

УДК 551.24+551.251

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ЭКСГУМАЦИИ ВЫСОКОБАРИЧЕСКИХ ПОРОД ПРИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ СУБДУКЦИИ

© 2022 г. Академик РАН В. В. Ревердатто¹, О. П. Полянский¹, А. Н. Семенов^{1,*}, А. В. Бабичев¹

Поступило 12.11.2021 г.

После доработки 23.12.2021 г.

Принято к публикации 27.12.2021 г.

Предложена термомеханическая численная модель процесса субдукции и последующего подъема к коре континентальных метаосадков. Модель “холодной” субдукции описывает механизм формирования метаморфических комплексов высоких давлений, которые представляют смесь метапелитов и метабазитов – положительно и отрицательно плавучего (относительно верхней мантии) материала континентальной коры. Триггером возвратного течения служат дегидратация и снижение вязкости субдуцируемого вещества в условиях, не достигающих плавления. Даны оценки скорости эксгумации, формы *PT*-трендов на прогрессивной и регрессивной стадии метаморфизма, приводится сравнение с природными комплексами. Показано, что механизм диапирового возвратного потока характеризуется скоростями эксгумации высокобарических комплексов в 2–3 раза ниже скорости субдукции. Предложенный механизм субдукции и диапирового подъема может рассматриваться как возможный для объяснения эксгумации континентальных осадков в отсутствие плавления.

Ключевые слова: субдукция, численное моделирование, вязкость, фазовый переход, всплывание

DOI: 10.31857/S2686739722040156

Проблема механизмов формирования и подъема субдукционных метаморфических комплексов и сохранность высокобарических минеральных ассоциаций является остро дискуссионной. Предложены разнообразные способы образования и вывода к поверхности пород высоких и сверхвысоких давлений, среди которых рассматриваются следующие: возвратные течения вещества в субдукционном канале [1, 2] или в аккреционной призме [3], модель эдукции (выведение континентальной коры после разрыва с океанической) [4], механизм деляминации материала коры от мантийного субстрата и его экструзия [5], надсубдукционные транс-мантийные диапиры [6–8]. Высказано предположение, что большая часть субдуцируемого метаосадочного материала за счет положительной плавучести не погрузилась в мантию, а была перенесена в основание коры континентов [9]. На основе моделирования фазовых равновесий при высоких и ультравысоких давлениях предполагается [10], что существует порог, глубже которого механический компо-

зит из кислых и базитовых пород становится отрицательно плавучим относительно вещества мантии. Такой порог соответствует интервалу от 80 до 160 км для соотношения кислых/базит-ультрабазитовых пород 1: 3 и более 160 км для соотношения 2: 3. Как правило, в качестве причины положительной плавучести субдуцированного вещества предполагается плотностной контраст между веществом мантии и метаосадками коры (метапелиты, метакarbonаты, метаграувакки). При отделении от субдукционной плиты метаосадки способны вернуться к поверхности.

Для выяснения термомеханических параметров и кинематических характеристик механизма подъема субдуцированного вещества с отрицательной плавучестью нами построена 2D термомеханическая многокомпонентная модель, являющаяся развитием механической модели [11, 12]. Геометрия модели, термические и кинематические граничные условия показаны на рис. 1.

Предполагается, что верхняя часть погружающейся континентальной плиты представляет собой двуслойную структуру: верхний 5-км слой состоит из метапелита, нижний слой толщиной 10 км имеет метабазитовый состав. Треугольная область в нижнем левом углу представляет собой недеформируемую, погружающуюся континентальную плиту, на поверхности которой допуска-

