

УДК 551.244.2(571.1)

## ЗАПАДНО-СИБИРСКИЙ ОСАДОЧНЫЙ БАСЕЙН. ПОГРУЖЕНИЕ КОРЫ ВСЛЕДСТВИЕ УПЛОТНЕНИЯ ПОРОД В ЕЕ НИЖНЕЙ ЧАСТИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОГРАДНОГО МЕТАМОРФИЗМА

© 2024 г. Академик РАН Е.В. Артюшков<sup>1,2,\*</sup>, П.А. Чехович<sup>1,2,\*\*</sup>

Поступило 23.11.2023 г.

После доработки 14.12.2023 г.

Принято к публикации 22.12.2023 г.

Рассмотрена история развития погружения земной коры в мезозое и кайнозое в Западно-Сибирском бассейне – крупнейшем осадочном бассейне мира. Его образование большинством исследователей связывается с погружением коры на пострифтовом этапе вслед за эпизодом сильного растяжения литосферы 250 млн лет назад на рубеже перми и триаса. Характерной особенностью пострифтового погружения является уменьшение его скорости во времени. За мезозой и кайнозой эта скорость должна была уменьшиться на порядок. Однако анализ протяженных (700–900 км) сейсмогеологических разрезов на севере Западной Сибири и в акватории Карского моря показывает, что с начала мезозоя в указанных областях в среднем происходило ускорение погружения коры. В таких условиях растяжением литосферы в них могла быть обусловлена лишь малая часть общего погружения. Характер деформаций в подошве мезозойско-кайнозойского осадочного чехла свидетельствует о том, что растяжением было обусловлено не более нескольких процентов от наблюдаемого общего погружения коры на 6–7 км. В Западной Сибири земная кора близка к изостатически равновесному положению. Поэтому в отсутствие сильного растяжения коры накопление на ней мощной толщи осадков могло быть вызвано только увеличением плотности пород в нижней части коры в результате проградного метаморфизма. Для получения приведенных здесь результатов нами были впервые использованы некоторые простые приемы для анализа структуры осадочных толщ в Западно-Сибирском бассейне. Множество детальных сейсмогеологических разрезов опубликовано для других бассейнов на разных континентах. Реализованные в этой статье способы их интерпретации могут без труда применяться в глобальном масштабе для определения роли растяжения в формировании глубоких осадочных бассейнов.

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

DOI:

### ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть площади континентов и их окраины покрыты обширными и глубокими осадочными бассейнами. Для формирования таких структур в отсутствие сильного растяжения докембрийской коры и вдали от границ между литосферными плитами требовалось уплотнение пород в литосферном слое ([1, 3] и др.).

Вслед за работами 70-х годов ([16, 19] и др.) образование таких структур большинством исследователей связывается с сильным растяжением литосферного слоя, проявляющемся обычно в форме рифтогенеза. За последние 300–400 млн лет ряд крупных осадочных бассейнов образовался на коре докембрийского возраста, большие деформации которой прекратились полмиллиарда лет назад или раньше. К ним относится, например, бассейн Московской синеклизы во внутренней части Восточно-Европейской платформы.

Сильное растяжение коры более позднего, палеозойского, возраста привело к образованию глубоких бассейнов в грабенах Центральный и Викинг в Северном море. Возникает вопрос, было ли растяжение главной

<sup>1</sup>Институт физики Земли Российской Академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Музей землеведения, Москва, Россия

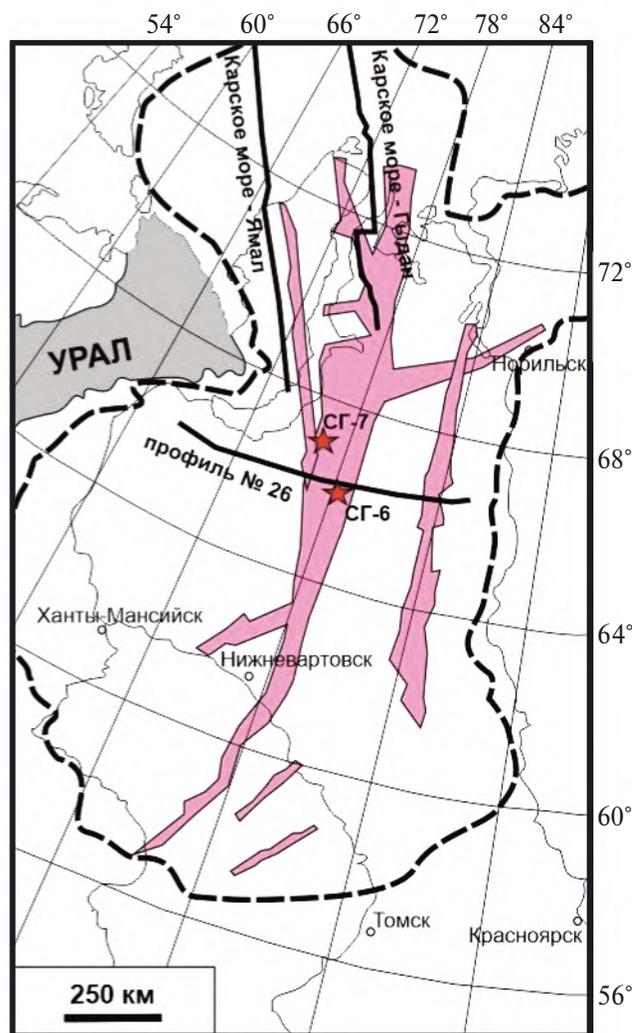
\*E-mail: arty-evgenij@yandex.ru

\*\*E-mail: p.chekhovich@gmail.com

причиной образования крупных осадочных бассейнов на коре фанерозойского (палеозойского и мезозойско-кайнозойского) возраста. Чтобы приблизиться к решению этого вопроса, в качестве примера мы выбрали крупнейший в мире Западно-Сибирский осадочный бассейн. Он подстилается корой преимущественно палеозойского возраста, сформированной в герцинскую и каледонские эпохи складчатости. Большинство исследователей образование Западно-Сибирского бассейна связывается с рифтогенезом ([5, 6, 12, 13, 14] и др.). Предполагается, что сильное растяжение земной коры вместе со всем литосферным слоем в этой области произошло во время крупных лавовых излияний на рубеже перми и триаса.

Во время растяжения континентальной коры происходит ее синрифтовое погружение. Растяжение литосферного слоя сопровождается подъемом в нем изотерм, что приводит к повышению теплового потока через поверхность. После окончания растяжения происходит постепенное охлаждение пород в литосферном слое и их уплотнение за счет термоупругого сжатия. В результате развивается пострифтовое погружение коры, скорость которого экспоненциально уменьшается во времени ([19] и др.). В Западной Сибири с начала среднего триаса к концу юрского периода скорость такого погружения должна была уменьшиться в несколько раз. Однако анализ данных сверхглубоких скважин, пробуренных на севере Западной Сибири (Тюменская СГ-6, 7.5 км и Ен-Яхинская СГ-7, 8.25 км), показал, что за это время скорость погружения коры не только не уменьшилась, но и возросла в несколько раз. Отсюда был сделан вывод о том, что растяжение литосферного слоя могло обеспечить лишь малую часть общего погружения коры в области скважин [4].

Точная величина вклада растяжения литосферы в общее погружение по данным сверхглубокого бурения оставалась неясной. Данные по двум близко расположенным скважинам СГ-6 и СГ-7 позволяют утверждать, что сильного растяжения коры не происходило только на северо-западе бассейна, в пределах так называемых Надым-Пурской и Пур-Тазовской областей. Этот результат не может быть распространен на остальные площади огромного бассейна. Для его наиболее глубокой северной части вместе с прилегающим шельфом Карского моря ранее был построен ряд протяженных и высокоточных сейсмогеологических разрезов через



**Рис. 1.** Расположение сверхглубоких скважин и сейсмогеологических профилей в структуре Западно-Сибирского бассейна. Цветной заливкой показана система рифтов в палеозойском складчатом основании ([11], с изменениями), пунктирной линией – границы осадочного бассейна.

мезозойско-кайнозойский осадочный чехол ([7–9] и др.).

Положение трех из них показано на рис. 1. В настоящей работе мы используем данные по этим разрезам для решения следующих вопросов. Во-первых, было ли растяжение литосферы главной причиной образования глубокого осадочного бассейна на севере Западной Сибири и на шельфе Карского моря? Во-вторых, какова была интенсивность растяжения в этих обширных областях, и какой вклад данное явление могло внести в общее погружение коры?

