

УДК 551.244.2(571.1)

ЗАПАДНО-СИБИРСКИЙ ОСАДОЧНЫЙ БАССЕЙН. ОТСУТСТВИЕ СИЛЬНОГО РАСТЯЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ СВЕРХГЛУБОКОГО БУРЕНИЯ

© 2023 г. Академик РАН Е. В. Артюшков^{1,*}, П. А. Чехович^{1,2}

Поступило 31.03.2023 г.

После доработки 27.06.2023 г.

Принято к публикации 04.07.2023 г.

Одной из главных проблем геодинамики является механизм образования крупных осадочных бассейнов на континентах. Формирование таких структур вдали от конвергентных границ между плитами чаще всего объясняют сильным растяжением литосферного слоя – рифтогенезом. За ним должно следовать крупное и продолжительное погружение коры, обусловленное охлаждением растянутой литосферы. Характерной особенностью пострифтового погружения является уменьшение его скорости во времени – в несколько раз за сто миллионов лет. В Западно-Сибирском бассейне рифтогенез относят ко времени формирования пермско-триасовых грабен-рифтов. С последующим (пострифтовым) погружением многими исследователями связывается образование в бассейне мощной толщи мезозойских и кайнозойских осадков. За 86 млн лет, прошедших с начала среднего триаса и до конца средней юры, скорость пострифтового погружения должна была уменьшиться примерно в три раза. В действительности имела место противоположная тенденция. Судя по данным Тюменской и Ен-Яхинской сверхглубоких скважин, пробуренных на севере бассейна, скорость погружения коры за это время возросла в несколько раз. Столь резкое различие между ожидаемым пострифтовым погружением и реальным погружением коры свидетельствует о том, что растяжение литосферы не было главным механизмом погружения, и оно могло обеспечить лишь его небольшую часть. В таких условиях основной причиной погружения было уплотнение (увеличение плотности) пород в земной коре вследствие проградного метаморфизма.

Ключевые слова: погружения коры, глубинный метаморфизм, уплотнение пород в нижней коре, растяжение коры, Западно-Сибирский бассейн, сверхглубокие скважины, рифтогенез

DOI: 10.31857/S2686739723601175, EDN: NIVRIT

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных типов структур континентальной коры являются крупные и глубокие осадочные бассейны. Природа их образования представляет большой интерес, как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Данной проблеме посвящено большое число исследований, и для объяснения погружений земной коры предложен целый ряд различных механизмов.

В областях, расположенных вдали от границ между литосферными плитами, погружения земной коры километрового масштаба могут быть обусловлены двумя основными механизмами – растяжением литосферного слоя ([17, 19] и др.)

или уплотнением пород в его пределах ([1, 3] и др.). После публикации работы [17] подавляющее большинство исследователей стали объяснять образование глубоких осадочных бассейнов сильным растяжением коры – рифтогенезом. При этом часто предполагается, что растяжение охватывает весь литосферный слой ([19] и др.).

В кристаллическом фундаменте большинства глубоких осадочных бассейнов присутствуют сбросы. Это указывает на то, что погружение коры происходило в них в условиях ее растяжения. Отсюда на качественном уровне часто делается вывод о том, что погружение коры также было обусловлено ее растяжением. Но глубина структуры, сформированной за счет растяжения, тесно связана с его интенсивностью. Чтобы образовать осадочный бассейн глубиной в несколько километров, нужно растянуть литосферу на 10–15% (см. ниже и [1]). В кристаллическом фундаменте бассейнов такое растяжение неизбежно сопровождается значительными деформациями, что

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

может быть легко обнаружено по данным сейсмического профилирования.

Согласно классическим моделям ([19] и др.), другой характерной особенностью погружений коры, обусловленных ее сильным растяжением, является продолжение нисходящих движений после завершения начальной фазы растяжения. Это пострифтовое погружение обусловлено новым температурным распределением, установившимся в растянутой литосфере. Максимальная скорость пострифтового погружения достигается в период окончания растяжения. В дальнейшем погружение постепенно замедляется, и за время 50–100 млн лет его скорость уменьшается в несколько раз. Такое замедление погружения коры после ее растяжения (рифтогенеза) может быть выявлено по геологическим данным, когда в бассейне имеются глубокие скважины, вскрывающие весь разрез осадочного чехла и подстилающих его толщ рифтогенных вулканитов. В таком аспекте анализ данных глубокого бурения ранее не проводился.

По двум указанным признакам – интенсивному растяжению в фундаменте и замедлению погружения во времени – можно надежно выделять осадочные бассейны, образованные растяжением земной коры. В бассейнах, сформировавшихся во внутренних частях плит вдали от их границ, признаки растяжения отсутствуют, и поэтому крупные и длительно развивающиеся погружения коры здесь можно объяснить только уплотнением пород в литосферном слое [1]. В качестве его возможной причины был предложен проградный метаморфизм, катализированный поступающими в кору мантийными флюидами ([1, 3] и др.). Такой механизм может быть реализован под воздействием установленного Д.С. Коржинским явления, которое заключается в ускорении метаморфических реакций при поступлении в кору флюидов из мантии.

Во многих глубоких бассейнах строение осадочного чехла и фундамента детально изучено с помощью глубинной сейсморазведки. Это позволяет оценивать величину растяжения земной коры как сумму горизонтальных смещений поверхности фундамента на каждом из сбросов. Анализ строения ряда осадочных бассейнов глубиной 10–20 км показал, что наблюдаемое в них растяжение фундамента составляет несколько процентов, и оно обеспечило лишь небольшую часть (~1–2 км) погружения коры. Такая картина характерна, в частности, для Северо-Баренцевской, Северо-Чукотской, Прикаспийской и Южно-Каспийской впадин [2]. Отсутствие значительного растяжения коры наблюдается и во множестве других глубоких осадочных бассейнах ([1] и др.). Это указывает на широкое проявление крупных

погружений, обусловленных проградным метаморфизмом на различных уровнях коры.

СВЯЗЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОСАДОЧНОГО БАССЕЙНА С РИФТОГЕНЕЗОМ

Целью настоящего рассмотрения является установление процессов, которые привели к образованию Западно-Сибирского бассейна площадью ~3.5 млн км². Большинство исследователей его образование связывается с сильным растяжением земной коры и всего литосферного слоя ([6, 13, 15] и др.). Такая точка зрения также находит отражение в университетских курсах по региональной геологии и геодинамике. Ее можно кратко сформулировать следующим образом: *основной причиной формирования крупного эпипалеозойского осадочного бассейна на территории Западной Сибири является внутриконтинентальный рифтогенез*. На основании имеющихся датировок, выполненных по различным компонентам базальтовых пород ([11, 20] и др.), принято считать, что главная фаза растяжения коры и литосферного слоя может быть сопоставлена с достаточно узким интервалом времени вблизи границы перми и триаса. В это время в Западной Сибири формировались системы грабен-рифтов, а на Сибирском кратоне происходили излияния траппов.

Ранее уже отмечалось, что растяжение коры, связанное с образованием пермо-триасовых грабен-рифтов, могло обеспечить лишь малую часть погружения, наблюдаемого в Западно-Сибирском бассейне [1]. Поэтому было высказано предположение, что этот бассейн мог образоваться главным образом за счет увеличения плотности пород в земной коре вследствие проградного метаморфизма [1]. В то время фактических данных для проверки такой точки зрения было, однако, недостаточно. К настоящему времени бассейн покрыт сетью глубинных сейсморазведочных профилей ([7, 8] и др.). Пробурен также ряд глубоких и сверхглубоких скважин, вскрывающих мощный мезозойско-кайнозойский осадочный чехол ([9, 10] и др.). Все это позволяет подойти к обсуждению вопроса о механизме образования Западно-Сибирского осадочного бассейна на новом уровне. Далее мы рассматриваем данные по двум сверхглубоким скважинам – СГ-6 (Тюменской) и СГ-7 (Ен-Яхинской), пробуренным в области Надым-Пурского междуречья и в прилегающих к нему районах на севере Западной Сибири [10].

В низах триаса на глубинах более 6.5 км обе скважины достигли уровня, на котором прекратились излияния лав, свидетельствующие о предшествовавшем растяжении коры. Как отмечалось, одним из признаков сильного растяжения коры является замедление ее погружения на

пострифтовом этапе. За время порядка 70 млн лет скорость такого погружения должна уменьшиться в несколько раз. Используя данные по буровым колонкам скважин СГ-6 и СГ-7, несложно проверить, происходило ли такое замедление погружения коры во времени. Если такого замедления не происходило, то это будет свидетельствовать о том, что основная часть погружения была обусловлена каким-то иным механизмом.

РАСТЯЖЕНИЕ КОРЫ НА РУБЕЖЕ ПЕРМИ И ТРИАСА

Западно-Сибирский бассейн (рис. 1) подстилается корой преимущественно герцинского и каледонского возраста, и он является крупнейшим осадочным бассейном мира. Его северным продолжением служит глубокая впадина на шельфе Карского моря. С востока к бассейну прилегает обширная Сибирская платформа докембрийского возраста. На рубеже перми и триаса на ней произошли излияния огромных объемов траппов [20], суммарная мощность которых достигает 6 км. В ту же эпоху излияния траппов несколько меньшего масштаба проявились в Западной Сибири [5, 11].

Излияния базальтов вдоль раскрывавшихся трещин свидетельствуют о том, что в триасе кора Западной Сибири подвергалась растяжению. Большинство исследователей это явление уже десятки лет рассматривается как главная причина образования Западно-Сибирского осадочного бассейна ([6, 14] и многие другие). В качестве главного указания на проявление растяжения коры в Западной Сибири рассматривается существование в ней разветвленной системы ограниченных сбросами триасовых грабенов-рифтов (см. рис. 1) ([4, 6, 10, 12] и др.). Самый крупный из них, Колтогорско-Уренгойский, шириной 10–80 км пересекает Западную Сибирь, протягиваясь с севера на юг на 1800 км. В северо-западном направлении от него отходит Ямальский грабен. На востоке платформы расположен Худосеевский грабен. Предполагается, что грабены-палеорифты ограничены сбросами с амплитудой до 2 км. Над грабенами наблюдаются положительные аномалии силы тяжести, связанные с залеганием в них базальтов с высокой плотностью. Для грабенов характерны также повышенные тепловые потоки и магнитные аномалии, вытянутые вдоль простирания структур. Грабены перекрыты мезозойско-кайнозойским осадочным чехлом мощностью до 6–7 км и более.