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

*E-mail: semenov@igm.nsc.ru

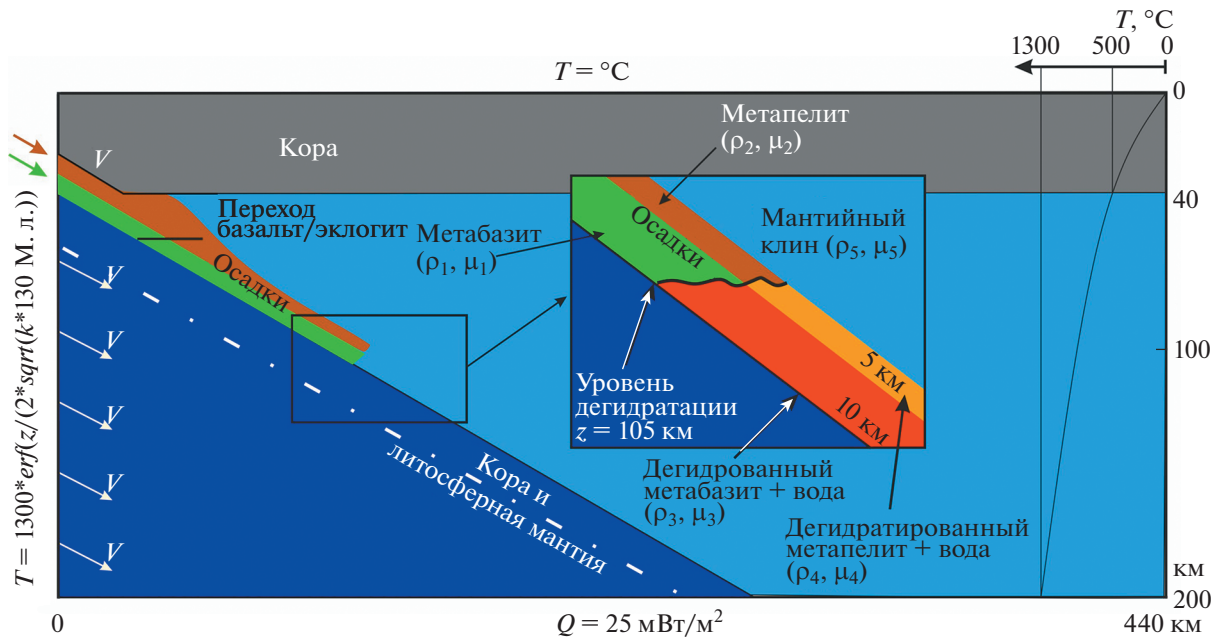


Рис. 1. Геометрия, термические и кинематические граничные условия модели континентальной субдукции. Цвет на вставке и на всех последующих рисунках с результатами численных экспериментов соответствует типам пород, исходных и преобразованных при дегидратации: коричневый – метапелиты, оранжевый – дегидратированный метапелит+вода, зеленый – базиты, красный – дегидратированный метабазит + вода, голубой – мантийный клин, синий – субдукционная плита. Справа приведен профиль температуры в начальный момент.

ется проскальзывание. На левой границе модельной области задается скорость потока (1, 2.5, 5 или 10 см/год), соответствующая погружению жесткой плиты с углом наклона 30° ; нижняя граница – фиксирована и открыта для проникновения вещества.

В начальный момент времени вся расчетная область вне плиты заполнена мантийным материалом. Температура в плите распределена в начальный момент времени по глубине по закону [13]:

$$T(z) = T_m \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{kt_{\text{пл}}}}\right)$$

где $t_{\text{пл}}$ – возраст плиты (130 млн л.), z – глубина (м), $T_m = 1300^\circ\text{C}$ – температура в мантии, $k = 2.5 \text{ Вт}/(\text{м К})$ – теплопроводность метаосадков и $3.5 \text{ Вт}/(\text{м К})$ – мантийного клина, теплоемкость $C_p = 1250 \text{ Дж}/\text{К}$ принята одинаковой. На боковых стенках во время расчета поддерживается указанное распределение температуры. На верхней и нижней поверхности заданы граничные условия постоянной температуры и теплового потока $Q = 25 \text{ мВт}/\text{м}^2$. В коре учитываются радиационные тепловые источники мощностью $1.52 \text{ мкВт}/\text{м}^3$.

Физические параметры модели выбраны на основе экспериментальных и расчетных PT -характеристик природных ассоциаций высоких давлений. Плотность по [10] принята для мантии $3330 \text{ кг}/\text{м}^3$, для метапелитового слоя $3050 \text{ кг}/\text{м}^3$ (при $P > 1.5 \text{ ГПа}$), для базитового слоя она меня-

ется от 3200 до $3400 \text{ кг}/\text{м}^3$ при фазовом переходе базальт–эклогит на глубине около 60 км . Изменения плотности задаются необратимыми, т.е. экзугумированный материал остается той же плотности, достигнутой при максимальном погружении.