## РАЗРЕЗ ВДОЛЬ РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ № 26

Для сейсмического профиля № 26 протяженностью  $L = 720$  км в работе [7] построен детальный сейсмогеологический разрез отложений кайнозоя, мезозоя и верхов палеозоя. Его оригинальная версия содержит большой объем информации, важной для поиска и разработки месторождений нефти и газа. Разрез модифицирован нами для решения более простой задачи – оценить интенсивность растяжения коры и его вклад в образование Западно-Сибирского бассейна, а также оценить возможную связь погружения коры в бассейне с другими известными механизмами. С этой целью на рис. 2 а из оригинального разреза, представленного в [7, 9], сохранены наиболее яркие рефлекторы и крупные разломы. К ним добавлен ряд элементов, использование которых позволяет провести необходимые расчеты. Менее важные детали при этом опущены.

На разрезе (см. рис. 2 а) рефлектор А соответствует подошве мощного мезозойско-кайнозойского осадочного чехла Западно-Сибирского бассейна. В западной части разреза на отрезке 0–220 км осадки нижней юры на рефлекторе А с размывом перекрывают отложения палеозоя. Далее к востоку, в более глубокой части разреза на отрезке  $df$  и вплоть до восточного окончания профиля рефлектор А отделяет терригенные породы среднего и верхнего триаса  $T_{2-3}$  от вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород нижнего триаса и перми.

Судя по мощным излияниям траппов на рубеже перми и триаса, в эту эпоху в Западной Сибири могло проявиться интенсивное растяжение литосферного слоя. В таком случае, с начала среднего триаса в данной области должно было бы развиваться последующее (пострифтовое) погружение коры, постепенно замедлявшееся во времени. Допустим, как это часто делается, что именно это явление послужило причиной образования в Западной Сибири мощного мезозойско-кайнозойского чехла осадочных пород, накапливавшихся с начала среднего триаса.

Предположим, что земная кора со средней плотностью  $\rho_k$  и мощностью  $h_k^0$  располагается вначале вблизи уровня моря, а затем в момент времени  $t = 0$  она подвергается растяжению в  $\beta$  раз. Пусть образовавшаяся при этом впадина заполняется осадками с плотностью  $\rho_{oc}$ . Как следует из условия сохранения изостатического равновесия, конечная мощность

осадков, компенсирующих погружение коры, составляет

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

где  $\rho_m = 3330$  кг/м<sup>3</sup> – плотность мантии. Положим среднюю плотность коры равной  $\rho_k = 2840$  кг/м<sup>3</sup>, а ее мощность – равной средней мощности континентальной коры, расположенной вблизи уровня моря:  $h_k^0 = 40$  км. Среднюю плотность мезозойско-кайнозойских осадков в Западно-Сибирском осадочном бассейне положим равной  $\rho_{oc} = 2300$  кг/м<sup>3</sup>. Подставляя эти значения в (1), получаем:

$$h_{oc} = 19(1 - 1/\beta)_{км}. \quad (2)$$

По мощности осадков  $h_{oc}$ , заполнивших впадину, из соотношения (1) можно определить интенсивность растяжения  $\beta$ , с которым было связано образование впадины:

$$\beta = [1 - 0.052 \times (h_{oc})_{км}]^{-1}. \quad (3)$$

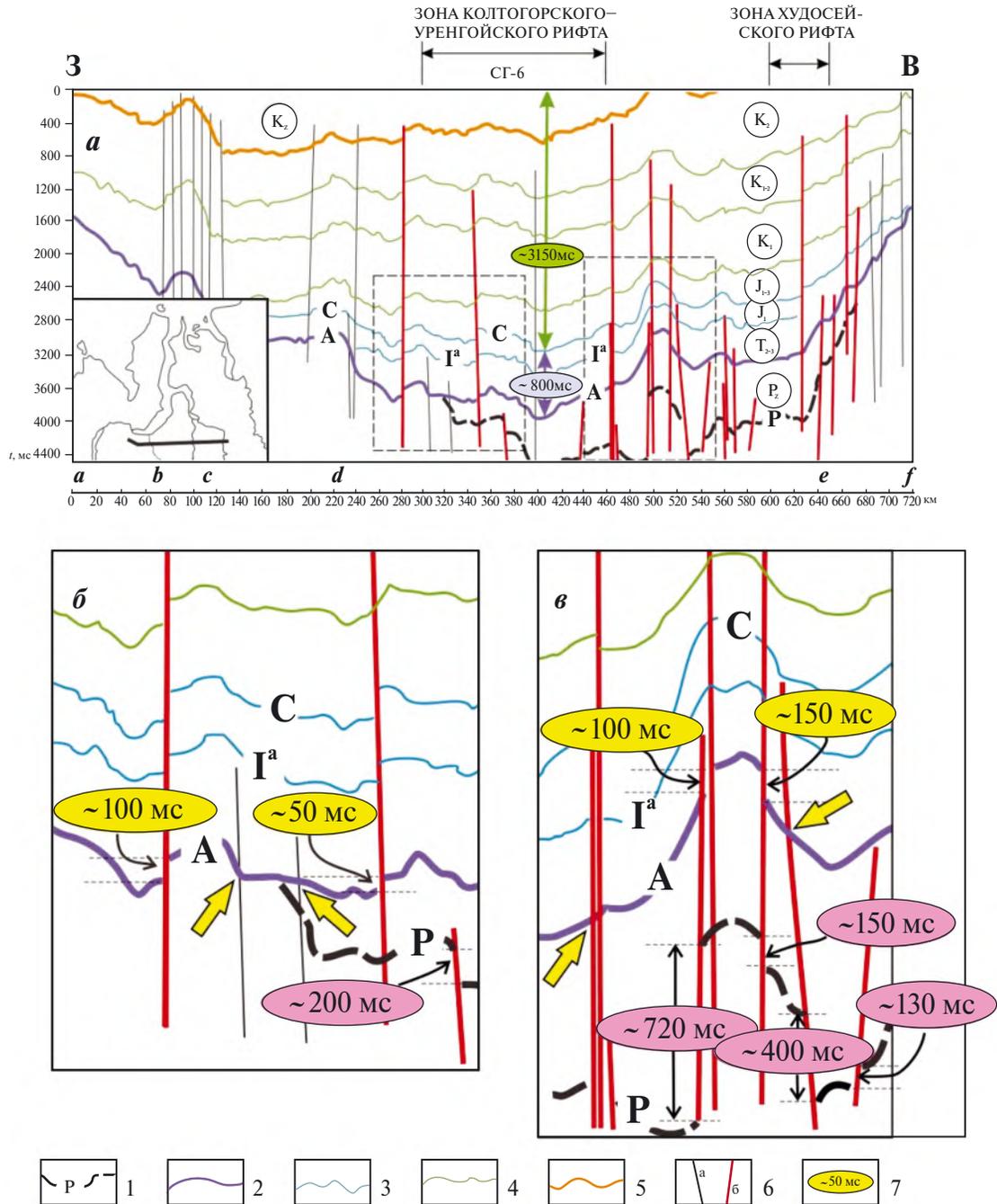
Рядом с профилем 26 (см. рис. 1) расположена Тюменская сверхглубокая скважина [4]. Подошва среднего триаса находится в ней на глубине  $h_{oc} = 6420$  м. Подставляя в соотношение (2) значение  $h_{oc} = 6.42$  км, получаем

$$\beta = 1.5. \quad (4)$$

Согласно этой оценке, для формирования в северной части Западной Сибири мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна за счет растяжения нужно было бы растянуть земную кору в его глубокой части достаточно сильно – в полтора раза.

Анализируя сейсмогеологический разрез по профилю № 26 (см. рис. 2 а), можно определить максимально возможную интенсивность растяжения коры, проявившегося с начала среднего триаса. Это требует, однако, достаточно подробного рассмотрения, которое приведено ниже. Поэтому определим сначала на основе данного разреза, было ли растяжение главной причиной образования глубокого осадочного бассейна в рассматриваемой области.

