Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия*

Рассмотрены основные механизмы экспонирования метаморфических комплексов на поверхность (эксгумации), к которым относятся: тектоническая транспортировка в результате возвратного потока в аккреционном клине, обдукции и экструзивной тектоники; тектоническая денудация (тектоническое удаление перекрывающих комплексов) в процессе крупноамплитудного растяжения; диапиризм (всплывание низкоплотного материала нижней коры или субдуцируемого материала верхней коры).

*Метаморфизм, эксгумация, тектоника.*

## EXHUMATION OF METAMORPHIC COMPLEXES: BASIC MECHANISMS

**E.V. Sklyarov**

Metamorphic complexes become exposed on the surface by three basic exhumation mechanisms: (i) tectonic transport by return flow in accretionary wedges, overthrusting, and extrusion tectonics in convergent orogens, (ii) tectonic erosion (unroofing) under large-scale crustal extension, and (iii) diapirism (buoyant rise of low-density lower crust or subducted upper crust).

*Metamorphism, exhumation, tectonics*

Две важнейшие проблемы соотношения процессов метаморфизма и тектоники были сформулированы Н.Л. Добрецовым [1, с. 4]: „а) приуроченность разных типов метаморфизма к определенным тектоническим зонам в современных и фанерозойских поясах; б) проблема тектонической транспортировки метаморфических комплексов к поверхности...“. Именно аспектам тектонической транспортировки и посвящена настоящая статья.

Долгое время основными проблемами метаморфической геологии были разработка надежных критериев количественной оценки  $PT$ -параметров метаморфических процессов и определение таких параметров для изучаемых метаморфических комплексов. Вопрос о том, каким образом породные комплексы, сформировавшиеся на глубинах от 7 до 120 км, были экспонированы к поверхности, в абсолютно преобладающем числе публикаций не рассматривался. „По умолчанию“ предполагалось, что механизмом, обеспечивающим обнаженность на поверхности фрагментов средней и нижней коры, к которым и относятся метаморфические комплексы, является эрозийная денудация. Вопрос о необходимости привлечения тектонических факторов к процессам экспонирования метаморфических комплексов возник в связи с высокобарическими глаукофансланцевыми и эклогит-глаукофансланцевыми комплексами, позднее он усилился в связи с находкой алмазов в коровых породах [2]. „...главная проблема — как толщи, погруженные на глубину, значительно превышающую мощность континентальной коры, доставлены назад к поверхности и как содержащиеся в них ассоциации высоких давлений и низких температур сохранились при изменении  $T$  и  $P$  во время подъема“ [3, с. 238]. Исходя из кинетики реакций арагонит—кальцит, коэсит—кварц, алмаз—графит, необходима высокая скорость подъема глубинных пород, равная или превышающая скорость субдукции [4], и отсутствие флюидов на раннем этапе быстрой или сверхбыстрой эксгумации [5]. Высокобарические комплексы, безусловно, наиболее рельефно демонстрируют ведущую роль тектонических процессов в экспонировании метаморфических комплексов, но далеко не исчерпывают возможные варианты участия тектонических механизмов в экспонировании к поверхности метаморфических комплексов. В последние годы появилось значительное количество публикаций, рассматривающих различные аспекты процессов эксгумации метаморфических комплексов, включая обстановки субдукционные, коллизионные и зон внутриконтинентального растяжения. Говоря об эксгумации, следует отметить, что применение термина, обычно используемого в медицинской криминалистике, по отношению к геологическим процессам, часто вызывает стойкое неприятие геологических специалистов. Тем не менее и в зарубежной, и в отечественной геологической литературе он все более широко распространяется. Причина в том, что для описания сложного процесса погружения пород, образовавшихся на поверхности, с последующим их извлечением в результате тектонических процессов можно использовать только одно слово и понятно, о чем идет речь. Практически полная аналогия: сначала закопать, а потом выкопать. Впервые в геологии термин был использован для описания процессов тектонического „выталкивания“ фрагментов субдуцированной океанической плиты, претерпевшей высокобарический метаморфизм по мере погружения. Впоследствии он стал применяться во всех случаях

экспонирования на поверхность метаморфических комплексов при существенной роли тектонических процессов, имеющих разную природу.