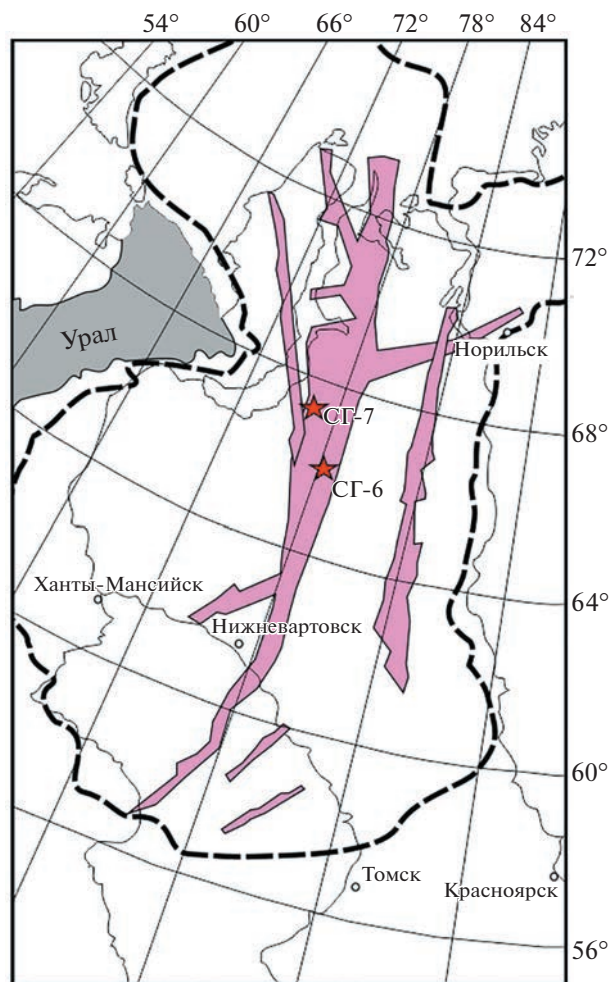


Рис. 1. Система рифтовых структур (цветная заливка) в палеозойском складчатом основании Западно-Сибирского осадочного бассейна ([10], с изменениями). Местоположение сверхглубоких скважин показано звездочками, границы осадочного бассейна – пунктирной линией.

РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ РАСТЯЖЕНИЯ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ОСАДОЧНОГО БАССЕЙНА

В качестве простейшей модели рассмотрим земную кору мощностью h_k^0 со средней плотностью ρ_k , располагавшуюся на начальном этапе вблизи уровня моря. Предполагается, что температура в литосферном слое линейно нарастает с глубиной, достигая в подошве литосферы значений, характерных для астеносферы. Допустим, что литосфера вместе с корой были растянуты однородно по глубине в β раз, что привело к подъему изотерм и повышению во столько же раз теплового потока через поверхность. После прекращения растяжения происходит постепенное охлаждение растянутой литосферы, и через несколько сотен миллионов лет в ней восстанавли-

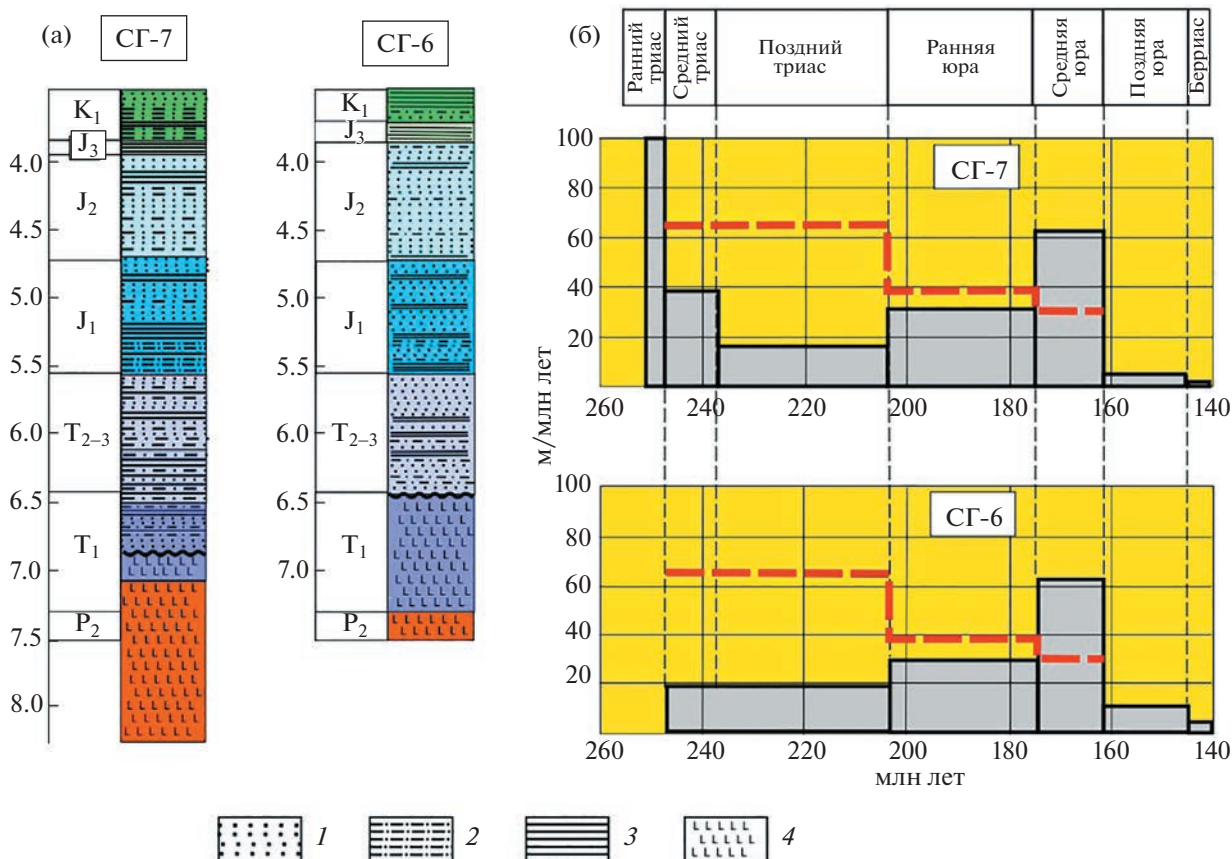


Рис. 2. Динамика пострифтового осадконакопления в северной части Западно-Сибирского бассейна. (а) разрезы мезозойских отложений по данным бурения сверхглубоких скважин ([10], с изменениями); 1 – песчаники, гравелиты, 2 – алевролиты, 3 – битуминозные аргиллиты, 4 – базальты. (б) средние скорости осадконакопления по данным бурения (серые столбцы диаграммы) и скорости, полученные исходя из теоретической модели пострифтового погружения за счет растяжения коры (красный пунктир; см. также рис. 3).