*Отсутствие сильного растяжения коры по данным о развитии ее погружения во времени.* В сверхглубоких скважинах СГ-6 и СГ-7 отбор керн производился только начиная с глубины 4 км. На основании этих данных в работе [4] мы рассмотрели изменение во времени скорости погружения коры в скважинах с начала триаса по среднюю юру. На протяженном разрезе (см. рис. 2 а) и на сейсмогеологических профилях, приведенных на рис. 4 и 5, представлены комплексы отложений всего



**Рис. 2.** Сейсмогеологический разрез по региональному профилю № 26 ([7, 9] – с изменениями). (а) – важнейшие геометрические параметры разреза; цветными стрелками показаны мощности осадков, компенсировавших предполагаемое пострифтовое погружение на этапе  $T_2$ - $J_1$  и реальное погружение, происходившее на этапе  $J_2$ - $K_2$ . По вертикальной оси показано время распространения упругих волн в прямом и обратном направлении в миллисекундах. (б и в) – фрагменты разреза, на которых показаны амплитуды смещения подошвы терригенных отложений триаса и границ в палеозойском комплексе. Желтыми стрелками отмечены места, где отражающие горизонты не нарушены разрывами. 1 – отражающая граница в палеозойском мегакомплексе (P), 2 – подошва терригенно-триаса (отражающий горизонт A), 3 – отражающие горизонты в юрском сейсмогеологическом мегакомплексе (подошва Ia и кровля C нижней юры), 4 – основание неокомского мегакомплекса (кровля баженновской свиты), подошва и кровля апт-альб-сеноманского мегакомплекса, 5 – подошва кайнозойского мегакомплекса, 6 – разрывные нарушения: а – без смещения отражающих границ, б – то же со смещениями, 7 – амплитуды вертикального смещения рефлекторов на разрывах (миллисекунды).

мезозойско-кайнозойского осадочного чехла вместе с отложениями верхов перми. По данным этих разрезов можно определить, отвечала ли динамика мезозойско-кайнозойского погружения на севере Западной Сибири модели, описывающей скорость пострифтового погружения коры после эпизода сильного растяжения на рубеже перми и триаса. Для этого достаточно сопоставить мощности осадков, накопившихся за первые 70–80 млн лет после растяжения, с мощностями отложений, сформировавшихся на последующем этапе.

Как отмечалось, характерной особенностью пострифтового погружения коры является уменьшение его скорости во времени. Обозначим через  $t$  время, прошедшее с начала пострифтового погружения, а через  $H$  – конечную мощность осадков, которые должны заполнить образующуюся впадину. Тогда, как показано в классической работе [19], в каждый данный момент времени  $t$  мощность осадков, компенсирующих погружение, должна составлять

$$h_{oc}(t) = H[1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (5)$$

Здесь  $\tau$  – характерное время релаксации – восстановления температурного распределения в растянутой литосфере. Согласно [19], в нашей предыдущей работе [4] для северной части Западной Сибири эта величина была принята равной  $\tau = 73$  млн лет. Рефлектор на кровле ранней юры обозначен на разрезе (см. рис. 2 а) символом С. Продолжительность интервала времени, прошедшего с начала среднего триаса  $T_2$  до конца ранней юры  $J_1$ , составляет 72.5 млн лет. Подставляя в (5) это значение  $t$  вместе с  $\tau = 73$  млн лет, находим, что в бассейне, образованном растяжением литосферы, суммарная мощность  $h_1$  осадков  $T_{2-3}$  и  $J_1$ , залегающих под рефлектором С, должна составлять долю

$$h_1/H = 0.63 \quad (6)$$

от общего пострифтового погружения. В результате развития новейших поднятий коры осадконакопление в Западной Сибири прекратилось в середине раннего олигоцена, примерно через 218 млн лет после начала среднего триаса. Как следует из соотношения (5), за это время должно было произойти 95% пострифтового погружения. В таком случае за время  $\sim 145$  млн лет (от конца ранней юры до начала поднятия коры в раннем олигоцене) должна была осуществиться доля пострифтового погружения коры, равная

$$h_2/H = 0.32. \quad (7)$$

Как следует из сравнения соотношений (6) и (7), при образовании бассейна за счет

растяжения мощность  $h_2$  осадков интервала времени  $J_2-K_z$  (см. рис. 2) должна быть в 2 раза меньше мощности  $h_1$  осадков интервала времени  $T_2-J_1$ , подстилающих рефлектор С. Продолжительность интервала  $J_2-K_z$  (145 млн лет) в 2 раза больше продолжительности интервала  $T_2-J_1$  (73 млн лет). Поэтому в случае пострифтового погружения средняя скорость накопления осадков, перекрывающих рефлектор С, должна быть в 4 раза меньше средней скорости накопления осадков  $T_2-J_1$ , подстилающих этот рефлектор. На разрезе (см. рис. 2 а) в глубокой части прогиба *de* наблюдается прямо противоположная ситуация. Суммарная мощность отложений  $J_2-K_z$ , залегающих над рефлектором С (3150 мс), примерно в 4 раза больше мощности подстилающих отложений интервала  $T_2-J_1$  (800 мс). Учитывая также, что интервал  $J_2-K_z$  в два раза продолжительнее интервала  $T_2-J_1$ , средняя скорость накопления осадков на интервале  $J_2-K_z$  была в 2 раза выше, чем на предшествовавшем интервале  $T_2-J_1$ .

Таким образом, в мезозое и кайнозое погружение коры в Западно-Сибирском бассейне не замедлялось, как должно быть при пострифтовом погружении, а, напротив – оно ускорялось. В результате на интервале  $J_2-K_z$  средняя скорость погружения коры оказалась в 8 раз выше, чем было бы при ее пострифтовом погружении. В таких условиях растяжение литосферы могло обеспечить на более 10% общего погружения коры, осуществившегося за мезозойско-кайнозойское время.

В настоящее время растяжение рассматривается, однако, как главная причина образования крупных осадочных бассейнов, по многим из которых имеются детальные данные сейсмического профилирования. По этим данным оценки растяжения коры в бассейнах обычно не производятся. Поэтому представляет интерес оценить на примере Западно-Сибирского бассейна, какое растяжение произошло в этой области в действительности в мезозое и кайнозое.

*Суммарная ширина разрывов фундамента в бассейне, образованном растяжением.* Интенсивность растяжения коры  $\beta$  равна отношению современной ширины бассейна  $L$  к его начальной ширине  $L - \Delta L$ :

$$\beta = L/(L - \Delta L). \quad (8)$$

Здесь  $\Delta L$  – сумма горизонтальных смещений на разрывах в фундаменте бассейна. Как следует из (8), отношение этой величины к ширине бассейна  $L$  связано с  $\beta$  следующим образом:

$$\Delta L/L = (\beta - 1)/\beta. \quad (9)$$

Учитывая, что  $\beta$  определяется соотношением (3), получаем:

$$\varepsilon = \Delta L/L = 0.053h_{oc}. \quad (10)$$

Отсюда следует, что для образования за счет растяжения даже относительно неглубоких бассейнов земная кора должна быть растянута весьма значительно. Так, при  $h_{oc} = 2$  км  $\Delta L/L = 11\%$ , а при  $h_{oc} = 4$  км  $\Delta L/L = 21\%$ .

На рис. 2 а ширина глубокой восточной части бассейна  $de$  составляет  $L = 420$  км, а средняя глубина  $h_{oc} = 6$  км. Как следует из соотношения (10), при образовании такого бассейна за счет растяжения величина  $\Delta L/L$  должна составлять  $\varepsilon = 32\%$ . Тогда при  $L = 420$  км разрывы рефлектора А в сумме должны покрывать область шириной  $\Delta L = 134$  км, т.е. около одной трети длины отрезка  $de$ . Даже при растяжении на 10% разрывы рефлектора А на отрезке  $de$  в сумме покрывали бы примерно  $\Delta L = 40$  км. Пропустить существование на этом отрезке таких разрывов невозможно. Достаточно одного взгляда на разрез рис. 2 а, чтобы убедиться, что ничего подобного на нем не наблюдается.

*Растяжение коры на рефлекторе А, связанное с образованием сбросов.* На рис. 2 а в подошве среднего триаса, на рефлекторе А, выделяется ряд сбросов. С образованием таких структур обычно связывается растяжение коры вместе со всем литосферным слоем. Величина растяжения на сбросах при этом, однако, не определяется. Оценим эту величину, рассмотрев фрагменты разреза, выделенные пунктирными прямоугольниками и представленные на рис. 2 б, в в увеличенном размере.

