

УДК 551.242.51:734.3(470)

РОЛЬ ГЛУБИННЫХ ФЛЮИДОВ В ПОГРУЖЕНИИ КОРЫ ДРЕВНЕГО КРАТОНА. ОСАДОЧНЫЙ БАССЕЙН МОСКОВСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ В ПОЗДНЕМ ДЕВОНЕ

© 2022 г. Академик РАН Е. В. Артюшков^{1,*}, П. А. Чехович^{1,2,**}

Поступило 05.09.2022 г. После доработки 08.09.2022 г. Принято к публикации 09.09.2022 г.

В позлнем левоне на протяжении 20 млн лет в осалочном бассейне Московской синеклизы происходило медленное и неравномерное погружение земной коры. На давно остывшей докембрийской литосфере оно было возможным только за счет уплотнения пород в земной коре в результате проградного метаморфизма. Для возобновления девонского погружения после длительного периода стабильности было необходимо поступление в литосферу, а затем и в кору мантийных флюидов, катализировавших метаморфические реакции. Распределение погружения на площади было сильно неоднородным, а его картина неоднократно и коренным образом изменялась во времени. Это указывает на то, что приток в литосферу глубинных флюидов также был очень изменчивым, как во времени, так и в пространстве. Связь разломов в фундаменте с позднедевонским погружением почти не прослеживается. Вместе с изменчивостью его общей картины это свидетельствует о том, что за времена в несколько миллионов лет флюиды проникали в кору через ненарушенную мантийную литосферу мощностью 150 км. Отсюда следует, что флюиды обладали особыми свойствами – они были поверхностно активными и смачивали зерна кристаллических пород, распространяясь в межзерновом пространстве в виде тончайших пленок. Быстрые и частые изменения притока глубинных флюидов в литосферу исключают их связь с медленными крупномасштабными конвективными течениями в мантии. Слабый, но длительный, растянутый на десятки миллионов лет процесс поступления поверхностно активных мантийных флюидов, резко отличается также от мощных кратковременных выбросов флюидов из крупных мантийных плюмов при их подходе к литосфере. Значительные погружения коры и кимберлитовый магматизм в ряде удаленных друг от друга платформенных областей позволяют предполагать широкое распространение притока глубинных флюидов в литоферный слой на континентах. С ним было связано образование многих осадочных бассейнов во внутриплитных областях.

Ключевые слова: погружения коры, глубинный метаморфизм, уплотнение пород в нижней коре, поверхностно-активные флюиды, девон, Московская синеклиза

DOI: 10.31857/S2686739722601843

введение

Механизм образования осадочных бассейнов на континентах и на их окраинах — одна из главных проблем геодинамики. Ее различным аспек-

там посвящено большое количество исследований. В центральной части Восточно-Европейской платформы на литосфере с возрастом ≥1.5 млрд лет расположен осадочный бассейн Московской синеклизы. В конце раннего девона, около 400 млн лет назад, после долгого периода относительной стабильности, в этой области началось погружение коры. История его развития на протяжении 40 млн лет в среднем и позднем девоне изучена с исключительно высокой степенью детальности ([8] и ссылки в этой работе).

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта

Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный университет

имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^{*}E-mail: arty-evgenij@yandex.ru

^{**}E-mail: p.chekhovich@gmail.com

Формирование литосферы в области, занятой Московской синеклизой, завершилось более чем за 1 млрд лет до начала девона. Это не позволяет связать погружение в ней с часто используемым механизмом растяжения земной коры. Анализ истории развития погружений в среднем девоне ([3] и др.) исключает также заметный вклад таких возможных механизмов, как упругий изгиб литосферы вблизи конвергентных границ или воздействие на подошву литосферы нисходящих течений в мантии. Как было показано в цитированной работе, единственный известный механизм, который мог обеспечить в таких условиях погружение в Московской синеклизе, это уплотнение пород в коре в результате проградного метаморфизма ([1] и др.). Для его реализации был необходим приток в кору мантийных флюидов, катализировавших метаморфические реакции. В девоне на Восточно-Европейской платформе во многих местах проявлялся вулканизм, а в ряде областей и кимберлитовый магматизм ([10] и др.). С большой вероятностью это свидетельствует о поступлении в литосферу флюидов из нижележащей мантии. Рядом исследователей девонский вулканизм на Восточно-Европейской платформе связывался с подходом к литосфере мантийного плюма ([20] и др.). Такое явление должно было сопровождаться образованием крупного сводового поднятия и мощными излияниями траппов ([13] и др.).