вается прежнее равновесное распределение температуры с глубиной. Охлаждение пород в литосферном слое сопровождается их уплотнением за счет термоупругого сжатия, что приводит к погружению коры и образованию впадины на ее поверхности. В условиях сохранения изостатического равновесия максимальная мощность заполнивших впадину осадков с плотностью ρ_{oc} равна

$$h_{oc} = [(\rho_m - \rho_k)/(\rho_m - \rho_{oc})](1 - 1/\beta) h_k^0. \quad (1)$$

Здесь $\rho_m = 3330 \text{ кГ/м}^3$ – плотность мантии. По этой мощности осадков h_{oc} из соотношения (1) можно определить интенсивность растяжения β , с которым было связано образование впадины:

$$\beta = \{1 - [(\rho_m - \rho_{oc})/(\rho_m - \rho_k)](h_{oc}/h_k^0)\}^{-1}. \quad (2)$$

В большинстве областей, расположенных вблизи уровня моря, средняя мощность коры равна $h_k^0 = 40 \text{ км}$, а ее средняя плотность $\rho_k = 2840 \text{ кГ/м}^3$. В отсутствие крупных масс тяжелых известняков

в мезозойско-кайнозойском осадочном бассейне Западной Сибири средней плотностью осадков можно положить равной $\rho_{oc} = 2300 \text{ кГ/м}^3$. Подставляя эти значения в (1), (2), получаем:

$$h_{oc} = 19(1 - 1/\beta)_{KM} \quad (3)$$

$$\beta = [1 - 0.053 \times (h_{oc})_{KM}]^{-1}. \quad (4)$$

Для Западно-Сибирского осадочного бассейна величину h_{oc} можно оценить, например, по данным двух сверхглубоких скважин, пробуренных в его северной части – Тюменской скважины СГ-6 (глубина 7502 м) и Ен-Яхинской скважины СГ-7 (8250 м) [9, 10]. Расположение скважин показано на рис. 1, а на рис. 2 а представлены нижние части соответствующих разрезов.

На глубине более 7 км обе скважины вошли в базальты верхней перми. В восточной части Надым-Пурской области (СГ-6) излияния базальтов еще продолжались в раннем триасе, когда накопилось более 800 м базальтов. Около 200 м базальтов накопились в начале раннего триаса в более

западных районах (СГ-7). В дальнейшем интенсивные излияния во всей Надым-Пурской области не происходили, и погружение коры развивалось там преимущественно в обстановках терригенного осадконакопления.

Как следует из рис. 2 а, растяжение коры с излияниями базальтовых магм прекратилось на рубеже раннего и среднего триаса в области Тюменской скважины и в начале раннего триаса в области Ен-Яхинской скважины. Предположим, что последующее погружение коры было целиком обусловлено ее предшествовавшим растяжением. Для простейших оценок его интенсивности можно воспользоваться мощностью отложений, накопившихся выше указанных уровней после завершения растяжения. В Тюменской скважине эта мощность составляет $h_{oc} = 6.4$ км, а в Ен-Яхинской $h_{oc} = 6.9$ км. Подставляя данные значения в соотношение (4), получаем:

$$\beta = 1.51-1.58. \quad (5)$$

При этом относительное растяжение коры $\varepsilon = \beta - 1 = 51-58\%$. Таким образом, если погружение коры в рассматриваемых областях имело пострифтовый характер, т.е. было связано с предшествовавшим растяжением, то кору перед этим нужно было бы растянуть, по крайней мере, в полтора раза, т.е., весьма значительно. В Ярудейской скважине на западном склоне бассейна мощность мезозоя и кайнозоя составляет 4.4 км [10]. Подставляя $h_{oc} = 4.4$ км в (2), находим: $\beta = 1.30$, $\varepsilon = 30\%$, что также соответствует достаточно интенсивному растяжению.

Ранее в работе [6] интенсивность растяжения в районе скважины СГ-6 оценивалась на основе данных об истории развития погружения коры. Использовалась модель с растяжением литосферы, неоднородным по глубине. Предполагалось, что в бассейне имели место несколько этапов сильного растяжения. Исследователи пришли к выводу, что растяжение привело к утонению коры в 1.7 раза. Такие высокие оценки β -фактора, на первый взгляд, согласуются с данными о значительном утонении консолидированной коры под осевой частью бассейна на севере Западной Сибири [18].

При современных возможностях численного счета погружение коры в осадочном бассейне может быть описано в рамках множества различных моделей растяжения литосферного слоя. При этом с самого начала обычно предполагается, что погружение коры было целиком обусловлено ее растяжением. Но, согласно соотношению (3), величина нагруженного осадками погружения коры h_{oc} тесно связана с интенсивностью ее растяжения. Поэтому прежде всего необходимо убедиться, что наблюдаемое растяжение коры было достаточным для ее погружения. Более того, по-

стрифтовое погружение растянутой литосферы развивается по определенному закону [19], экспоненциально затухая во времени. Следовательно, необходимо также определить, происходило ли в бассейне значительное замедление погружения коры во времени, как это характерно для пострифтового погружения остывающей литосферы. Если оба указанных условия в рассматриваемом бассейне не соблюдаются, то большой вклад растяжения литосферы в его образование исключен.