Вязкость мантийного клина, согласно [13, 14], принята постоянной $10^{19} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Предполагается, что на некоторой глубине происходит дегидратация погружающегося метапелитового и метабазитового материала (глинистых минералов первого и серпентина, амфибола, хлорита и др. второго). По оценкам [15] выделение в течение очень короткого периода времени $10\text{--}100$ тыс. лет $5\text{--}7 \times 10^{-10} \text{ моль } \text{H}_2\text{O}/\text{см}^3/\text{год}$ предполагает, что дегидратация субдуцированных пород может происходить как локализованный процесс на определенной глубине. В упрощенной петрологической модели мы принимаем фиксированную глубину дегидратации (35 кбар , т.е. 105 км), соответствующую дегидратации водных минералов при “холодной” субдукции [14]. Существенным элементом модели является условие снижения вязкости при формировании меланжа с наличием водосодержащих минералов, либо ввиду повышенной флюидонасыщенности дегидратированных субдуцированных осадков. Это предположение основывается на экспериментальных данных о ничтожно малой проницаемости пород мантийного клина (гарцбургитов и серпентинитов) – менее 10^{-24} м^2 при температуре выше $300\text{--}400^\circ\text{C}$ и давлении выше $100\text{--}150 \text{ МПа}$ согласно работе [16].

Эффект выделения 4–5 вес. % воды при дегидратации учитывается в модели путем снижения эффективной вязкости метапелитового и метабазитового материала на три порядка от 10^{21} до 10^{18} Па с в соответствии с экспериментальными данными [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Чтобы протестировать предложенную модель термомеханической конвекции, использовался метод конечных элементов, реализованный в пакете ANSYS Fluent [https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent]. Решается система уравнений Навье–Стокса в приближении сжимаемой жидкости: уравнение неразрывности, уравнение движения и уравнение сохранения энергии. Полная система уравнений и метод решения описаны в [18]. Расчеты проведены с использованием конечно-разностных структурированных сеток с шагом 200 м. Области, где происходило основное движение, сетки имеют сгущение с размером элемента 100 м. Выполнено моделирование с перебором терморологических параметров мантии и субдуцированных осадков при разных кинематических граничных условиях.

Результаты моделирования приведены на рис. 2а, 2б, в в форме картины распределения вещества разного состава (показано в цвете) и температуры (в изолиниях). Показаны картины на стадии завершения эксгумации пород, когда вещество достигает границы мантии и коры, для вариантов быстрой и медленной субдукции со скоростью 10, 5 и 1 см/год.

Погружение континентальных осадков происходит в субдукционном канале со скоростью, отличающейся от скорости субдукции плиты ввиду вязкого трения на границе раздела метаосадков с мантийным клином (рис. 2). При этом толщина слоя осадков и метабазитов меняется по мере погружения. При наименьшей скорости субдукции из рассмотренных формируется аккреционный клин (призма) шириной около 50 км, состоящий из легких метапелитовых осадков (рис. 2в).

Во всех моделях на глубине 105–110 км происходит накопление дегидратированного вещества со свободным флюидом. Когда аккумулируется достаточная критическая масса маловязкого легкого вещества, начинается процесс эксгумации с формированием канала, форма которого определяется конвекцией в мантийном клине, а также перепадом вязкости между мантийным и субдуцированным веществом в дегидратированном состоянии. Интервал времени между погружением и началом подъема составляет примерно 200–300 тыс. лет при скорости субдукции 10 см в год, для медленного погружения со скоростью 5, 2.5 и 1 см в год это время составляет 1.6 млн лет,

2 млн лет и 7 млн лет соответственно. В модели с высокой скоростью субдукции канал состоит в основном из метапелитового материала с захватом небольших порций эклогитов (рис. 2а, вставка). У основания коры эклогит образует обособленное тело в виде линзы, заключенной в маловязкий метапелитовый гнейс. Температура в восходящем потоке вещества меняется слабо ввиду высокой скорости эксгумации. Она закономерно растет с уменьшением скорости субдукции: 510°C для модели высокоскоростной субдукции (10 см/г), 550°C для модели субдукции 5 см/год, 600°C – для 2.5 см/год и 640°C для медленной субдукции 1 см в год.