Однако в девоне значительных поднятий коры на платформе не было, а объем девонских эффузивов на ней на порядки меньше объемов траппов в Больших магматических провинциях. В этих условиях поступление в литосферу глубинных флюидов не могло быть связано с подъемом плюмов, и, следовательно, оно представляло собой независимый процесс, протекающий в мантии.

Существование восходящих потоков флюидов в мантии под внутриплитными областями рядом исследователей предполагалось для объяснения различных магматических и тектонических процессов ([6] и др.). Достоверные данные о потоках флюидов в подлитосферной мантии, однако, отсутствовали. Анализируя историю развития погружения земной коры в Московской синеклизе, нам удалось показать, что под всей этой областью в среднем девоне в течение 18 млн лет в литосферу поступали из глубины мантийные флюиды, приток которых сильно изменялся как во времени, так и на площади [3].

В настоящей работе рассматриваются главным образом погружение коры и его глубинные причины, характерные для позднедевонского этапа развития Московской синеклизы. Для развития погружений в эту эпоху типичны те же особенности, что и для предшествующего среднедевонского этапа. Поэтому нисходящие движения коры в среднем и позднем девоне следует рассматривать как единый процесс, продолжавшийся около 40 млн лет. Вместе с тем, учитывая большой объем имеющихся фактических данных ([8] и др.), целесообразно рассмотреть позднедевонский этап развития в отдельной работе.

ДИНАМИКА ПОГРУЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА МОЩНОСТЕЙ

Сопоставление карт мощностей по среднему девону [3] и карт по позднедевонским единицам разреза, представленным ниже, позволяет в наглядном виде отразить динамику погружения коры в осадочном бассейне Московской синеклизы.

Предыстория (погружение коры в среднем девоне). В работе [3] приведены карты мощностей осадков, накопившихся в течение трех последовательных интервалов времени с конца раннего девона (~398 млн лет) и до начала позднего девона (~380.5 млн лет). С учетом датировок стратиграфических границ, имеющихся в последней версии Международной шкалы¹, продолжительность этих интервалов составляет приблизительно 6.5, 5.5 и 4 млн лет. Осадконакопление происходило в обстановках крайнего мелководья ([8] и др.). Как хорошо известно, в таких условиях мощности быстро затвердевающих осадков близко соответствуют величине погружения коры на каждом из интервалов.

При толщине докембрийской литосферы под Московской синеклизой ~ 200 км, характерная ширина ее упругого изгиба L должна составлять несколько сотен километров. На картах, приведенных в процитированных выше работах, величина погружения коры в ряде мест сильно изменяется на коротких расстояниях $L \sim 20-50$ км. Такое неоднородное погружение указывает на уплотнение пород на глубинах, в $\leq 1.5-2$ раза меньших величины L, т.е. в пределах земной коры. На древней литосфере причиной уплотнения коры за столь короткие промежутки времени (4— 6 млн лет) мог быть только метаморфизм с переходом пород в более высокоградные фации.

Для проявления метаморфизма после долгого периода стабильности требовалось появление в коре мантийных флюидов, катализировавших реакцию. На такую возможность уже давно указывал Д.С. Коржинский. В древнюю литосферу флюиды могли поступать только из нижележащей мантии. Анализ карт мощностей [3] показывает, что распределение на них погружений по площади бассейна существенно различается. За время ~4–6 млн лет строение и состав коры и мантийной литосферы с возрастом ≥1 млрд лет существенно измениться не могли. В таких усло-

¹ https://stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2022-02.pdf

виях изменчивость картины погружения коры указывает на сильные вариации притока глубинных флюидов в литосферный слой. Это включает как интенсивность самой инфильтрации, так и ее распределение на площади, и, возможно, изменения в составе флюидов.