Суммарное растяжение коры  $\Delta L$  равно сумме смещений по горизонтальной оси на каждом из разрывов рефлектора А, т.е. суммарной ширине погребенных сбросов. Разрезы рис. 2 б, в сжаты по горизонтали в десятки раз. В таком масштабе все сбросы должны выглядеть как вертикальные линии, и подсчитать растяжение на них рефлектора А не удастся. Для оценки растяжения рефлектора на сбросах можно, однако, воспользоваться тем, что на крыльях многих сбросов рефлектор А смещен по вертикали.

Растяжение (разрыв) рефлектора  $\delta l$  на отдельном сбросе равно его проекции на горизонтальную плоскость (рис. 3). При амплитуде сброса  $\delta h$  и угле его падения  $\alpha$  растяжение на сбросе составляет

$$\delta l = \delta h \times \text{ctg}\alpha. \quad (11)$$

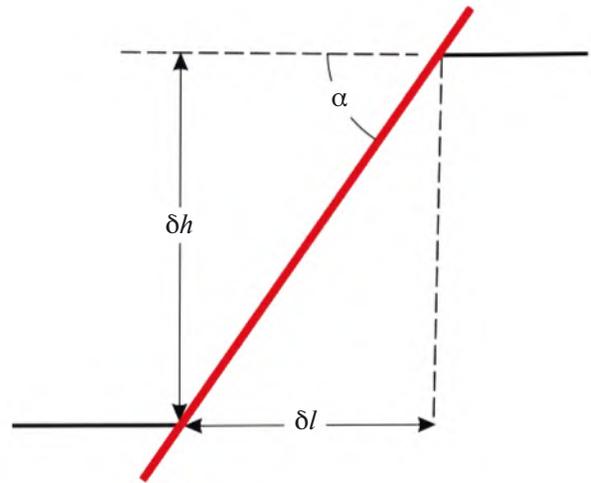


Рис. 3. Растяжение рефлектора в осадочном чехле или на поверхности фундамента, обусловленное образованием сброса.

На разрезах рис. 2 б, в вдоль вертикальной оси отложена не глубина рефлектора, а время  $t$  распространения упругих волн со скоростью  $v$  в прямом и обратном направлении в миллисекундах. Это позволяет определить высоту сброса на разрезах как

$$\delta h = (v\delta t)/2, \quad (12)$$

где  $\delta t$  – разность глубин  $t$  рефлектора на крыльях сброса, а  $v$  – скорость упругих волн в слоях, нарушенных сбросом. Тогда из соотношения (12) следует, что растяжение на сбросе равно

$$\delta l = \delta h \times \text{ctg}\alpha = (v\delta t/2) \times \text{ctg}\alpha, \quad (13)$$

где  $\alpha$  – угол падения сброса. Судя по данным скважины СГ-6, в нижнем триасе и в верхнем палеозое скорость упругих волн не превышает  $v = 4500$  м/с. На рис. 2 б смещения  $\delta t$  рефлектора А по вертикали составляют  $\delta t_1 = 100$  мс и  $\delta t_2 = 50$  мс. Подставляя эти значения  $\delta t$  и  $v = 4500$  м/с в (12), получаем  $\delta h_1 = 225$  м и  $\delta h_2 = 113$  м. Согласно соотношению (13), растяжение на сбросе высотой  $\delta h$  составляет  $\delta l = \delta h \times \text{ctg}\alpha$ . При часто встречающихся углах падения сбросов  $\alpha = 45^\circ$  ( $\text{ctg}45^\circ = 1$ ) суммарное растяжение на двух указанных сбросах составляет  $\Delta L_1 = (\delta h_1 + \delta h_2) \cdot \text{ctg}45^\circ = 340$  м.

В местах, показанных желтыми стрелками (см. рис. 2 в), рефлектор А сохраняет свое направление на крыльях разломов. Это указывает на то, что заметные смещения рефлектора на таких разломах отсутствуют и они не вносят существенного вклада в общее растяжение фундамента.

На разрезе рис. 2 в разрывы рефлектора А на сбросах наблюдаются в центральной части рисунка. Они составляют  $\delta t_1 = 100$  мс на паре близко расположенных сбросов и  $\delta t_2 = 150$  мс на отдельном сбросе, расположенном правее. Для принятых в соотношениях (12), (13) значений  $\nu$  и  $\alpha$ , на рефлекторе е суммарное растяжение на разрезе  $\Delta L_2 = 560$  м. На других разломах, пересекающих рефлектор А, заметные сбросы отсутствуют. Таким образом, суммарное растяжение на рефлекторе А на рис. 2 б, в составляет  $\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = 900$  м.

Многочисленные разломы пересекают рефлектор А также и за пределами участков, показанных на рис. 2 б, в. Они присутствуют в западной части профиля на антиклинали на отрезке 75–110 км, на восточном склоне прогиба (отрезок 625–715 км), а также на отметках 235 и 562 км. На всех этих разломах смещения рефлектора А по вертикали не наблюдаются. Это указывает на отсутствие на них заметного растяжения.

Таким образом, на подошве мезозойско-кайнозойского осадочного чехла А существенное растяжение на сбросах  $\Delta L = 900$  м наблюдается только в глубокой части прогиба на отрезке 225–645 км шириной  $L = 420$  км. Для этих значений  $L$  и  $\Delta L$  относительное растяжение коры на подошве среднего триаса составляет  $\varepsilon = \Delta L/L = 0.214\%$ , что соответствует интенсивности растяжения  $\beta = 1 + \varepsilon = 1.00214$ . Как следует из соотношения (3), такое растяжение может обеспечить образование слоя осадков мощностью  $\Delta h_{oc} = 41$  м. Данная величина составляет лишь  $\sim 0.7\%$  от средней мощности осадков  $h_{oc} \sim 6000$  м, залегающих над подошвой среднего триаса в глубокой части прогиба. Это означает, что с указанного времени растяжение коры в образовании Западно-Сибирского осадочного бассейна существенной роли не играло.

В приведенных оценках растяжения коры на сбросах  $\delta l = \delta h \times \text{ctg} \alpha$  мы использовали типичное значение угла падения сбросов  $\alpha = 45^\circ$ . При более низких значениях  $\alpha = 30^\circ$  и  $20^\circ$  растяжение увеличивается соответственно в 1.7 и в 2.7 раза. Мощность осадков, накопившихся на отрезке  $ab$  в результате растяжения коры, увеличится при этом до  $\Delta h_{oc} = 75\text{--}119$  м. Сбросы с углами  $\alpha = 20\text{--}30^\circ$  в осадочных бассейнах встречаются очень редко. Но даже при таких углах падения сбросов растяжение коры с начала среднего триаса могло обеспечить не более двух процентов от образовавшейся за это время мощности осадков, достигающей  $\sim 6$  км.

*Растяжение коры до начала среднего триаса.* Разрез по профилю № 26 (см. рис. 1 и 2 а) пересекает два пермо-триасовых грабена-рифта – Колтогорско-Уренгойский и Худосейский. Предполагается, что формирование структур растяжения такого типа сильно повлияло на последующее образование Западно-Сибирского осадочного бассейна ([6, 11, 13, 15] и др.). Над предполагаемыми рифтами не наблюдается, однако, значительного повышения мощности осадков, перекрывающих рефлектор А (см. рис. 2 а). На данном рефлекторе отсутствуют и крупные сбросы, которые с большой вероятностью должны окаймлять рифтовые впадины глубиной  $\sim 2$  км. На этом разрезе структуры рифтового типа не удается выделить и в палеозойской части разреза. Как показывают приведенные данные, пермское растяжение коры в Западной Сибири существенно не влияло на формирование огромного мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна в этой области.

Разрешающая способность сейсмического профилирования в отложениях палеозоя относительно невелика. Тем не менее, на основе разрезов, показанных на рис. 2, можно провести предварительную оценку интенсивности растяжения коры на севере Западной Сибири в позднем палеозое. На отрезке 320–670 км длиной  $L = 350$  км в палеозойской части разреза выделяется яркий рефлектор Р (см. рис. 2 а). На временной оси амплитуды затрагивающих этот рефлектор разрывов показаны символами с сиреневой заливкой (см. рис. 2 б и 2 в). Их сумма составляет  $\Sigma \delta t_i = 1470$  мс = 1.47 с. Сумма высоты соответствующих сбросов равна  $h = (\Sigma \delta t_i) \nu / 2$ , где  $\nu$  – скорость упругих волн в породах палеозоя. При  $\nu = 4.5$  км/с,  $\Delta h = 3.3$  км. Растяжение рефлектора Р, связанное с его разрывами, равно  $\Delta L = \Delta h \text{ctg} \alpha$ , где  $\alpha$  – угол падения сбросов. При типичном значении  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\Delta L = 3.3$  км, что дает относительное растяжение коры  $\Delta L/L \approx 1\%$ . Примерно такое же растяжение наблюдается на расположенном выше рефлекторе А в подошве среднего триаса. В сумме растяжение коры на этих двух рефлекторах могло обеспечить не более 2% от общего погружения коры в бассейне.