РАЗВИТИЕ ПОСТРИФТОВОГО ПОГРУЖЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ

Для описания погружения земной коры в результате сильного растяжения литосферного слоя в крупных областях обычно используется модель чистого сдвига [19]. Предполагается, что литосфера с температурой, линейно нарастающей по глубине, располагается вначале на уровне моря. В момент времени $t = 0$ происходит однородное по глубине и чрезвычайно быстрое растяжение литосферы. Чтобы сохранить изостатическое равновесие, растянутая литосфера испытывает моментальное синрифтовое погружение. Затем при $t > 0$ развивается ее постепенное пострифтовое погружение. Оно обусловлено охлаждением и уплотнением пород, развивающимися по мере постепенного охлаждения утоненной литосферы и установления в ней прежнего температурного распределения с глубиной.

В ряде районов Западной Сибири большие мощности вулканитов накопились еще в перми ([7, 8] и др.). Крупные излияния траппов продолжались в ней и в начале триаса. Следовательно, если в Западной Сибири и имело место интенсивное синрифтовое погружение, то оно произошло не в виде мощного короткого импульса, а было растянуто на значительный интервал времени. Модель [19] к этой эпохе неприменима, тем более что история развития палеозойского погружения коры остается не изученной. Пострифтовое же погружение задокументировано буровыми данными, как в скважинах СГ-6 и СГ-7 на рис. 2, так и в ряде других скважин. Это позволяет провести качественное сравнение реального погружения коры по данным сверхглубоких скважин в триасе и в юре с пострифтовым погружением, которое развивалось бы в них после завершения быстрого растяжения согласно модели чистого сдвига.

В случае, если пострифтовое погружение компенсируется осадконакоплением, то в течение ≈ 100 млн лет, мощность осадков, отложившихся за время t , с хорошей точностью описывается соотношением (там же):

$$h_{oc}(t) = H[1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (6)$$

Скорость погружения коры, компенсированного осадконакоплением,

$$v_{oc} = dh_{oc}/dt = (H/\tau) \exp(-t/\tau). \quad (7)$$

В этих соотношениях τ — характерное время восстановления температурного равновесия в литосферном слое, а H — достигаемая в конечном итоге мощность осадков во впадине. Величина τ зависит от мощности литосферы до растяжения d и возрастает пропорционально ее квадрату d^2 . В работе [19] мощность литосферы была принята равной $d = 125$ км, и при этом характерное время тепловой релаксации оказалось равным $\tau = 73$ млн лет. Мощность литосферы под докембрийскими платформами обычно оценивается как $d \sim 200$ км [16], и время тепловой релаксации τ может для нее составлять $\tau \sim 200$ млн лет. В Западной Сибири под осадками залегает кристаллический фундамент преимущественно каледонского и герцинского возраста. В начале мезозоя мощность литосферы там должна была быть значительно ниже, чем на докембрийских платформах. В таких условиях, следуя [19], в первом приближении для простых оценок можно воспользоваться указанным значением $\tau = 73$ млн лет.

СКОРОСТЬ ПОГРУЖЕНИЯ ПО ДАННЫМ СКВАЖИНЫ СГ-6

По данным скважины СГ-6 накопление значительных объемов вулканитов прекратилось к концу раннего триаса. Поэтому можно предположить, что на рубеже раннего и среднего триаса, 247 млн лет назад, растяжение коры там завершилось, и началось ее пострифтовое погружение. На него неизбежно накладывались проявляющиеся на континентах вертикальные движения коры, обусловленные другими механизмами. Так, в олигоцене в связи с началом новейших поднятий земной коры на континентах произошло осушение Западной Сибири. В таких условиях нельзя точно определить мощность осадков H , которая была бы достигнута после установления нового температурного распределения в растянутой литосфере. Для простых оценок положим эту величину равной мощности осадков, накопившихся в области Тюменской сверхглубокой скважины к началу новейших поднятий: $H = 6400$ м.

На рис. 3 для данного значения H и времени релаксации $\tau = 73$ млн лет с помощью соотношения (6) показана кривая наращивания мощности осадков, которые компенсировали бы пострифтовое погружение коры. Для этих значений H и τ на том же рисунке построена кривая скорости (7) погружения, компенсированного осадконакоплением. Согласно (7), эта скорость экспоненциально убывает со временем. Следует отметить, что кривые рис. 3 описывают пострифтовое погружение коры с хорошей точностью лишь для

интервала времени ≈ 100 млн лет. В настоящей работе мы анализируем, однако, погружение коры в скважине СГ-6 на более коротком интервале времени продолжительностью 86 млн лет (от начала среднего триаса и до конца средней юры). Это обеспечивает достаточную точность рассмотрения.

Представленное на рис. 2 а стратиграфическое расчленение разреза скважины СГ-6 позволяет, в принципе, построить для нее кривую погружения коры и сопоставить ее с типичной кривой пострифтового погружения. Нас здесь интересует, однако, только один вопрос: можно ли считать растяжение главной причиной погружения коры в области скважины СГ-6. Для получения однозначного ответа можно воспользоваться следующим простым и наглядным приемом.

Мощности нижней и средней юры в скважине СГ-6 (см. рис. 2 а) почти одинаковы, и они лишь на 10% ниже суммарной мощности среднего и позднего триаса. Но хроостратиграфический объем этих подразделений значительно различается (см. рис. 2 б). Суммарная продолжительность среднего и позднего триаса (45.8 млн лет) примерно в 1.7 раза больше продолжительности ранней юры (26.7 млн лет) и в 3.5 раза больше продолжительности средней юры (13.2 млн лет), которая, в свою очередь, в два раза короче ранней юры. В результате, как видно из рис. 2 а, при близкой мощности осадков этих подразделений, средние скорости осадконакопления для них сильно различаются (рис. 2 б). Для среднего—позднего триаса, ранней и средней юры они равны соответственно 19.7, 30 и 62.9 м/млн лет. Эти данные показывают, что за 86 млн лет с начала среднего триаса до конца средней юры в области скважины СГ-6 средняя скорость погружения возросла в несколько раз.