На среднедевонском этапе погружение коры с разной интенсивностью охватывало почти всю Московскую синеклизу. Отсюда следует, что глубинные флюиды проходили в разном объеме через мантийную литосферу по всей площади синеклизы. Над расположенными в фундаменте синеклизы докембрийскими грабенами и авлакогенами значительное увеличение погружения вблизи разломов прослеживается лишь на самой ранней стадии (поздний эмс-ранний эйфель). Судя по заметной смене картины погружения, флюиды проходили через поликристаллическую среду мантийной литосферы и достигали земной коры не более, чем за 4-6 млн лет. Столь быстрое проникновение флюидов указывает на то, что они обладали особыми свойствами. В терминологии физикохимии дисперсных систем по П.А. Ребиндеру эти флюиды были поверхностно-активными и, образуя тончайшие пленки на их поверхности, они смачивали зерна пород мантийной части литосферы.

Важно отметить, что в течение отрезка времени 384.5—380.5 млн лет, соответствующего концу среднего (поздний живет) и началу позднего (ранний фран) девона, погружение земной коры в Московской синеклизе, оставаясь сильно неоднородным на площади, резко ускорилось в несколько раз. На этом этапе в двух глубоких депрессиях на востоке и на севере области средняя скорость погружения достигала ~80 м/млн лет, что для древних платформ является весьма высоким значением.

Средний фран. Снижение тектонической активности. На рис. 1 показана мощность осадков, накопившихся на крайнем мелководье в центральной части Московской синеклизы на интервале ~380-376.5 млн лет во второй половине среднего франа (семилукское время). Его продолжительность (3.5 млн лет) была примерно такой же, как и для отрезка времени в конце среднего и начале позднего девона (см. [3]). Несмотря на то что эти интервалы времени следовали почти один за другим, на втором из них картина погружения резко изменилась, а средняя скорость погружения коры на основной части площади уменьшилась по крайней мере в четыре раза – до 6-18 м/млн лет. Одновременно резко снизилась контрастность погружения, которая была характерна для конца среднего девона.

Поздний фран. Быстрое погружение. После относительно спокойного погружения в течение 3.5 млн лет в среднефранское время (см. рис. 1) на следующем интервале продолжительностью около 1 млн лет (376.5-375.5 млн лет) скорость погружения коры вновь возросла (рис. 2). При этом резко изменились распределение погружения на площади и его контрастность. Примерно за 1 млн лет кора погрузилась на 80-130 м на востоке и на 80-100 м на севере синеклизы. В нескольких местах погружение коры характеризовалось высокими градиентами. Так, южнее Шарьи, на палеосклоне 1 на расстоянии 19 км величина погружения изменяется на 40 м, а к югу от Галича образовался палеосклон 2 шириной 24 км и высотой 50 м. Ширина склона 3 высотой 40 м. расположенного к югу от Плавска, составляет 37 км.

Формирование таких крутых палеосклонов указывает на то, что, как и в среднем девоне, уплотнение пород, обусловленное метаморфизмом, происходило на относительно небольших глубинах, т.е. в пределах земной коры. Резкое ускорение метаморфизма свидетельствует о поступлении в литосферу значительного объема глубинных мантийных флюидов по всей площади Московской синеклизы. Судя по большой пространственной неоднородности погружения коры (см. рис. 2), приток в литосферу глубинных флюидов также был сильно неоднородным на площади. Перестройка картины погружения коры, показанная на рис. 1 и 2, произошла за время около 1 млн лет. Эта величина, сравнительно небольшая для тектонических процессов на древних платформах вместе с тем характеризует и время, за которое глубинные флюиды, поступившие в литосферу, прошли через ее мантийную часть мощностью ~150 км и достигли земной коры.

Быстро замедляющееся погружение в конце позднего франа. На следующем интервале продолжительностью ~2 млн лет (евлановско-ливенское время, ~375.5—373.5 млн лет) область быстрого погружения сильно сократилась и распалась на две значительно менее крупные области на севере и на востоке бассейна (рис. 3). Скорость погружения снизилась в них до ~50 м/млн лет, что для древних платформ тем не менее является достаточно высоким значением. В ряде мест погружение еще оставалось контрастным, как например, на северо-востоке в районе Шарьи.