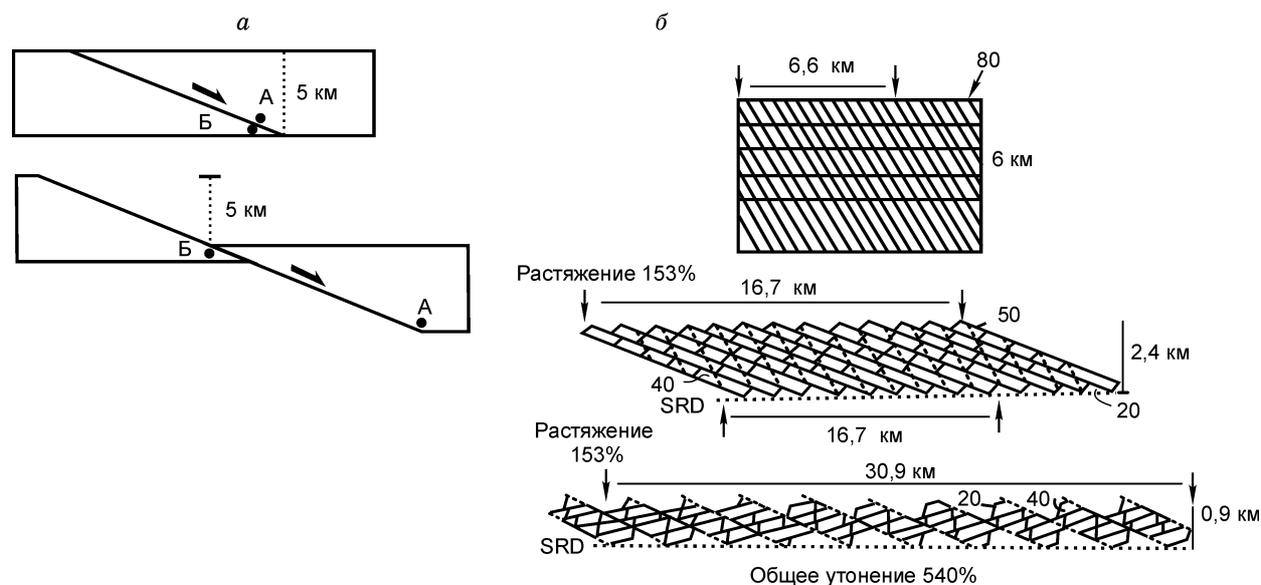
Можно выделить три основных механизма тектонического экспонирования метаморфических комплексов: тектоническая транспортировка, тектоническая денудация и всплывание за счет различия плотностных характеристик разных породных комплексов.

1. *Тектоническая транспортировка*, под которой объединяются разные тектонические процессы, приводящие к перемещению фрагментов нижней коры и мантии на более высокий уровень. Такие процессы могут иметь разную природу и условно могут подразделяться на три основных: обдукция, возвратное течение в аккреционном клине и экструзия фрагментов нижней коры в условиях сжатия в конвергентных орогенах.

Транспортировка офиолитовых аллохтонов с фрагментами ассоциирующих высокобарических комплексов при процессах надвигания (обдукция) рассматривалась в качестве одного из механизмов, обеспечивающих высокую скорость экспонирования высокобарических комплексов еще в 70-х годах прошлого века. В частности, Н.Л. Добрецовым [6] была предложена качественная модель полистадийной обдукции в рамках периодически ускоряющейся аккреции для францисканского комплекса. Однако роль глубинного надвигообразования в экспонировании метаморфических пород не исчерпывается только высокобарическими комплексами. На многих конкретных геологических объектах предполагается выведение фрагментов нижней и средней коры на более высокие уровни в процессе крупноамплитудного надвигообразования в коллизионных орогенах. При этом метаморфическая зональность может фиксировать разные стадии этого процесса [7] и соответствовать высокой скорости тектонических процессов, подтверждаемой прецизионным датированием метаморфических ассоциаций, соответствующим проградной, кульминационной и ретроградной стадиям метаморфического процесса [8].