#### ПРОФИЛЬ КАРСКОЕ МОРЕ– ПОЛУОСТРОВ ЯМАЛ

На рис. 4 приведен сейсмогеологический разрез по композитному профилю Reg II–II протяженностью 900 км, проходящему через Карское

море и полуостров Ямал. По сравнению с оригиналами в работах [8, 9] разрез видоизменен – на нем не показана волновая картина и сделаны добавления, позволяющие провести количественные оценки структурных особенностей чехла. Главные отражающие горизонты на рис. 4 показаны в соответствии с разрезами, приведенными в работах [8] (рис. 2 а) и [9] (рис. 3).

**Южно-Карская впадина.** В северной части разреза на отрезке ab расположена глубокая Южно-Карская впадина. Отложения мезозоя и кайнозоя ограничены в ней снизу рефлектором  $A_1$ , отождествляемым с подошвой терригенного триаса. Сведения о возможном растяжении коры в рассматриваемой области или об излияниях траптов в указанных работах не приводятся. Однако поскольку растяжение коры часто рассматривается как главная причина ее крупных погружений, то из чисто методических соображений допустим, что 250 млн лет назад на рубеже перми и триаса в Южно-Карской впадине произошло сильное растяжение коры, обусловившее ее последующее погружение.

Обозначим через  $C_1$  рефлектор вблизи кровли сейсмокомплекса  $J_{1-2}$  (см. рис. 4). Его возраст составляет приблизительно 165 млн лет [7].

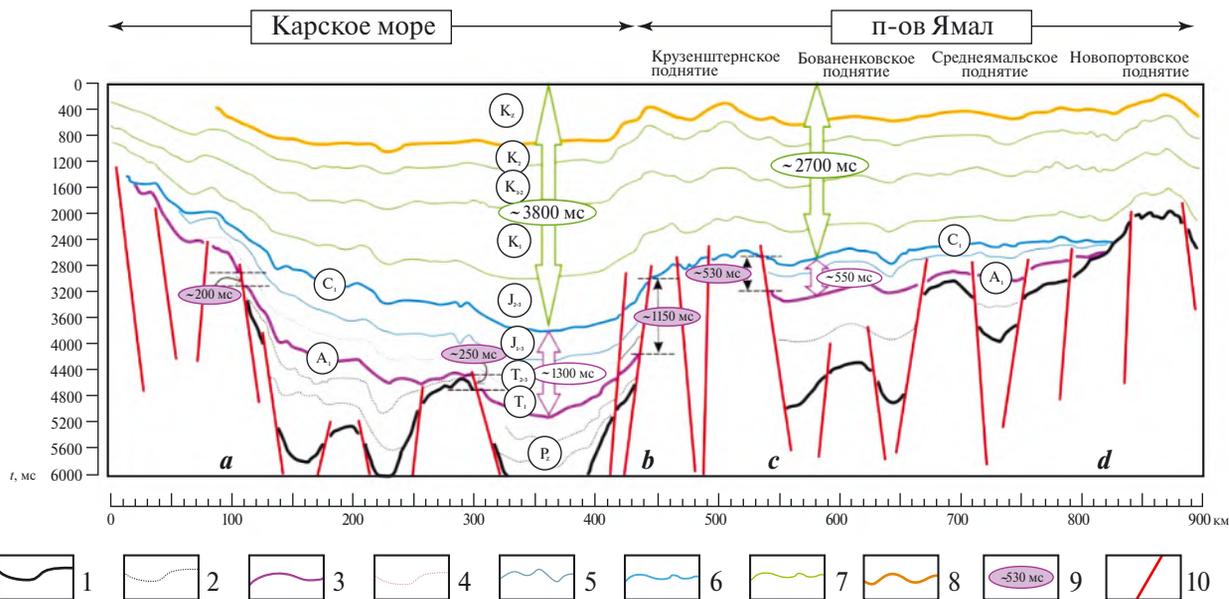
Слои осадков, расположенных между рефлекторами  $C_1$  и  $A_1$  на подошве триаса, формировались в течение интервала времени  $\Delta t_1 = 85$  млн лет. Обозначим их мощность через  $h_1$ , а конечную мощность пострифтовых осадков через  $H$ . Как следует из соотношения (5), при  $\tau = 73$  млн лет за время  $\Delta t_1 = 85$  млн лет должно было осуществиться погружение коры на

$$h_1 = 0.69H. \tag{14}$$

В настоящее время погружение коры в Южно-Карской впадине еще продолжается. Согласно соотношению (5), за 250 млн лет, прошедшие с начала триаса, во впадине должно было осуществиться пострифтовое погружение на  $0.97H$ . Из них за период времени  $\Delta t_2 = 165$  млн лет, прошедший с образования рефлектора  $C_1$ , должно было произойти погружение коры на

$$h_2 = 28H. \tag{15}$$

При пострифтовом погружении эта мощность должна быть в  $h_1/h_2 \approx 2.5$  раз меньше мощности  $h_1$  осадков интервала  $A_1-C_1$ , залегающих под рефлектором  $C_1$ . В действительности наблюдается противоположное соотношение мощностей (см. рис. 4). На отметке профиля 360 км



**Рис. 4.** Сейсмогеологический разрез по профилю Карское море–Ямал ([8, 9] с изменениями). Цветными стрелками показаны соотношения мощностей, накопившихся на различных этапах погружения –  $\Delta t_1$  (пострифтовое погружение, триас – средняя юра) и  $\Delta t_2$  (поздняя юра – ранний олигоцен). (1–8) отражающие горизонты: 1 – в кровле фундамента, 2 – в палеозойском комплексе, 3 – в подошве терригенного триаса ( $A_1$ ), 4 – в подошве среднего триаса, 5 – в подошве юры, 6 – вблизи кровли средней юры ( $C_1$ ), 7 – в подошве неокомского, апт-альб-сеноманского и турон-маастрихтского комплексов, 8 – в подошве кайнозойского комплекса, 9 – амплитуды наиболее крупных смещений в подошве мезозойско-кайнозойского осадочного чехла, 10 – разрывы.

мощность осадков, лежащих выше рефлектора  $C_1$  (3800 мс), в 2.8 раза больше мощности осадков интервала  $A_1-C_1$  (1350 мс), подстилающих этот рефлектор. Это указывает на то, что растяжение литосферы не было главной причиной погружения коры в Южно-Карской впадине.

Ширина глубокой впадины  $ab$  в фундаменте бассейна под Карским морем составляет  $L = 340$  км (см. рис. 4). В рефлекторе  $A_1$  здесь можно выделить сброс на  $\delta t_1 = 200$  мс на северном борту впадины, сброс на  $\delta t_2 = 1150$  мс на ее южном борту и сброс на  $\delta t_3 = 250$  мс в центральной части. В сумме они дают смещение рефлектора  $A_1$  по вертикали на  $\Sigma \delta t_i = \delta t_1 + \delta t_2 + \delta t_3 = 1600$  мс = 1.6 с. Как следует из соотношения (8), при скорости упругих волн в верхах палеозоя  $v = 4.5$  км/с, сумма амплитуд сбросов равна  $\delta h = (\Sigma \delta t_i)v/2 = 3.6$  км. Растяжение рефлектора  $A_1$  во впадине  $\Delta L = \delta h \cdot \text{ctg} \alpha$ . При среднем значении углов падения сбросов  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\text{ctg} \alpha = 1$  общее растяжение коры на рефлекторе  $A_1$  составляет  $\Delta L = 3.6$  км. При  $L = 340$  км относительное растяжение коры во впадине  $\varepsilon = \Delta L/L = 1.06\%$ . Это много меньше  $\varepsilon \approx 50\%$ , необходимого для образования Южно-Карской впадины за счет растяжения коры. Согласно соотношению (2), растяжение коры с интенсивностью  $\beta = 1.0106$  приводит к образованию осадочного бассейна глубиной  $\Delta h_{oc} = 200$  м. Это составляет всего лишь 3.1% от средней мощности осадков  $h_{oc} = 6400$  м, накопившихся во впадине.