Длительное медленное погружение в раннем и в начале среднего фамена. В эту эпоху общей продолжительностью 10 млн лет (~372–362 млн лет) погружение коры сильно замедлилось. Так, на рис. 4 в течение ~4.5 млн лет (задонское и елецкое время, ~372–367.5 млн лет) на основной части площади средняя скорость погружения составляла $v \approx 5-15$ м/млн лет, лишь на востоке достигая значений $v \approx 18$ м/млн лет. На юго-востоке за-



Рис. 1. Карта мощностей отложений среднефранского подъяруса верхнего девона (семилукский горизонт) ([8], с изменениями). Местоположение рассматриваемой области показано на врезке справа цветным прямоугольником. Пунктирные линии (здесь и на рис. 2–7) – разломы в фундаменте (см. ссылку в работе [3]), черная линия – эрозионная граница закартированных стратиграфических подразделений, штриховка – выходы подстилающих отложений.

фиксирована область со значительно более высокими скоростями погружения $v \approx 20-30$ м/млн лет и с крутыми палеосклонами, ограничивающими ее самую глубоко прогнутую часть. Она непосредственно прилегала к крупному региону, где в это время формировалась сверхглубокая Прикаспийская впадина. В настоящее время эта впадина заполнена 20–22 км осадков. На рассматриваемом интервале времени в ней произошло крупное погружение коры с развитием глубоководных обстановок [1].

На следующем этапе продолжительностью 5.5 млн лет (~367.5–362 млн лет) на основной части площади (рис. 5) погружение оставалось таким же медленным, $v \approx 5-15$ м/млн лет, но его общая картина сильно изменилась. На юго-востоке прекратилось погружение со значительно повышенными скоростями. Вместо этого в направле-



Рис. 2. Карта мощностей отложений верхнефранского подъяруса верхнего девона (петинский и воронежский горизонты) ([8] с изменениями). Черными отрезками (1–3) показаны зоны высоких градиентов изменения мощностей (пояснения в тексте).

нии от границ области к ее внутренней части сформировались пологие палеосклоны. Внизу они ограничены изолинией мощностей 70 м, соответствующей весьма умеренной средней скорости погружения $v \approx 13$ м/млн лет. По сравнению с предыдущими этапами, значительно уменьшилась неоднородность погружения на площади.

Ускорение погружения в среднем — позднем фамене. На этом сравнительно небольшом отрезке времени (362—358.5 млн лет) в Московской синеклизе вновь произошло ускорение погружения коры. В той части синеклизы, которая показана на рис. 6, на интервале ~362–360 млн лет средняя скорость погружения возросла до $v \approx 15-25$ м/млн лет. На следующем интервале (~360–358.5 млн лет, рис. 7) эта скорость достигла $v \approx 20-50$ м/млн лет. Одновременно сильно изменилось распределение погружения на площади. Из восточной части бассейна погружение сместилось к его центру, тогда как на предыдущем интервале времени (см. рис. 6) погружение в среднем возрастало в восточном направлении.



Рис. 3. Карта мощностей отложений верхнефранского подъяруса верхнего девона (евлановский и ливенский горизонты) ([8] с изменениями).

Погружение коры, постепенно замедляясь, продолжалось в Московской синеклизе в карбоне и в перми ([16] и др.), что указывает на продолжение поступления в кору мантийных флюидов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное рассмотрение показывает, что в осадочном бассейне Московской синеклизы в течение 40 млн лет в среднем и в позднем девоне скорость погружения коры и распределение погружения на площади непрерывно изменялись. В серии из десяти карт мощностей девонского осадочного чехла, построенных для хроностратиграфических интервалов продолжительностью 1—6 млн лет [3, 8], отчетливо видно, что на каждом из этапов геологического развития меняется как общая картина погружения, так и его скорость. Резкие перемены можно видеть, например, на рубежах ~384 млн лет, (см. рис. 4, 5 в [3]), и ~380 млн лет (рис. 5 [3] и рис. 1 в настоящей работе).

В начале позднего франа (~376 млн лет) после периода пониженной тектонической активности картина погружения коры полностью перестрои-



Рис. 4. Карта мощностей отложений нижнефаменского подъяруса верхнего девона (задонский и елецкий горизонты) ([8] с изменениями).