Модель аккреционного клина (возвратного течения) в зонах субдукции [4, 9], принципиально сходная с моделями „углового течения“ по [10] и эксгумации тонких пластин при продолжающейся субдукции по [11], заключается в возникновении „быстрого“ возвратного потока при закупорке (коллизии) зоны субдукции жесткими блоками (микроконтинент, океаническое плато) в результате избыточного давления. Этот механизм обеспечивает „быстрое“ выведение к поверхности и сохранность НР (высокобарических) и УНР (ультравысокобарических) метаморфических ассоциаций. Дополнительным благоприятным фактором быстрой транспортировки субдуцируемых комплексов является присутствие высокопластичных пород, таких как серпентиниты, карбонаты, а на значительных глубинах — частично расплавленные породы гранитного состава [12, 13]. Подчеркнем высокую скорость процессов эксгумации НР и УНР комплексов, особенно на ранних ее стадиях, которая может составлять 1—20 см/год [3, 8, 12, 14].

Экструзионная тектоника, по мнению А.Б. Томпсона с соавторами [15], проявляется в конвергентных орогенах. Столкновение литосферных плит обуславливает реологическое ослабление породных комплексов корневых частей орогена и их вертикальное тектоническое выдавливание в верхние уровни коры.

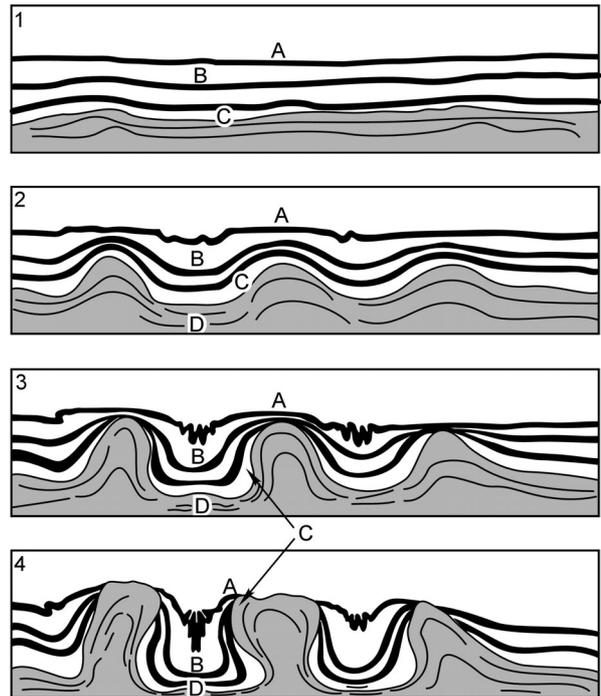


**Рис. 1.** Механизмы тектонической денудации верхних частей земной коры, обусловленные удалением перекрывающих комплексов по зоне пологого сброса (а) и вращения (tilting) блоков (б) в процессе крупноамплитудного растяжения (по [19] с использованием [17, 25]).

SRD — detachment Змеиного хребта (Snake Range Decollement).

**Рис. 2.** Стадии (1—4) гравитационной тектоники, адаптированные к данным экспериментального моделирования, по [26], демонстрирующие изменение профиля коры при всплывании низкоплотного материала, по [22].