Моделирование позволяет охарактеризовать скорость подъема высокобарических комплексов. Для случая погружения плиты 10 см в год на начальной стадии скорость подъема достигает 5 см/год, по мере подъема и приближения к основанию коры скорость падает до 2–3 см в год и вещество скапливается под границей кора–мантия. Средняя скорость подъема от максимальной глубины погружения до основания коры составляет 3.5, 1.7, 1.2 и 0.5 см в год для моделей при скорости субдукции 10, 5, 2.5 и 1 см в год соответственно. Таким образом, установлено, что скорость эксгумации определяется массовым потоком вещества в субдукционном канале: при поступлении большего объема метаосадков в область дельтаинации скорость подъемного потока возрастает.

При средней скорости погружения плиты (2.5 см/год) соотношение метапелитов и метабазитов с эклогитами при подъеме увеличивается ввиду того, что часть эклогитов погружается в субдукционном канале. Метапелитовый материал во фронтальной верхней части восходящего потока выносит вверх более плотный эклогитовый к основанию коры в подошве слоя (рис. 2б). При наиболее медленной из рассмотренных скорости субдукции (1 см/год) в восходящем потоке доля метапелитового вещества становится немного меньше, примерно на 20%, в сравнении с предыдущей моделью. Структура восходящего потока характеризуется объемным соотношением метапелитов, гидратированных и дегидратированных метабазитов как 1: 1: 1.

По температурному полю и полю скоростей можно установить, что при данных параметрах в мантии формируются две конвективные ячейки, разделенные каналом поднимающегося вещества. Направление конвекции определяется движением холодной субдукционной плиты, с одной стороны, и глубиной отрыва (дельтаинации) метаосадочного слоя, с другой. В случае низкой скорости (1 см/год) конвекция в мантийном клине затухает, при этом формируется всего одна конвективная ячейка.