лась за ~1 млн лет, а скорость погружения возросла на порядок величины (см. рис 1, 2). В течение последующих 2 млн лет в конце позднего франа погружение замедлялось, и одновременно сильно менялось его распределение на площади (см. рис. 3). В дальнейшем за период 10 млн лет в раннем и в начале среднего фамена (см. рис. 4 и 5) погружение развивалось медленно (5–15 м/млн лет), но коренным образом изменялась конфигурация депоцентров на картах мощностей. Наконец, в конце позднего девона погружение вновь ускорилось до 20-50 м/млн лет, и за 3.5 млн лет его общая картина также успела полностью измениться.

Изменчивость притока глубинных флюидов в пространстве и во времени. Как показано выше, а также в работе [3], быстрые и значительные изменения скорости погружения коры в Московской синеклизе отражали пространственно-временные вариации притока в литосферу мантийных флюидов. Это, в принципе, могло быть как следствием изменения объема флюидов, поступающих с больших глубин в одной определенной области, так и результатом перемещения крупных блоков литосферы в область с другими параметрами потоков глубинных флюидов.



Рис. 5. Карта мощностей отложений среднефаменского подъяруса (лебедянский и оптуховский горизонты) ([8] с изменениями).

В девоне Московская синеклиза располагалась в составе литосферной плиты Лавруссия. Надежные данные о ее дрейфе отсутствуют, поскольку форма геомагнитного поля и его напряженность испытывали значительные колебания в данную эпоху [19]. При скоростях дрейфа 3— 5 см/год, характерных для крупных континентальных плит, за 40 млн лет литосфера Московской синеклизы могла переместиться по отношению к нижележащей мантии на расстояние 1200—2000 км. В таком случае в начале среднего и в конце позднего девона литосфера синеклизы должна была располагаться над областями в мантии с различным притоком флюидов. Анализ имеющихся данных показал, что резкая смена картины погружения в синеклизе несколько раз происходила достаточно быстро — за один или несколько миллионов лет. За такое время ее литосфера могла переместиться по отношению к нижележащей части мантии не более чем на 100 км. Тем не менее в течение ряда коротких эпизодов продолжительностью ~1 млн лет зафиксированы сильные изменения картины погружения в областях с характерным горизонтальным масштабом ~500 км. Это можно видеть, например, при сравнении карт на рис. 1 и 2, на рис. 6 и 7, а также сравнивая карты мощностей на рис. 4 и 5 в работе [3]. Такие данные свидетельствуют о



Рис. 6. Карта мощностей отложений среднефаменского подъяруса (плавский горизонт) ([8] с изменениями).

том, что главной причиной изменений в характере притока флюидов в литосферу были изменения собственных параметров этого процесса, поставлявшего флюид из нижележащей части мантии. Дрейф литосферных плит протекал гораздо медленнее и не мог обеспечить быстрых перемен в картине погружений на древнем кратоне. Возникает вопрос, можно ли связать поступление в литосферу глубинных флюидов с другими хорошо известными явлениями в недрах Земли.

Длительное поступление в литосферу слабого потока глубинных флюидов в крупных областях – новое явление в мантии Земли. В качестве главных явлений, протекающих в мантии Земли, обычно рассматриваются крупномасштабная конвекция ([17] и др.) и подъем плюмов ([14, 15] и др.). Характерный размер крупных конвективных ячеек в мантии измеряется тысячами километров, а время их развития составляет ~100 млн лет. Как показал анализ, проведенный нами в [3] и в настоящей работе, в среднем и в позднем девоне в течение 40 млн лет приток мантийных флюидов в литосферу Московской синеклизы сильно изменялся за времена ~1 млн лет и на расстояниях в первые сотни километров. Это не позволяет связать его с крупномасштабной мантийной конвекцией, характеризующейся совершенно иными параметрами.

ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ том 507 № 2 2022



Рис. 7. Карта мощностей отложений верхнефаменского подъяруса (озерский и хованский горизонты) ([8] с изменениями).

Многими исследователями предполагается поступление в литосферу флюидов из крупных мантийных плюмов, зарождающихся в низах мантии под воздействием процессов в земном ядре ([6, 18] и др.). Это явление рассматривалось и как причина девонской тектономагматической активизации на Восточно-Европейской платформе ([20] и др.). Непрерывный подъем в мантии струй легкого нагретого материала характерен лишь для некоторых горячих пятен (hot spots) типа Гавайского. В большинстве горячих пятен легкий нагретый материал всплывал в мантии на отдельных этапах в виде огромных капель (blobs) размером в несколько сотен километров и больше. Их подход к литосфере сопровождался образованием крупных сводовых поднятий ([13] и др.). В дальнейшем после замещения материалом плюма больших объемов мантийной литосферы происходили излияния огромных объемов траппов. Отсутствие таких явлений на Восточно-Европейской платформе исключает подход к ее литосфере крупных мантийных плюмов в девоне [3].