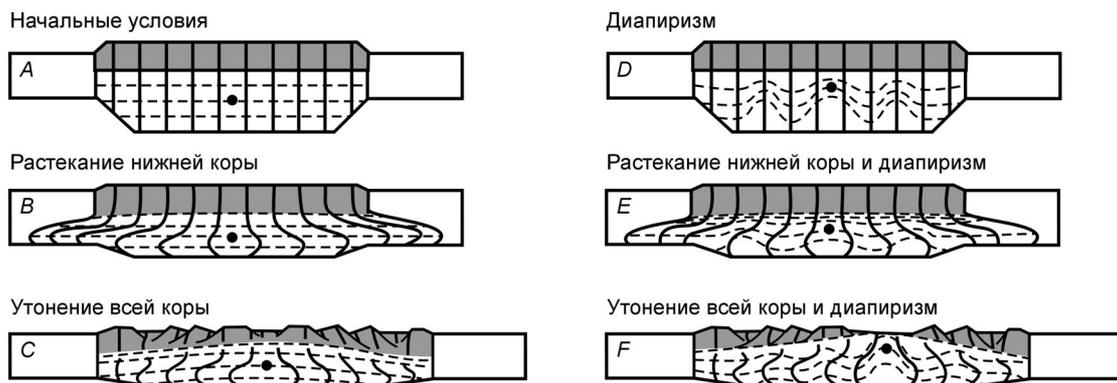
A, B, C, D — соответственно разные уровни глубинности коры.



Расчеты при двумерном моделировании [15] демонстрируют тренд изотермальной декомпрессии на ранних стадиях процесса, соответствующий  $P$ - $T$ - $t$  трендам для альпийского орогена.

2. *Тектоническая денудация* (unroofing), выражающаяся в тектоническом удалении верхнего слоя коры в процессе крупноамплитудного растяжения. Представления о ней нельзя отнести к числу широко распространенных. Они появились в достаточно оформленном виде только в начале 80-х годов в связи с выделением специфических структур — комплексов метаморфических ядер [16, 17]. Суть тектонической денудации заключается в том, что в процессе крупноамплитудного растяжения орогенов верхняя часть коры тектонически утоняется за счет комбинации двух механизмов. Первый — это формирование глубоко проникающего пологого сброса, по которому происходит „сползание“ висячего блока (рис. 1,а), что приводит к экспонированию на поверхность лежащего блока. Второй механизм обусловлен разным поведением нижних и верхних горизонтов земной коры в процессе растяжения, обусловленным различием их реологических свойств. Если в нижних частях коры широкое проявление пластических деформаций приводит к пластическому „растеканию всего слоя“, то в верхних частях, характеризующихся хрупкими деформациями, утонение „хрупкого слоя“ может происходить за счет вращения блоков по листрическим разломам (см. рис. 1,б). И в первом, и во втором случаях значительно утоняется, вплоть до полного удаления, верхняя перекрывающая часть, что автоматически ведет к экспонированию комплексов, расположенных на более глубоких уровнях [18, 19]. Суммарный эффект вертикального подъема по разным оценкам может составлять от 5 до 15 км.

3. *Всплывание относительно легких коровых фрагментов*, погруженных на глубокие уровни за счет повышенной плавучести (buoyancy), обусловленной различием плотностных характеристик верхнекорового и верхнемантийного (или нижнекорового) материала. Во многих зарубежных публикациях (напри-



**Рис. 3.** Принципиальная модель корового течения, декомпрессии и частичного плавления, по [21] с упрощениями.

A — начальные условия (после утолщения коры и термальной релаксации) характеризуются холодной и хрупкой верхней корой, высокотемпературной и низковязкой нижней корой; B, C — модели утонения коры в результате „растекания“ нижней коры (B) и одновременных процессах растяжения в верхней и нижней коре (C); D—F — модели декомпрессии, обусловленные только диапиризмом нижнекорового материала (D), одновременным растеканием нижней коры и диапиризмом (E), растяжением всей коры и диапиризмом (F). Максимальная амплитуда эксгумации нижнекоровых пород соответствует одновременному диапиризму, растеканию нижней коры и тектонической денудации верхней коры.