Ямальская впадина расположена на отрезке  $cd$  в южной части профиля (см. рис. 4). От Южно-Карской впадины она отделена Крузенштернским поднятием. Нижняя граница мезозойско-кайнозойского чехла в Ямальской впадине (рефлектор  $A_1$ ) расположена на уровне временной шкалы  $t = 3250$  мс. При средней скорости упругих волн над рефлектором  $v = 3200$  м/с это соответствует мощности чехла  $h_{oc} = 5200$  м. Возраст рефлектора  $A_1$  на отрезке  $cd$  в работе [9] не указан. Поэтому он может быть отличным от возраста рефлектора  $A_1$  в Южно-Карской впадине на отрезке  $ab$ . В работе [8] на рис. 8 на профиле ЮЗ–СВ-простираения на Крузенштернском месторождении на палеозойском фундаменте с разрывом залегают осадки средней юры, а на прилегающем Бованенковском месторождении палеозой перекрыт триасом.

Несмотря на указанную неопределенность возраста рефлектора  $A_1$  в Ямальской впадине, он практически не влияет на оценку роли растяжения коры в образовании впадины. На отрезке  $cd$  рефлектор  $A_1$  пересекается рядом сбросов,

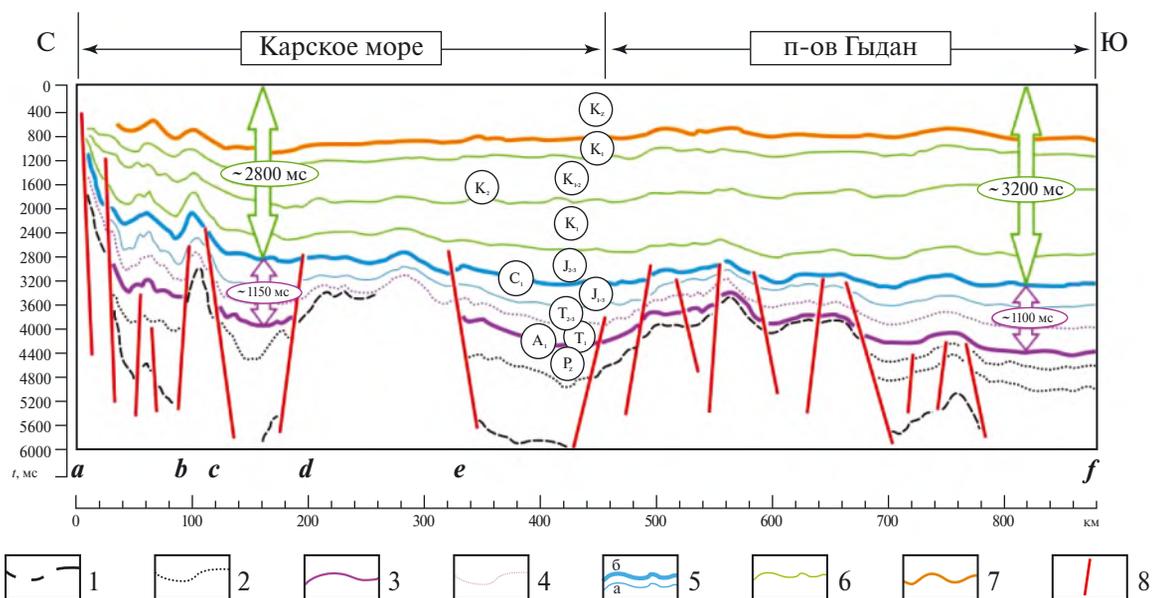
но почти на всех из них заметных смещений рефлектора по вертикали не наблюдается. Его заметный разрыв  $\delta t = 550$  мс выделяется лишь на разломе  $c$ . При скорости упругих волн в подстилающих палеозойских породах  $v = 4500$  м/с, на сбросе с углом падения  $45^\circ$  этот разрыв обеспечивает растяжение  $\Delta L = v\delta t/2 = 1.24$  км. При ширине отрезка  $cd$   $L = 270$  км относительное растяжение  $\Delta L/L$  составляет  $\varepsilon = 0.46\%$ . Как следует из соотношения (2), погружение коры, обусловленное ее растяжением в  $\beta = 1.0046$  раз, составляет  $\Delta h_{oc} = 87$  м, или около 2% от мощности мезозойско-кайнозойских осадков в Ямальском бассейне.

Таким образом, растяжение коры и литосферного слоя не играло существенной роли в формировании Южно-Карской и Ямальской впадин в мезозойско-кайнозойское время.

#### ПРОФИЛЬ КАРСКОЕ МОРЕ– ПОЛУОСТРОВ ГЫДАН

На рис. 5 представлен сейсмогеологический разрез длиной 880 км через п-ов Гыдан и прилегающий к нему шельф Карского моря. Разрез построен на основе разреза рис. 2 б в работе [8]. На рис. 5 сохранены только ярко выраженные рефлекторы и выделен рефлектор  $A_1$  на подошве триаса. На основной части разреза рефлектор  $A_1$  перекрыт  $h_{oc} \sim 6.0$ – $6.5$  км осадков. Чтобы обеспечить такое погружение за счет растяжения коры, нужно было бы растянуть ее примерно в полтора раза. Допустим, что бассейн образовался в результате растяжения литосферы на границе перми и триаса. Как и на рис. 4, индексом  $C_1$  на рис. 5 отмечен рефлектор с возрастом 165 млн лет. Согласно соотношениям (6) и (7), мощность пострифтовых осадков  $T_1-J_{1-2}$ , подстилающих рефлектор  $C_1$  и образовавшихся за 85 млн лет, должна быть в 2.5 раза больше мощности вышележащих осадков  $J_{2-3}-K_2$ . На рис. 5 наблюдается обратное соотношение. На отметках 130 и 820 км мощность осадков  $T_1-J_{1-2}$ , подстилающих рефлектор  $C_1$ , соответственно в 2.4 и 2.9 раза меньше мощности вышележащих толщ. Отсюда следует, что растяжение коры не было главной причиной погружения в области, пересекаемой разрезом.

Рефлектор  $A_1$  на подошве триаса (см. рис. 5) нарушен рядом сбросов. В южной части профиля, к югу от точки  $f$ , значительные различия в глубине залегания рефлектора  $A_1$  на крыльях сбросов отсутствуют. Отсюда следует, что на отрезке  $ef$  протяженностью  $L = 540$  км в мезозое



**Рис. 5.** Сейсмогеологический разрез по профилю Карское море–Гыдан ([8] с изменениями). Цветными стрелками показаны соотношения мощностей (миллисекунды), накопившихся на различных этапах погружения; отражающие горизонты (1–7): 1 – в кровле фундамента, 2 – в палеозойском комплексе, 3 – в подошве терригенного триаса (A<sub>1</sub>), 4 – в подошве среднего триаса, 5 – в подошве юры (а) и вблизи кровли средней юры C<sub>1</sub> (б), 6 – в подошве неокомского, апт-альб-сеноманского и турон-маастрихтского комплексов, 7 – в подошве кайнозойского комплекса, 8 – разрывы.

и кайнозойское погружение коры происходило без заметного растяжения. В северной части, на отрезке *ae* протяженностью  $L = 330$  км, можно выделить ряд сбросов. На каждом из них рефлектор A<sub>1</sub> идентифицирован только на одном из крыльев сброса, что не позволяет оценить точно его амплитуду. Анализируя более детальный оригинальный разрез рис. 2 б в работе [8], суммарную величину сбросов по вертикальной оси на отрезке *ae* можно оценить как  $\sum \delta t_i \sim 1000$  мс = 1 с. Соответствующее растяжение коры  $\Delta L = (\sum \delta t_i) v/2$  км эквивалентно относительному растяжению  $\epsilon = \Delta L/L \sim 0.6\%$ . Оно может обеспечить погружение коры на  $\sim 100$  м, что составляет 1.7% от глубины рефлектора A<sub>1</sub> на отрезке *ae*.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Следуя ([16, 20] и др.), большинство исследователей образование крупных и глубоких осадочных бассейнов на континентах объясняют растяжением литосферного слоя и земной коры в его составе. Как доказательство такого утверждения на качественном уровне обычно используется существование сбросов в фундаменте бассейнов. Оценка интенсивности растяжения, связанного с образованием сбросов, при этом, как правило, не выполняется. В результате остается

неясным, было ли растяжение достаточно сильным для образования глубокого бассейна. Более того, не проверяется, развивалось ли погружение коры с сильным замедлением во времени, как это должно быть характерно для пострифтового погружения растянутой литосферы.