В большинстве случаев подъем флюидонесущих мантийных плюмов — это мощное, но кратковременное явление, происходящее в относительно небольшой области. При анализе развития девонского погружения земной коры в Московской синеклизе мы столкнулись с явлением иного типа. В среднем и позднем девоне глубинные флюиды поступали в ее литосферу на площади ~1 млн км². Их приток был очень слабым, но он продолжался 40 млн лет, а скорее всего, и дольше. Более того, поступление флюидов в литосферу было очень неоднородным на площади и сильно изменялось за времена ~1 млн лет.

В современных геодинамических построениях обычно считается, что в мантийную литосферу и в нижнюю часть земной коры глубинные флюиды поступают в основном по разломам и по разломным зонам ([4, 7] и др.). В крупные объемы пород флюилы проникают затем по системам трешин. из которых они диффундируют в прилегающие породы на расстояния до нескольких метров ([12] и др.). В девоне глубинные флюиды поступали в кору по всей площади Московской синеклизы, проходя через мантийную литосферу мощностью 150 км за ~1 млн лет. Как отмечалось, это указывает на то, что флюиды смачивали зерна кристаллических пород, т.е. они были поверхностно-активными. Другая важная особенность флюидов – способность катализировать проградный метаморфизм, вызывающий уплотнение пород в земной коре.

Данные о развитии девонского погружения в синеклизе не позволяют, однако, определить состав глубинных флюидов. Это отдельная проблема, которой посвящено множество исследований ([9] и др.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продолжительное поступление в литосферу крупной области слабого потока поверхностноактивных флюидов, сильно неоднородное на площади и быстро изменяющееся во времени – это новое, ранее не известное, явление в мантии Земли. С ним может быть связан ряд тектонических, магматических и метаморфических процессов, рассмотрение которых требует отдельного рассмотрения. Здесь можно упомянуть лишь некоторые возможные направления.

Многие осадочные бассейны на континентах были сформированы во внутриплитных областях за счет медленных погружений коры, не сопровождавшихся ее сильным растяжением. На Восточно-Европейской платформе такие бассейны покрывают в общей сложности 3 млн км² ([16] и др.). На Сибирской платформе к этому же типу структур относятся Тунгусская и Вилюйская синеклизы, а также многие осадочные бассейны в других областях ([1] и др.). Для формирования таких структур без значительных нарушений изостатического равновесия необходимо уплотнение пород в земной коре, происходящее за счет проградного метаморфизма.

Особенностью Московской синеклизы и непосредственно прилегающих к ней платформенных областей является уникальная степень изученности — около тысячи тщательно описанных скважин и обнажений. Это позволило реконструировать в ней историю развития погружения коры во времени и на площади с исключительно высокой степенью детальности [8]. К настоящему времени в результате поиска, разведки и добычи углеводородов по многим осадочным бассейнам накоплен огромный фактический материал. Было бы интересно провести аналогичный анализ данных и по другим крупным осадочным бассейнам.

Судя по широкому развитию в девоне погружений земной коры на разных континентах [1], поступление в литосферу мантийных флюидов в данную эпоху имело глобальный характер. Об этом может свидетельствовать также проявление девонского кимберлитового магматизма не только на севере и на юге Восточно-Европейской платформы, но и в тысячах километров от нее в Восточной Сибири [5], а также за ~10000 км в Австралии [18]. В таком случае в качестве причины поступления в литосферу мантийных флюидов можно предполагать воздействие на мантию процессов в земном ядре.