мер, [20]) этот механизм рассматривается в качестве ведущего при транспортировке высокобарических и особенно ультравысокобарических комплексов к поверхности. Но наиболее ярким примером транспортировки нижне- и среднекорового материала на более высокий уровень за счет плавучести являются гранитогнейсовые купола [21, 22]. Их зарождение и всплытие (рис. 2) во многом контролируются процессами частичного водонасыщенного (в присутствии свободного водного флюида) или дегидратационного (при распаде водосодержащих минеральных фаз) плавления утолщенной коры коллизионных орогенов [21]. Этот механизм отчасти реализуется и при формировании комплексов метаморфических ядер кордильерского типа на поздних стадиях процесса при ведущей роли процессов тектонической денудации [18].

Говоря о механизмах эксгумации, следует понимать, что экспонирование метаморфических комплексов в реальных геодинамических обстановках обеспечивается корпоративным эффектом двух или всех трех рассмотренных механизмов при существенной роли эрозионной денудации. На разных стадиях процесса роль того или иного механизма может возрастать или, напротив, ослабевать. Возможные варианты одновременного проявления механизмов эксгумации (рис. 3) в наиболее полном виде рассмотрены в работе Ч. Тасье и Д. Уитни [21]. Подчеркнем, что максимальный эффект, обеспечивающий быстрый подъем метаморфических комплексов со значительных глубин, достигается при участии в эксгумации всех трех рассмотренных механизмов. Одним из наиболее ярких примеров такого эффекта является комплекс метаморфического ядра с фрагментами эклогитов в гранитогнейсах о-вов Д'Антраксто (Папуа-Новая Гвинея). Здесь наиболее глубинные метаморфические комплексы были экспонированы с глубин 60—70 км [23], при очень высокой скорости остывания, достигающей 500—600 °С/млн лет на поздних стадиях. Скорость же ранних этапов подъема эклогитов с глубин 50—60 км на уровень 25—35 км могла достигать 10 см/год [24]. В данном случае быстрый подъем глубинных фрагментов коры и последующее быстрое остывание обусловлены корпоративным эффектом тектонической транспортировки эклогитов, всплытия легкого гнейсового субстрата, содержащего фрагменты эклогитов, и тектонической денудации.

В качестве резюме выделим наиболее важные моменты, связанные с проблемами эксгумации метаморфических комплексов:

1. Три основных механизма экспонирования метаморфических комплексов (эксгумации) соответствуют: а) тектонической транспортировке в результате возвратного потока в аккреционном клине, обдукции и экструзивной тектонике; б) тектонической денудации (тектонического удаления перекрывающих комплексов) в процессе крупноамплитудного растяжения коры; в) диапиризму (всплытие низкоплотного материала нижней коры или субдуцируемого материала верхней коры).

2. Высокие скорости эксгумационных процессов (до 20 см/год) обеспечивают сохранность высоко- и умеренно-барических метаморфических ассоциаций (закалка) в неравновесных условиях средней и верхней коры.

3. Процессы эксгумации метаморфических комплексов не разорваны значительно во времени с кульминационной стадией метаморфизма. Во многих изученных случаях временной интервал между стадиями не превышает 10—15 млн лет, иногда составляя всего 2—7 млн лет.

В заключение отметим, что одним из пионеров разработки моделей эксгумации метаморфических комплексов является Н.Л. Добрецов, многие публикации которого затрагивают или полностью посвящены рассматриваемой проблеме [1, 3—5, 9, 12 и др.].

Автор выражает свою признательность И.Г. Барашу за помощь в техническом оформлении статьи. Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект 05-05-64761).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Добрецов Н.Л. Проблемы соотношения тектоники и метаморфизма // *Петрология*, 1995, т. 3, № 1, с. 4—23.
2. Sobolev N.V., Shatsky V.S. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks: a new environment for diamond formation // *Nature*, 1990, v. 343, p. 742—746.
3. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Изд. второе. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал „Гео“, 2001, 408 с.
4. Добрецов Н.Л. Глобальные петрологические процессы. М., Недра, 1981, 236 с.
5. Dobretsov N.L. Blueschists and eclogites: a possible plate tectonic mechanism for the emplacement from the upper mantle // *Tectonophysics*, 1991, v. 186, p. 253—268.
6. Dobretsov N.L. New overthrusting model for blueschists metamorphism with reference to the Franciscan-Great Valley problems, California // *Ofioliti*, 1979, v. 4, № 1, p. 17—24.
7. Донская Т.В., Складов Е.В., Гладкочуб Д.П. и др. Шутхулайский метаморфический комплекс (Юго-Восточный Саян): особенности метаморфизма и модель образования // *Геология и геофизика*, 2004, т. 45, № 2, с. 194—211.