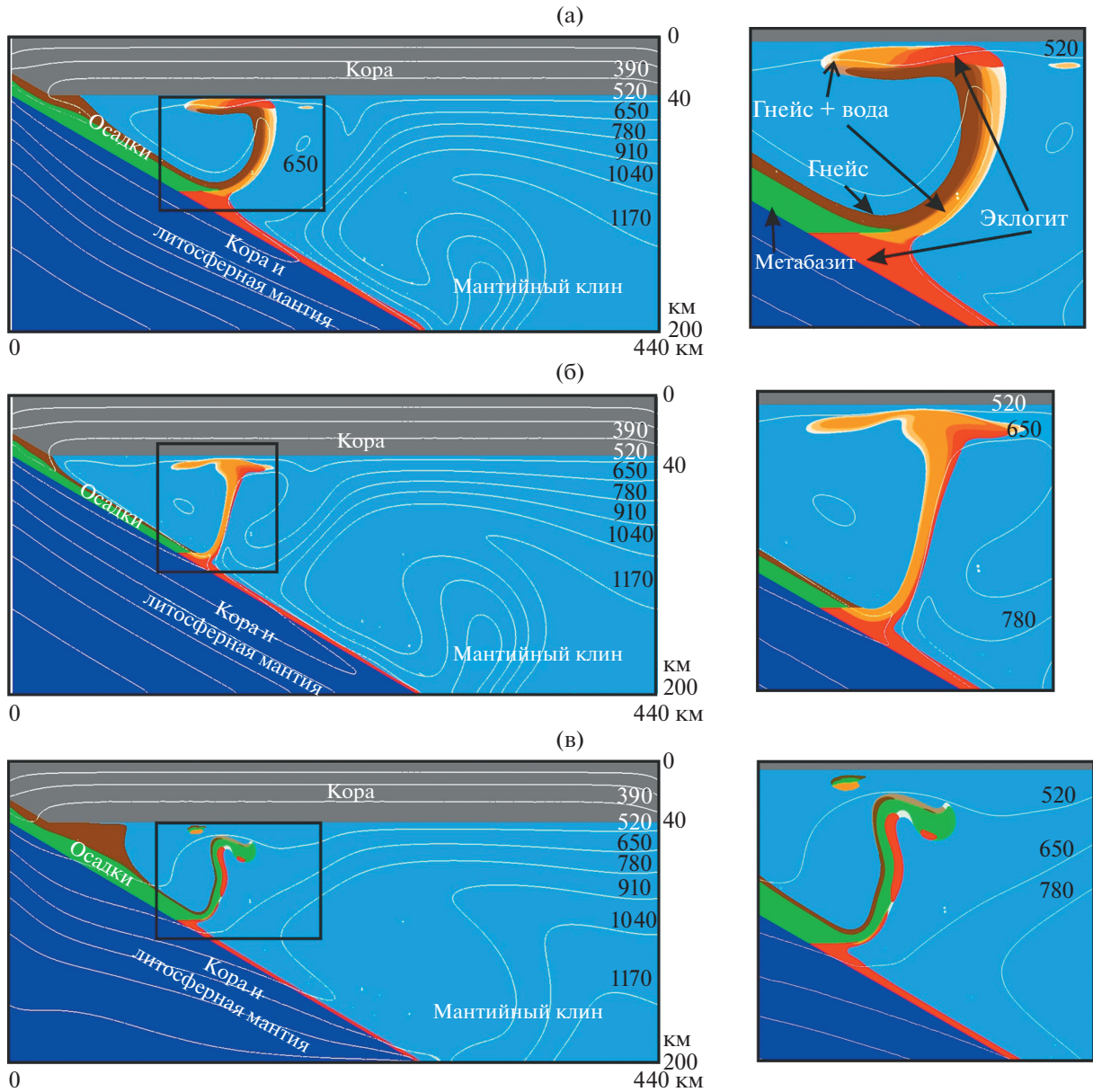


Рис. 2. Результаты моделирования субдукции и эксгумации континентального вещества (состав показан разным цветом) и температура при конвекции в мантийном клине (показана в изолиниях, соответствующая температура приведена над кривой). Серое – недеформируемая теплопроводящая кора. Прямоугольником показана увеличенная область, приведенная на вставке справа. (а) Модель при скорости конвергенции плит 10 см/год. Картина приведена на время $t = 10$ млн лет с начала субдукции. Момент $t = 0$ – начало погружения метаосадков по субдукционному каналу вдоль поверхности плиты. (б) Модель при скорости конвергенции плит 5 см/год. Картина приведена на время $t = 15$ млн лет с начала субдукции. (в) Модель при скорости конвергенции плит 1 см/год, картина приведена на время 50 млн лет с начала субдукции.

Модельные PT -траектории на стадии субдукции и эксгумации представляют собой типичные кривые в форме “заколки” (hair-pin, [19]) с низкоградиентной ($\partial T/\partial P = 3\text{--}5^\circ\text{C}/\text{кбар}$) формой прогрессивной и регрессивной ветви (рис. 3). Наклон сегмента кривой, соответствующего погружению, пропорционален скорости субдукции: более пологая кривая соответствует медленному

погружению. Форма кривых для стадии эксгумации означает почти изотермическую декомпрессию (кривая для модели субдукции 10 см/год на рис. 3), либо подъем с некоторым нагреванием вещества при меньшей скорости (2.5–5 см/год), либо с почти параллельным положением прогрессивной и регрессивной ветвей при медленной субдукции (1 см/год).