*Ускорение погружения коры во времени как указание на отсутствие ее сильного растяжения.* С пострифтовым погружением земной коры обычно связывается и образование крупнейшего в мире Западно-Сибирского осадочного бассейна. Предполагается, что погружение в нем коры на 5–6 км и более в мезозое и кайнозое осуществилось вследствие сильного растяжения литосферного слоя, которое произошло на рубеже перми и триаса ([6, 13] и др.). Характерной особенностью пострифтового погружения является экспоненциальное уменьшение его скорости со временем. Анализ данных по двум сверхглубоким скважинам на севере Западной Сибири показал, однако, что в триасе и юре за время  $\sim 80$  млн лет после предполагаемого растяжения коры ее погружение не только не замедлилось, но оно в несколько раз ускорилось [4]. В таких условиях с растяжением могла быть связана лишь малая часть общего погружения коры.

Данный результат относится только к прилегающей к скважинам области с поперечником несколько сотен километров. Кроме того, в Тюменской и Ен-Яхинской сверхглубоких скважинах отбор керн производился лишь начиная с глубины 4 км. Это позволило описать развитие погружения коры только на его ранней стадии. Чтобы выяснить, происходило ли замедление погружения коры во всей обширной северной части бассейна в течение всего мезозоя и кайнозоя, мы использовали построенные ранее для этой области три сейсмогеологических разреза, пересекающие бассейн в широтном и в меридиональном направлении ([7–9]). На этих разрезах протяженностью 700–900 км хорошо прослеживается история развития северной части бассейна в течение всего мезозоя и кайнозоя. Чтобы решить поставленную задачу, мы упростили и видоизменили эти разрезы, сохранив на них только главные рефлекторы и разломы, а также сделав ряд добавлений, необходимых для проведения количественных оценок (см. рис. 2, 4 и 5).

Если бы погружение коры было обусловлено растяжением литосферы и происходило с сильным замедлением, то за первые 80 млн лет осуществились бы уже две трети общего погружения коры, а за последующие 140–160 млн лет накопилась бы лишь одна треть общей мощности осадков. В действительности наблюдается противоположная ситуация. На всех разрезах мощность осадков, накопившихся на втором этапе, в несколько раз больше, чем на первом. Отсюда следует, что на севере Западной Сибири и на шельфе Карского моря погружение коры в среднем происходило не с замедлением, а с ускорением во времени. В таких условиях растяжение литосферы могло обеспечить не более 10% наблюдаемого погружения коры. Основная часть погружения коры в мезозое и кайнозое,  $\geq 90\%$ , должна быть обусловлена не растяжением, а каким-то другим механизмом. Большинство исследователей рассматривает, однако, растяжение литосферы и земной коры как главный механизм ее крупных погружений. Поэтому было необходимо оценить, какова была в действительности интенсивность растяжения коры на подошве мезозойско-кайнозойского осадочного чехла в Западно-Сибирском бассейне, а также какой вклад это растяжение могло внести в его образование.

*Слабое растяжение коры на подошве мезозойско-кайнозойского осадочного чехла.* Как показано выше, после образования крупного осадочного бассейна глубиной 6 км за счет

растяжения коры разрывы, образовавшиеся в его фундаменте, в сумме должны покрыть около одной трети площади бассейна. Ничего подобного в Западно-Сибирском бассейне не наблюдается. Подошва среднего триаса А (см. рис. 2) и подошва триаса  $A_1$  (см. рис. 4 и 5) нарушены сериями сбросов. На данном основании обычно и предполагается, что погружение коры было обусловлено растяжением. Но на участках между сбросами, которые занимают преобладающую часть разрезов, рефлекторы А и  $A_1$  непрерывны. Горизонтальные смещения на них могут существовать только на сбросах. На протяженных временных сейсмических разрезах, сжатых обычно в десятки раз, разрывы фундамента по горизонтали на сбросах различить невозможно. В то же время смещения рефлекторов на крыльях сбросов по вертикали в сейсмической записи фиксируются отчетливо. При типичных углах падения сбросов  $\alpha \approx 45^\circ$  смещения рефлектора по горизонтали и по вертикали примерно одинаковы. Это позволяет оценить величину растяжения  $\Delta L$  рефлектора на разрезах как сумму амплитуд его вертикальных смещений на сбросах.

Подсчитанное таким образом растяжение на разрезах рис. 2, 4 и 5 оказывается очень слабым. Наибольшее относительное растяжение на подошве мезозойско-кайнозойского осадочного чехла наблюдается в Южно-Карской впадине (см. рис. 4). Там оно составляет  $\varepsilon \approx 1\%$ , что обеспечило накопление последовательности осадков мощностью  $h_{oc} \approx 200$  м. Это составляет, однако, лишь около 3% мощности чехла во впадине. На п-ве Ямал относительное растяжение величиной  $\varepsilon \approx 0.5\%$  обеспечило накопление около 2% от общей мощности осадков. Примерно такое же растяжение имело место в северной части разреза через п-ов Гыдан (см. рис. 5). На его остальной части растяжение в несколько раз меньше. В наиболее глубокой части на широтном разрезе по профилю № 26 (см. рис. 2 а, отрезок *de*) относительное растяжение составляет  $\varepsilon \sim 0.2\%$ . Оно обеспечило накопление около 40 м осадков, или  $\sim 0.7\%$  от общей мощности чехла  $h_{oc} \sim 6000$  м. Эти оценки показывают, что в северной части Западно-Сибирского бассейна и на шельфе Карского моря растяжение коры существенной роли в ее погружении не играло.

*Возможные механизмы погружения коры без ее растяжения.* Для объяснения крупных погружений коры без ее существенного растяжения предлагался ряд механизмов. Один из них – упругий изгиб литосферного слоя под нагрузкой крупного тектонического покрова или под действием тяги

со стороны плиты, субдуцированной в мантию ([15] и др.). Такие погружения происходят в глубоководных желобах на активных окраинах континентов. Предполагается, что на континентах они проявляются в передовых прогибах вблизи коллизионных границ между плитами. В обоих типах структур глубина прогиба увеличивается по направлению к коллизионной границе. На западной и восточной границах Западной Сибири в мезозое и кайнозое столкновения плит не происходило. Глубина бассейна по направлению к этим границам не увеличивается, а уменьшается. В таких условиях погружение коры в результате изгиба литосферного слоя исключено.

Популярным механизмом поднятий и погружений коры является воздействие на подошву литосферы течений в нижележащей мантии, создающих на ее поверхности динамическую топографию [18, 20]. Крупные погружения земной коры связывают при этом с воздействием на подошву литосферы нисходящих потоков мантийного вещества. В Западной Сибири погружение коры в мезозое и кайнозое развивалось вплоть до олигоцена. Для поддержания погружения коры в течение столь долгого времени было бы необходимо, чтобы все это время в мантии под указанной областью существовали нисходящие потоки. Более того, в течение 220 млн лет такие течения должны были происходить только под Западной Сибирью, не затрагивая прилегающие к ней области. Подобная ситуация представляется совершенно невероятной, особенно учитывая, что в мезозое литосфера Западной Сибири испытывала дрейф в составе Сибирского палеоконтинента [10].

В таких условиях единственной реальной причиной, которая могла бы обеспечить формирование Западно-Сибирского осадочного бассейна в мезозойско-кайнозойское время, остается уплотнение пород в литосферном слое. В осадочных бассейнах размером ~1000 км, расположенных во внутриплитных областях, земная кора близка к изостатически равновесному положению ([17] и др.). Так, на Восточно-Европейской платформе, на севере Западной Сибири и в Карском море как аномалии силы тяжести в свободном воздухе, так и изостатические аномалии, усредненные по сетке  $1^\circ \times 1^\circ$ , составляют  $\leq 10$  мГал (там же). В мезозое и кайнозое Западная Сибирь располагалась во внутриплитной области, и все это время ее кора должна была оставаться близкой к изостатически равновесному положению. Тем не менее кора в этой области большую часть

времени погружалась, и на ней накапливались осадки. В таких условиях для поддержания коры в изостатически равновесном положении в ней должно было развиваться уплотнение пород.