Продолжительность указанного интервала (86 млн лет) превышает принятое выше характерное время восстановления температурного равновесия в литосфере после ее сильного растяжения (73 млн лет согласно [19]). В соответствии с зависимостью (7) к концу средней юры пострифтовое погружение должно было бы замедлиться примерно в два раза. На рис. 3 представлена мощность пострифтовых осадков, накопившихся за время t после окончания растяжения. По этой кривой легко определить, сколько осадков отложилось бы за каждый из трех интервалов времени, указанных на рис. 2 б. Разделив мощность осадков каждого интервала на его продолжительность, найдем среднюю скорость погружения коры в течение этих отрезков времени (65.5, 37.4 и 34.1 м/млн лет). Полученные значения средней скорости погружения показаны на рис. 2 б красной линией. Как нетрудно видеть, со среднего триаса по среднюю юру средняя скорость постри-

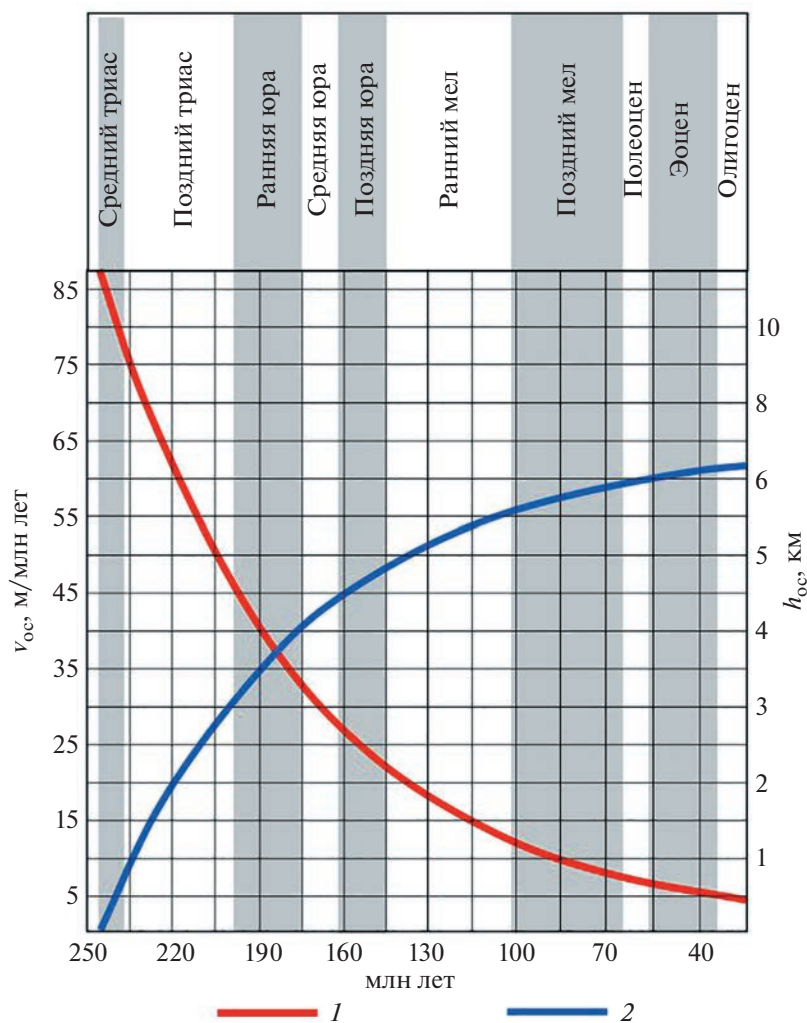


Рис. 3. Развитие во времени пострифтового погружения коры в Западной Сибири после завершения растяжения на рубеже раннего и среднего триаса. 1 – скорость погружения, компенсированного осадконакоплением (м/млн лет) и определяемого соотношением (7); 2 – мощность осадков (км), которые компенсируют погружение, развивающееся согласно соотношению (6).

фтового погружения в области скважины СГ-6 должна была уменьшиться вдвое. В действительности за то же время скорость погружения коры в несколько раз увеличилась. Отсюда следует, что основная часть погружения коры в рассматриваемой области не связана с растяжением коры, и она была обусловлена иным механизмом.

СКОРОСТЬ ПОГРУЖЕНИЯ ПО ДАННЫМ СКВАЖИНЫ СГ-7

Ен-Яхинская скважина СГ-7 расположена в 160 км к северо-западу от Тюменской скважины. Мощности ранней и средней юры в СГ-7 почти такие же, как в Тюменской скважине. Средняя скорость погружения коры в скважине в средней юре (~62 м/млн лет) была вдвое выше, чем в ран-

ней юре, и в 3 раза выше, чем в позднем триасе. При погружении, обусловленном предшествовавшим рифтогенезом, с позднего триаса и по среднюю юру скорость погружения коры в области СГ-7 должна была, напротив, уменьшиться в несколько раз. В действительности погружение коры в несколько раз ускорилось. Это указывает на то, что в юрское время вся территория Надым-Пурского междуречья находилась в пределах блока коры, погружавшегося как единое целое под действием механизма, не связанного с растяжением.