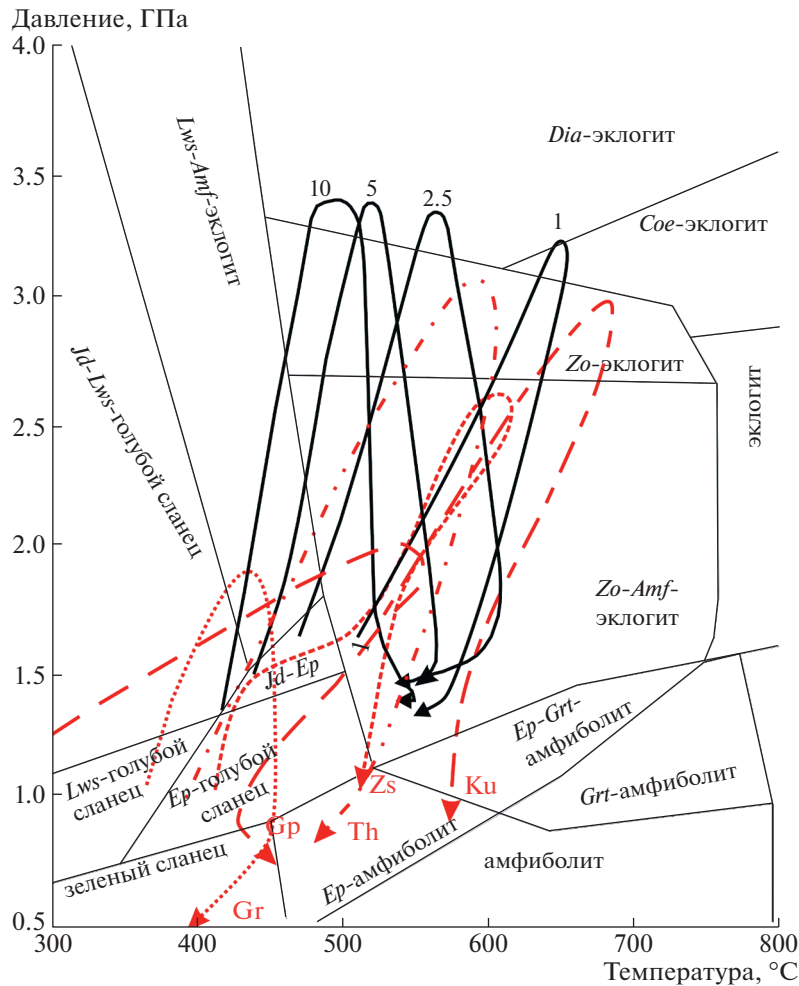


Рис. 3. Модельные *P-T*-тренды прогрессивной и регрессивной стадии при субдукции и подъеме метаосадков в вариантах модели при различной скорости субдукции плиты (скорость субдукции в см/год подписана над кривой). Красные прерывистые линии – *P-T* тренды для субдукционных комплексов [3, 10, 19]: Ku – Кулетский домен Кокчетавского массива; Zs – Церматт-Саас (Альпы); Gr – комплекс голубых сланцев о. Груа (Зап. Франция); Grp – массив Гран Парадизо (Зап. Альпы); Th – эклогиты западного Тянь-Шаня (Китай). Сплошные тонкие линии – границы фаций для метабазитов по данным [14].

Проведенное моделирование позволяет заключить следующее. Предложенная модель описывает условия формирования метаморфических комплексов от умеренных до высокобарических степеней (от лавсонит-голубосланцевой до эклогитовой фации) при незначительном плавлении либо в его отсутствие, т.е. в обстановках, не связанных с надсубдукционным вулканизмом. Особенностью рассмотренного механизма является возникновение так называемых надсубдукционных трансмантийных диапиров или “холодных плюмов”, описанных в [2]. Породы, таким способом поднявшиеся к основанию коры, достигают нейтральной плавучести относительно вмещающей среды на уровне границы Мохо. После остановки происходит подслаивание и нарастание континентальной коры снизу, так называемый процесс реламинации [9]. В дальнейшем высоко-

барические породы были выведены на поверхность либо по пологим надвигам (например, эклогиты Тсо Морари, С-В Гималаи [8]), либо путем гравитационного всплывания смеси легкого и тяжелого материала (например, эклогиты о. Д’Антркастро, Новая Гвинея [7]). Этот этап эксгумации в нашей модели не рассматривается, т.к. определяется коллизионной тектоникой региона и требует описания в рамках других реологических моделей.