Поступление в литосферный слой мантийных флюидов ранее уже привлекалось для объяснения некоторых других типов тектонических движений. С ним связывался, в частности, проградный метаморфизм с уплотнением пород основного состава в земной коре, приводивший к быстрому образованию глубоководных впадин на месте мелководных шельфов ([1] и др.). Ретроградный метаморфизм с разуплотнением пород в земной коре при инфильтрации водных флюидов рассматривался как причина крупных поднятий коры, широко проявившихся в плиоцене и в плейстоцене [2]. Резкое размягчение литосферы с ее коротковолновыми деформациями во время быстрых погружений и поднятий объяснялось инфильтрацией в литосферу из глубины поверхностно-активных флюидов ([11] и др.). Эти ярко выраженные явления были связаны с относительно кратковременными эпизодами поступления в литосферу больших объемов мантийных флюидов. На примере Московской синеклизы в девоне мы рассмотрели явление существенного иного типа – длительно развивавшийся слабый приток в литосферу глубинных флюидов, сильно неоднородный на площади и быстро изменявшийся во времени. Сравнительный анализ этих двух различных явлений — задача дальнейших исслелований.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках госзаданий Минобрнауки России для ИФЗ РАН на 2019-2023 гг., № 0144-2019-0002 и МГУ им. М.В. Ломоносова (рег. № AAAA-A16-116042010088-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Артюшков Е.В. Физическая тектоника, М. Наука, 1993. 457 c.
- 2. Артюшков Е.В., Кориковский С.П., Массон Х., Чехович П.А. Новейшие поднятия коры на докембрийских кратонах. Основные закономерности и возможные механизмы // Геология и геофизика. 2018. № 11. C. 1737-1764. https://doi.org/10.15372/GiG20181101
- 3. Артюшков Е.В., Чехович П.А. Неоднородное погружение коры вследствие инфильтрации мантийных флюидов. Осадочный бассейн Московской синеклизы в среднем девоне // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 505. № 1. С. 76-88. https://doi.org/10.31857/S2686739722070039
- 4. Бушмин С.А., Вапник Е.А., Иванов М.В., Лебедева Ю.М., Савва Е.В. Флюиды гранулитов высоких давлений // Петрология. 2020. Т. 28. № 1. С. 23-54. https://doi.org/10.31857/S0869590320010021
- 5. Горев Н.И., Колесник А.Ю. Николенко Е.И., Проиенко Е.В., Старостин П.В., Шахурдина Н.К. История формирования среднепалеозойских кимберлитов Алахит-Мархинского поля Западная Якутия // Руды и металлы. № 2. 2020. С. 56-66. https://doi.org/10.24411/0869-5997-2020-10014
- 6. Добрецов Н.Л. Взаимодействие тектоники плит и тектоники плюмов: вероятные модели и типичные примеры // Геология и геофизика. 2020. Т. 61 (5-6). C. 617-647.

https://doi.org/10.15372/GiG2020102

- 7. Петров В.А. Сейсмогеодинамика и тектонофизика гидротермального рудообразования // Разведка и охрана недр. 2017. № 11. С. 37-42.
- 8. Родионова Г.Д., Умнова В.Т., Кононова Л.И., Овнатанова Н.С., Ржонсницкая М.А., Федорова Т.И. Девон Воронежской антеклизы и Московской синеклизы. МПР РФ Центральный региональный геологический центр. М. 1995. 265 с.
- 9. Сокол А.Г., Томиленко А.А., Бульбак Т.А., Сокол И.А., Заикин П.А., Соболев Н.В. Состав флюида восстановленной мантии по экспериментальным данным и результатам изучения флюидных включений в алмазах // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 5-6. C. 810-825.

https://doi.org/10.15372/GiG2020103

10. Юткина Е.В., Носова А.А., Сазонова Л.В., Ларионова Ю.О., Кондрашов И.А., Шумлянский Л.В., Альбеков А.Ю., Савко К.А. Девонские вулканиты Воронежского кристаллического массива, Восточно-Европейская платформа: эволюция расплавов и особенности коровой контаминации // Петрология. 2017. Т. 25. № 3. С. 233-264.