Следует отметить, что на ранней стадии погружения в области скважины СГ-7 происходило существенное замедление погружения. Накопление вулканитов завершилось там через 1–2 млн лет после начала триаса. На последующем отрез-

ке триаса длительностью 2–3 млн лет мощность отложений в скважине составляет 280 м, что соответствует высокой средней скорости погружения ~90–140 м/млн лет. Однако уже в среднем триасе продолжительностью 10 млн лет средняя скорость погружения упала до 38 м/млн лет, а в дальнейшем происходило ее возрастание во времени. Эти данные могут указывать на то, что в области Ен-Яхинской скважины в течение ~10 млн лет происходило погружение коры, обусловленное растяжением коры в самом начале триаса. В таком случае растяжение коры на данном этапе могло, однако, обеспечить накопление не более ~0.5 км пострифтовых отложений. Нельзя также исключить и другие возможные источники погружения на данном этапе. Одной из причин могло быть, например, уплотнение небольшого объема пород в нижней коре за счет проградного метаморфизма, катализированного поступлением небольшого объема флюидов из мантии [1, 3].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Механизм образования крупных осадочных бассейнов на континентах и их окраинах — одна из главных проблем в геодинамике. Образование бассейнов, расположенных вдали от конвергентных границ между плитами, часто объясняют сильным растяжением литосферного слоя ([19] и др.). Существуют, однако, представления о формировании осадочных бассейнов в результате уплотнения пород в земной коре вследствие проградного метаморфизма ([1, 3] и др.). Понимание механизма образования крупных осадочных бассейнов весьма важно как с фундаментальной точки зрения, так и для прогнозирования и поиска месторождений углеводородов. Этот вопрос остается, однако, дискуссионным.

Образование крупнейшего в мире Западно-Сибирского осадочного бассейна большинством исследователей связывается в первую очередь с растяжением литосферы ([6, 13, 15] и др.). Предполагается, что крупное погружение коры, осуществившееся в нем в мезозойское и кайнозойское время, было обусловлено предшествующим растяжением литосферного слоя — рифтогенезом, который проявился в конце перми и в начале триаса. Характерной особенностью пострифтового погружения коры является постепенное уменьшение скорости погружения во времени ([19] и др.). С начала среднего триаса и до конца средней юры пострифтовое погружение коры должно было замедлиться в несколько раз. Однако, как показал анализ данных Тюменской и Ен-Яхинской сверхглубоких скважин, пробуренных на севере Западной Сибири, за то же время погружение коры в них в несколько раз ускорилось.

Столь резкое несоответствие фактических данных и теоретических построений указывает на

то, что растяжение литосферы могло быть ответственным лишь за небольшую часть погружения коры, фиксирующегося по данным скважин. В таких условиях растяжение коры не являлось главным механизмом ее погружения и было в основном связано с другим процессом — увеличением плотности (уплотнением) пород в нижележащей части литосферного слоя.

Механизмы погружения, действующие в других геодинамических обстановках (например, вблизи границ плит), для Западно-Сибирского бассейна не применимы. В частности, упругий изгиб литосферного слоя, формирующий, как полагают, передовые прогибы складчатых поясов, не мог функционировать в Западной Сибири, поскольку коллизионные процессы в мезозойско-кайнозойское время в прилегающих областях не происходили. К тому же депоцентр бассейна располагается в его внутренней части, а не у его границ. Погружения коры во внутриплитных областях могут быть связаны также с воздействием на подошву литосферы нисходящих течений в нижележащей части мантии (так называемая, динамическая топография). Эта модель не согласуется с длительной историей формирования Западно-Сибирского бассейна, продолжавшейся более двухсот миллионов лет примерно в одних и тех же границах. Нисходящие течения в мантии не могли сохраняться столь долгое время под бассейном, дрейфовавшим, к тому же, в составе Евразийской плиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного рассмотрения можно утверждать, что единственным известным механизмом погружения в отсутствие сильного растяжения может быть уплотнение пород в коре, обусловленное проградным метаморфизмом. Результаты проведенного в этой статье анализа данных по сверхглубоким скважинам СГ-6 и СГ-7, строго говоря, означают, что вывод об отсутствии в мезозое и кайнозое значительного растяжения коры относится лишь к самым северным регионам Западной Сибири — так называемым Надым-Пурской и Пур-Тазовской областям. Применимость предложенного механизма ко всему Западно-Сибирскому осадочному бассейну требует, однако, дополнительного рассмотрения и переинтерпретации большого объема имеющихся геолого-геофизических материалов. В частности, в последние годы был построен ряд высокоточных сейсмогеологических разрезов через мезозойско-кайнозойский осадочный чехол для севера Западной Сибири и Карского моря ([7, 8] и др.). На их основе будет, возможно, надежно оценена величина растяжения коры предшествовавшего формированию огромного осадочного бассейна в мезозое и кайнозое. Актуальной зада-

чей дальнейших исследований следует считать также изучение процессов в мантии Земли, которые привели к образованию Западно-Сибирского осадочного бассейна без участия значительного растяжения земной коры.