Результаты моделирования эксгумации метаосадков интересны в отношении роли плавучести в механизме подъема эклогитов (ультра-)высоких давлений. Предложенная модель субдукции двухкомпонентной смеси дает основание предполагать, что при пиковых условиях эклогиты были изофациальны с вмещающими метаосадками. При эксгумации на регрессивной стадии мета-

морфизма амфиболитовой фации водонасыщенные метapelиты были преобразованы в гнейсы и сланцы, а эклогиты сохранились в виде реликтов во внутренних частях метapelитовых гнейсов. В ранее предложенной модели субдукции смеси фельзитового (положительно плавучего относительно верхней мантии) и базитового (отрицательно плавучего) материала континентальной коры [10] дается оценка объемных отношений и глубины “точки невозврата”, однако механизм эксгумации эклогитовых комплексов остается не ясен. В нашей модели предложен реалистичный сценарий погружения и эксгумации композита из легких метapelитов и тяжелого метабазита. Метapelиты, “заякоренные” эклогитовым материалом, сначала погружаются до глубин дегидратации, а затем способны транспортировать вверх более тяжелые эклогиты за счет совместного эффекта положительной плавучести и снижения вязкости. Основным контролирующим фактором является скорость массового потока метаосадков: при более медленной субдукции вещество успевает нагреваться и *PT*-тренды смещаются в сторону повышенных температур (рис. 3). Сравнение с природными примерами комплексов высоких давлений, приведенных на рис. 3, позволяет оценить скорость эксгумации для этих комплексов в интервале 1.2–1.7 см/год. По классификации [19] субдукция континентального типа характеризуется быстрой эксгумацией пород сверхвысоких давлений с глубин от 100 до 200 км в условиях холодной геотермы со скоростью более 6 мм/год. Полученные оценки в нашей модели близки к скорости подъема пород для Кулетского домена Кокчетавского массива 1–1.5 см/год [3, 20]. Таким образом, предложенный механизм субдукции и диапирового подъема может рассматриваться как возможный для объяснения сохранности минеральных ассоциаций комплексов высоких давлений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензентов статьи за высказанные ценные замечания.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госзадания ИГМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burov E., Jolivet L., Le Pourhiet L., Poliakov A.* A Thermomechanical Model of Exhumation of High Pressure (HP) and Ultra-high Pressure (UHP) Metamorphic Rocks in Alpine-type Collision Belts // *Tectonophysics*. 2001. V. 342. P. 113–136. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00158-5](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00158-5)
2. *Gerya T., Perchuk L., Burg J.* Transient Hot Channels: Perpetrating and Regurgitating Ultrahigh-pressure, High Temperature Crust–mantle Associations in Collision Belts // *Lithos*. 2008. V. 103. P. 236–256. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.09.017>
3. *Добрецов Н.Л.* Процессы коллизии в палеозойских складчатых областях Азии и механизмы эксгумации // *Петрология*. 2000. Т. 8 (5). С. 451–476.
4. *Andersen T., Jamtveit B., Dewey J.F., Swenson E.* Subduction and Eduction of Continental Crust: Major Mechanism During Continent–continent Collision and Orogenic Extensional Collapse, a Model Based on the South Caledonides // *Terra Nova*. 1991. V. 13. P. 303–310. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1991.tb00148.x>
5. *Chemenda A., Mattauer M., Malavieille J., Bokun A.* A Mechanism for Syn-collisional Rock Exhumation and Associated Normal Faulting: Results from Physical Modelling // *Earth and Planetary Science Letters*. 1995. V. 132. P. 225–232. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00042-B](https://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00042-B)
6. *Perchuk A.L., Gerya T.V., Zakharov V.S., Griffin W.L.* Building Cratonic Keels in Precambrian Plate Tectonics // *Nature*. 2020. V. 586, P. 395–401. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2806-7>
7. *Little T., et al.* Diapiric Exhumation of Earth’s Youngest (UHP) Eclogites in the Gneiss Domes of the D’Entrecasteaux Islands, Papua New Guinea // *Tectonophysics*. 2011. V. 510. P. 39–68. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.06.006>
8. *Chatterjee N., Jagoutz O.* Exhumation of the UHP Tso Moriri Eclogite as a Diapir Rising through the Mantle Wedge // *Contrib Mineral Petrol.* V. 169, 3 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00410-014-1099-y>
9. *Hacker B., Gerya T.* Paradigms, New and Old, for Ultrahigh-pressure Tectonism // *Tectonophysics*. 2013. V. 603. P. 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.026>
10. *Chapman T., Clarke G., Daczko N.* The Role of Buoyancy in the Fate of Ultra-high-pressure Eclogite // *Scientific Reports*. 2019. V. 9. 19925. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56475-y>
11. *Коробейников С., Полянский О., Свердлова В.Г., Бабичев А.В., Ревердатто В.В.* Компьютерное моделирование поддвига и субдукции в условиях перехода габбро-эклогит в мантии // *ДАН*. 2008. Т. 420. № 5. С. 654–658.
12. *Полянский О., Коробейников С., Свердлова В., Бабичев А., Ревердатто В.* Влияние реологии коры на характер субдукции плит по результатам математического моделирования // *ДАН*. 2010. Т. 430. № 4. С. 518–522.
13. *Honda S., Gerya T., Zhu G.* A Simple Three-dimensional Model of Thermos-chemical Convection in the Mantle Wedge // *Earth Planet Sci Letters*. 2010. V. 290. P. 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.12.027>
14. *Peacock S.* Thermal Structure and Metamorphic Evolution of Subducting Slabs. Geophysical monograph Series. AGU Washington. 2003. V. 238. P. 7–22. <https://doi.org/10.1029/138GM02>