- 11. Artyushkov E.V., Mörner N.-A., Tarling D. The cause of loss of lithospheric rigidity in areas far from plate tectonic activity // Geophysical Journal International. 2002. V. 143 (3). P. 752-776.
- 12. Austrheim H. Fluid and deformation induced metamorphic processes around Moho beneath continent collision zones: Examples from the exposed root zone of the Caledonian mountain belt, W-Norway // Tectonophysics. 2013. V. 609. P. 620-635. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.030
- 13. Ernst R.E. Large Igneous Provinces. Cambridge University Press. 2014. V. 653. https://doi.org/10.1017/CBO9781139025300
- 14. French S.W., Romanowicz B. A. Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots // Nature. 525 (7567): 95-99. https://doi.org/10.1038/nature14876
- 15. Montelli R., Nolet G., Dahlen F., Masters G. A catalogue of deep mantle plumes: new results from finite-frequency tomography // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2006. 7 (11). https://doi.org/10.1029/2006GC001248
- 16. Nikishin A.M., Ziegler P.A., Stephenson R.A., Cloeting S.A.P.L., Furne A.V., Fokin P.A. Ershov, A.V., Bolotov S.N., Korotaev M.V., Alekseev A.S., Gorbachev V.I., Shipilov E.V., Lankreijer A., Bembinova E.Yu., Shalimov I.V. Late Precambrian to Triassic history of the East European Craton: dynamics of sedimentary basin evolution // Tectonophysics. 1996. V. 268 (1-4). P. 23-63.

https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00228-4

- 17. Schubert G., Turcotte D., Olson P. Mantle Convection in the Earth and Planets. Cambridge: Cambridge University Press. 2001. https://doi.org/10.1017/CBO9780511612879
- 18. Torsvik T.H., Burke K., Steinberger B., Webb S.J., Lewis D., Ashwal L.D. Diamonds Sampled by Plumes from the Core-mantle Boundary // Nature. V. 466. 15 July 2010. https://doi.org/10.1038/nature09216

- 19. Van der Boon A., Biggin A. J., Thallner D., et al. A persistent non-uniformitarian paleomagnetic field in the Devonian? // Earth-Science Reviews. V. 231. 2022. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104073
- 20. Wilson M., Lyashkevich Z.M. Magmatism and the geodynamics of rifting of the Pripyat-Dnieper-Donets rift, East European platform // Tectonophysics. 1996. V. 268. № 1-4. P. 65-81.

THE ROLE OF DEEP FLUIDS IN CRUSTAL SUBSIDENCE OF CRATONIC INTERIOR. MOSCOW SEDIMENTARY BASIN DURING THE LATE DEVONIAN

Academician of the RAS E. V. Artyushkov^{*a*,#} and P. A. Chekhovich^{*a*,*b*,##}

^aSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation ^bMoscow State University, Moscow, Russian Federation

> *[#]E-mail: arty-evgenij@yandex.ru ^{##}E-mail: p.chekhovich@gmail.com*

Slow crustal subsidence non-uniform in time and space occurred in the sedimentary basin of the Moscow Syneclise during 20 Ma in the Late Devonian. On a cool Precambrian lithosphere of the East European Craton, the subsidence of such a kind could occur only due to rock contraction in the lower crust resulting from prograde metamorphism. Crustal subsidence in the Middle and Late Devonian occurred after a long period of stability. To ensure the subsidence, influx into the lithosphere and then into the crust was necessary of mantle fluids which catalyzed metamorphic reaction. The distribution of crustal subsidence was very heterogeneous, and its pattern repeatedly and radically changed over time. This indicates that the influx of deep fluids into the lithosphere was also highly variable, both in time and in space. There is no evidence of any connection between large basement faults and the pattern of the Late Devonian crustal subsidence. Together with a high variability of the subsidence, this suggests that, over the course of several million years, fluids have penetrated in the crust through an undisturbed mantle lithosphere 150 km thick. This indicates that the fluids had specific properties – they were surface-active and wetted grains of crystalline rocks, spreading as thin films into the inter-grain space. Rapid and frequent changes in the influx of deep fluids into the lithosphere rules out their connection with slow large-scale convective currents in the mantle. Slow, but long-term, extended for tens of millions of years, influx of surface-active mantle fluids into the lithosphere is also quite different from powerful short-term outbursts of fluids from large mantle plumes approaching the lithospheric layer. The occurrence of crustal subsidence and kimberlite magmatism in a number of cratonic areas remote from each other suggests a widespread influx of deep fluids into the lithospheric layer on the continents.

Keywords: intraplate tectonics, crustal subsidence, deep prograde metamorphism, rock contraction, lower crust, surface active-fluids, Devonian, Moscow Syneclise