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. № АААА-А16-116042010088-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артюшков Е.В.* Физическая тектоника, М. Наука, 1993, 457 с.
2. *Артюшков Е.В., Беляев И.В., Казанин Г.С., Павлов С.П., Чехович П.А., Шкарубо С.И.* Механизмы образования сверхглубоких прогибов: Северо-Балтийская впадина. Перспективы нефтегазоносности // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 5–6. С. 821–846.
3. *Артюшков Е.В., Чехович П.А.* Роль глубинных флюидов в погружении коры древнего кратона. Осадочный бассейн Московской синеклизы в позднем девоне // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 2. С. 119–131. <https://doi.org/10.31857/S2686739722601843>
4. *Астафьев Д.А., Скоробогатов В.А., Радчикова А.М.* Грабен-рифтовая система и размещение зон нефтегазоаккумуляции на севере Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2008. № 4. С. 2–8.
5. *Бочкарев В.С.* О распространении пермо-триасовых траппов в Западной Сибири // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2017. Т. 4 (32). С. 115–123.
6. *Добрецов Н.Л., Полянский О.П., Ревердатто В.В., Бабичев А.В.* Динамика нефтегазоносных бассейнов в Арктике и сопредельных территориях как отражение мантийных плюмов и рифтогенеза // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1145–1161.
7. *Конторович В.А., Аюнова Д.В., Губин И.А., Калинин А.Ю., Калинина Л.М., Конторович А.Э., Малышев Н.А., Скворцов М.Б., Соловьев М.В., Сурикова Е.С.* История тектонического развития Арктических территорий и акваторий Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 3–4. С. 423–444.
8. *Конторович В.А., Аюнова Д.В., Гусева С.М., Калинин Л.М., Калинин А.Ю., Канаков М.С., Соловьев М.В., Сурикова Е.С., Торопова Т.Н.* Сейсмогеологическая характеристика осадочных комплексов и нефтегазоносность Ямальской, Гыданской и Южно-Карской нефтегазоносных областей (Арктические регионы Западной Сибири, шельф Карского моря) // Геофизические технологии. № 4. 2018. С. 10–26. <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2018-4-3>
9. *Мазур В.Б.* Тюменская сверхглубокая скважина Пермь: КамНИИКИГС, 1996. 374.
10. *Мещеряков К.А., Карасева Т.В.* Особенности формирования триасовых прогибов севера Западной Сибири в связи с нефтегазоносностью // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т. 5. № 10. С. 9. EDN OYQEVV
11. *Ронкин Ю.Л., Карасева Т.В., Маслов, А.В.* Первые ^{147}Sm – ^{147}Nd -данные для пород, представляющих интервал 6925.2–8250 метров сверхглубокой скважины СГ-7 (Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 2. С. 149–153. <https://doi.org/10.31857/S2686739721020158>
12. *Сараев С.В., Батурина Т.П., Пономарчук В.А., Травин А.В.* Пермотриасовые вулканиты Колтогорско-Уренгойского рифта Западно-Сибирской геосинеклизы // Геология и геофизика. 2009. Т. 50 (1). С. 4–20.
13. *Смирнов О.А., Бородкин В.Н., Лукашов А.В., Плавник А.Г., Трусов А.И.* Региональная модель рифтогенеза и структурно-тектонического районирования севера Западной Сибири и Южно-Карской синеклизы по комплексу геолого-геофизических исследований // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2022. Т. 17. № 1. http://www.ngtp.ru/rub/2022/1_2022.html
14. *Сурков В.С., Жеро О.Г.* Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. М.: Недра, 1981. 243 с.
15. *Сурков В.С., Смирнов Л.В., Жеро О.Г.* Раннемезозойский рифтогенез и его влияние на структуру литосферы Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. 1987 (9). С. 3–11.
16. *Artemieva I.M.* The Lithosphere, 2011, Cambridge University Press.
17. *Artemjev M.E., Artyushkov E.V.* Structure and isostasy of the Baikal rift and the mechanism of rifting // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 1197–1211.
18. *Cherepanova Yu., Artemieva I.M., Thybo H., Chemia Z.* Crustal structure of the Siberian craton and the West Siberian basin: An appraisal of existing seismic data // Tectonophysics. 2013. V. 609. P. 154–183. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.004>
19. *McKenzie D.* Some remarks on the development of sedimentary basins // Earth Planet. Sci. Lett. 1978. V. 40. P. 25–32.
20. *Reichow M.K., Saunders A.D., White R.V., Al'Mukhammedov A.I., Medvedev A.Ya.* Geochemistry and petrogenesis of basalts from the West Siberian Basin: an extension of the Permo–Triassic Siberian Traps, Russia // Lithos. 2005. V. 79 (3–4). P. 425–452.

THE WEST SIBERIAN SEDIMENTARY BASIN. AN ORIGIN WITHOUT STRONG CRUSTAL STRETCHING – THE SUPERDEEP DRILLING DATA ANALYSIS

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

^a*Institute of the Earth's Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[#]*e-mail: arty-evgenij@yandex.ru*

Mechanism of formation of large sedimentary basins on the continents is among the main problems in geodynamics. The formation of such structures far from convergent plate boundaries is most often explained by intense stretching of the lithospheric layer - rifting. This should be followed by a large and prolonged crustal subsidence due to cooling of the stretched lithosphere. A characteristic feature of the post-rift subsidence is a decrease in its rate in time - several times over a hundred million years. Rifting in the West Siberian Basin was associated with the formation of Permian-Triassic graben-rifts. The subsequent (post-rift) subsidence is considered by many researchers as a cause of formation of a thick layer of Mesozoic and Cenozoic sediments in the basin. Over the 86 Ma that passed from the beginning of the Middle Triassic to the end of the Middle Jurassic, the rate of post-rift subsidence should have decreased by about a factor of three. In fact, the opposite trend took place. Judging by the data of the Tyumen (SG-6) and En-Yakhin (SG-7) superdeep wells drilled in the north of the basin, the rate of crustal subsidence increased several times during this period of time. Such a sharp difference between the expected post-rift subsidence and the actual subsidence of the crust indicates that lithospheric stretching was not the main subsidence mechanism, and it could provide only a small part of the subsidence. Under such circumstances, the main cause of the subsidence should be contraction of rocks in the Earth's crust due to prograde metamorphism.

Keywords: crustal subsidence, deep seated metamorphism, rock contraction in the lower crust, crustal stretching, West Siberian Basin, superdeep boreholes, rifting