15. *Dragovic B., Samanta L., Baxter E., Selverstone J.* Using Garnet to Constrain the Duration and Rate of Water-releasing Metamorphic Reactions during Subduction: An Example from Sifnos, Greece // *Chemical Geology*. 2012. 314–317. P. 9–22.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.016>
16. *Шмонов В.М., Витовтова В.М., Журиков А.В.* Флюидная проницаемость пород земной коры. М.: Научный мир, 2002. 216 с.
17. *Mei S., Bai W., Hiraga T., Kohlstedt D.* Influence of Melt on the Creep Behavior of Olivine-basalt Aggregates Under Hydrous Conditions// *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 201. P. 491–507.
18. *Семенов А.Н., Полянский О.П.* Численное моделирование механизмов минглинга и миксинга магмы на примере формирования сложных интрузивов // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58. № 11. С. 1665–1683.
<https://doi.org/10.15372/GiG20171104>
19. *Guillot S., Hattori K., Agard Ph., Schwartz S., Vidal O.* Exhumation Processes in Oceanic and Continental Subduction Contexts: A Review // In: S. Lallemand and F. Funiciello (eds.), *Subduction Zone Geodynamics*, Springer. Berlin. 2009. P. 175–205.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-87974-9_10
20. *Hermann J., Rubatto D., Korsakov A., Shatsky V.S.* Multiple Growth during Fast Exhumation of Diamondiferous Deeply Subducted Continental Crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan) // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2001. V. 141. P. 66–82.

THERMOMECHANICAL MODELING OF THE EXHUMATION MECHANISM OF HIGH-PRESSURE ROCKS AT CONTINENTAL SUBDUCTION

Academician of the RAS **V. V. Reverdatto^a**, **O. P. Polyansky^a**, **A. N. Semenov^{a, #}**, and **A. V. Babichev^a**

^a*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: semenov@igm.nsc.ru*

A thermo-mechanical numerical model of the process of subduction and subsequent ascent to the crust of continental metasediments is proposed. The “cold” subduction model describes the formation mechanism of high-pressure metamorphic complexes, which are a mixture of metapelites and metabasites – positively and negatively buoyant (relative to the upper mantle) material of the continental crust. The trigger of the reverse flow is dehydration and a decrease in the viscosity of the subducted substance under conditions that do not reach melting. Estimates of the rate of exhumation, the form of PT-trends at the progressive and regressive stages of metamorphism are given, and a comparison with natural complexes is given. It is shown that the mechanism of the diapir return flow is characterized by the rates of exhumation of high-pressure complexes 2–3 times lower than the rate of subduction. The proposed mechanism of subduction and diapiric uplift can be considered as possible to explain the exhumation of continental sediments in the absence of melting.

Keywords: subduction, numerical modeling, viscosity, phase transition, floating