8. **Oliver G.J.H., Chen F., Buchwaldt R., Henger E.** Fast tectonometamorphism and exhumation in the type area of the Barrovian and Buchan zones // *Geology*, 2000, v. 28, № 5, p. 459—462.
9. **Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г.** Глубинная геодинамика. Новосибирск, Изд-во НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1994, 299 с.
10. **Platt J.** Dynamics of orogenic wedges: the uplift of high pressure metamorphic rocks // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1986, v. 57, p. 1037—1053.
11. **Ernst W.G., Peacock S.** A thermotectonic model for preservation of UHP phases // *Geophys. Monogr.*, 1996, p. 171—178.
12. **Добрецов Н.Л.** Процессы коллизии в палеозойских складчатых областях Азии и механизмы эксгумации // *Петрология*, 2000, т. 8, № 5, с. 451—476.
13. **Dobretsov N.L., Shatsky V.S.** Exhumation of high-pressure rocks of the Kokchetav massif: facts and models // *Lithos*, 2004, v. 78, p. 307—318.
14. **Rubatto D., Hermann J.** Exhumation as fast as subduction? // *Geology*, 2001, v. 29, № 1, p. 3—6.
15. **Thompson A.B., Schulmann K., Jezek J.** Extrusion tectonics and elevation of lower crustal metamorphic rocks in convergent orogens // *Geology*, 1997, v. 25, № 6, p. 491—494.
16. **Crittendon M.D., Coney P.J., Davis G.H.** (Eds). Cordilleran metamorphic core complexes // *Mem. Geol. Soc. Amer.*, 1980, v. 153, p. 1—486.
17. **Wernicke B.** Low-angle normal faults in the Basin and Range Province: nappe tectonics in extended orogen // *Nature*, 1981, v. 291, p. 645—648.
18. **Склярлов Е.В., Мазукабзов А.М., Мельников А.И.** Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997, 182 с.
19. **Метаморфизм и тектоника** / Е.В. Склярлов (Ред.). М., Интермет Инжиниринг, 2001, 216 с.
20. **Ernst W.G.** Metamorphism, partial preservation and exhumation of ultrahigh pressure belts // *The Island Arc*, 1999, v. 8, p. 125—153.
21. **Teysier Ch., Whitney D.L.** Gneiss domes and orogeny // *Geology*, 2002, v. 30, № 12, p. 1139—1142.
22. **Warren R.G., Ellis D.J.** Mantle underplating, granite tectonics, and metamorphic *P-T-t* paths // *Geology*, 1996, v. 24, № 7, p. 663—666.
23. **Baldwin S.L., Lister G.S., Hill E.G. et al.** Thermochronologic constraints on the tectonic evolution of an active metamorphic core complex, D'Entrecasteaux Islands, Papua New Guinea // *Tectonics*, 1993, v. 12, p. 611—628.
24. **Hill E.G., Baldwin S.L., Lister G.S.** Unroofing of active metamorphic core complexes in the D'Entrecasteaux Islands, Papua New Guinea // *Geology*, 1992, v. 20, p. 907—910.
25. **Miller E.L., Gans P.B., Garing J.** The Snake Range decollement: an exhumed Mid-Tertiary ductile-brittle transition // *Tectonics*, 1983, v. 2, № 2, p. 239—264.
26. **Ramberg H.** Gravity, deformation and the Earth's crust. 2nd edition. London, Academic Press, 1981, 452 p.

*Поступила в редакцию  
10 августа 2005 г.*