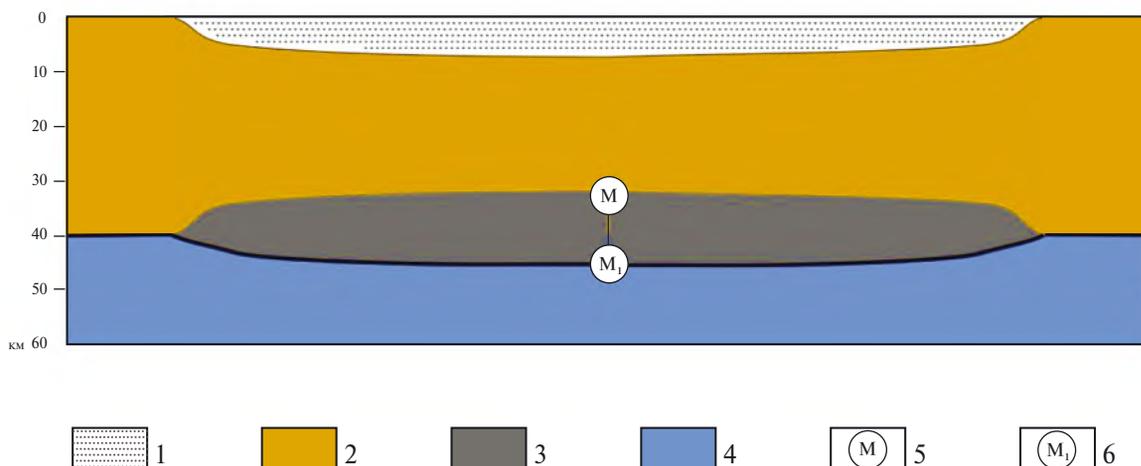
К настоящему времени на севере Западной Сибири и в Карском море накопилось до 7–8 км отложений мезозоя и кайнозоя. В отсутствие растяжения и при неизменной плотности пород их масса на единицу площади коры должна была сохраняться постоянной. В таких условиях отложение на коре слоя осадков мощностью  $h_{oc}$  с плотностью  $\rho_{oc} = 2350$  кг/м<sup>3</sup> должно сопровождаться вытеснением из-под нее слоя мантийных перидотитов с такой же толщиной, но с более высокой плотностью  $\rho_M = 3330$  кг/м<sup>3</sup>. Это должно привести к появлению на поверхности отрицательных аномалий силы тяжести. Для их оценки можно учесть, что разность плотности мантии и осадков  $\rho_M - \rho_{oc} = 980$  кг/м<sup>3</sup> почти такая же, как плотность воды  $\rho_B = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Как известно, слой воды толщиной 1 км создает на своей поверхности аномалию силы тяжести  $\delta g_0 = 42$  мГал. Поэтому образование на коре с постоянной плотностью слоя осадков мощностью  $h_{oc}$ , сопровождающееся вытеснением из-под коры слоя более плотной мантии такой же толщины, должно привести к появлению на поверхности отрицательной аномалии силы тяжести

$$\Delta g = \delta g_0 h_{oc} = -42(h_{oc})_{\text{км}} \text{ мГал.} \quad (16)$$

При мощности осадочного чехла в глубокой части бассейна  $h_{oc} = 5\text{--}7$  км

$$\delta g \sim -200\text{--}300 \text{ мГал.} \quad (17)$$

Отрицательные аномалии столь высокой интенсивности наблюдаются только в отдельных узких областях с большими отклонениями коры от изостатически равновесного положения. Они характерны главным образом для глубоководных желобов на активных окраинах континентов, где океаническая литосфера испытывает изгиб перед субдукцией в мантию. На севере Западной Сибири и в Карском море земная кора близка к изостатически равновесному положению, и там наблюдаются слабые региональные аномалии силы тяжести  $\sim 10$  мГал. Это возможно лишь в том случае, если в литосфере этих областей залегают крупные массы пород, более плотных, чем мантийные перидотиты, вытесненные из-под коры при ее погружении. В больших объемах такие породы могут быть представлены только эклогитами (или глубоко метаморфизованными гранатовыми гранулитами), образовавшимися в нижней части земной коры из менее плотных габброидов ([1, 2] и др.). Поэтому можно



**Рис. 6.** Строение литосферы глубокого осадочного бассейна. 1 – осадочные толщи; 2 – верхняя часть консолидированной коры (фундамент бассейна); 3 – нижняя часть консолидированной коры, испытывавшая высокоградный метаморфизм со значительным увеличением плотности пород (эклогит); 4 – мантия в составе литосферного слоя; 5 – положение раздела Мохо, определяемое по сейсмическим данным; 6 – граница раздела между породами земной коры и мантийными перидотитами.

ожидать, что в Западной Сибири, испытывавшей крупное погружение без растяжения коры, под разделом Мохо залегают не мантийные перидотиты, а слой более тяжелых эклогитов, образование которых и привело к крупному погружению коры (рис. 6). Чтобы определить, к каким изменениям в строении коры приводит образование эклогитов из габброидов в ее нижней части, приведем следующие простые оценки.

В отсутствие растяжения коры и при ее сохранении в состоянии изостатического равновесия для погружения и формирования слоя осадков с плотностью  $\rho_{oc}$  и мощностью  $h_{oc}$  из габброидов в нижней коре с плотностью  $\rho_{гб}$  должен образоваться слой эклогитов мощностью

$$h_э = (\rho_{гб}/\rho_э)[(\rho_э - \rho_{oc})/(\rho_э - \rho_{гб})]h_{oc}. \quad (18)$$

Здесь  $\rho_э$  – плотность эклогита. В Тюменской и Ен-Яхинской сверхглубоких скважинах мощность мезозойско-кайнозойских отложений составляет  $h_{oc} = 7.3$  км. Принимая в (18) это значение  $h_{oc}$  вместе с  $\rho_{oc} = 2350$  кг/см<sup>3</sup>,  $\rho_{гб} = 2930$  кг/м<sup>3</sup> и  $\rho_э = 3400$  кг/м<sup>3</sup>, находим:

$$h_э = 13.4 \text{ км}. \quad (19)$$

Мощность габброидов, из которых образовался слой эклогита мощностью  $h_э$ , составляла

$$h_{гб} = (\rho_э/\rho_{гб})h_э. \quad (20)$$

Для принятых выше значений параметров  $\rho_{гб}$ ,  $\rho_э$  и при  $h_э = 13.4$  км мощность слоя габброидов, испытывавших глубокий метаморфизм, составит

$$h_{гб} = 15.5 \text{ км}. \quad (21)$$

По своему среднему составу эклогиты относятся к земной коре. Но скорости продольных волн в них близки к скоростям в мантийных перидотитах. Поэтому по сейсмическим данным эклогиты будут отнесены к верхним слоям мантии (см. рис. 6). При начальной мощности коры  $h_k^0 = 40$  км,  $h_{oc} = 7.3$  км и  $h_{гб} = 15.5$  км раздел Мохо М, определяемый по сейсмическим данным, оказывается расположенным на кровле эклогитов на глубине

$$h_k = h_{oc} + (h_k^0 - h_{гб}) = 31.8 \text{ км} \approx 32 \text{ км}. \quad (22)$$

Подошва земной коры, отличающейся от мантии по своему вещественному составу, раздел  $M_1$ , будет расположена на глубине

$$h_k^1 = h_k + h_э = 45.2 \text{ км} \approx 45 \text{ км}. \quad (23)$$

В результате раздел Мохо М, определяемый по сейсмическим данным, оказывается расположенным на 8 км выше начальной глубины подошвы коры. После метаморфизма с уплотнением пород в нижней коре ее подошва  $M_1$ , где породы основного состава перекрывают мантийные перидотиты, опускается на 5 км ниже начального уровня.

Приведенные оценки весьма условны и имеют, скорее, иллюстративный характер. Под рядом глубоких осадочных бассейнов скорости продольных волн в нижней коре не изменяются резко на некотором уровне, а постепенно возрастают с глубиной на интервалах мощностью  $\geq 10$  км ([2] и др.). Это может указывать на постепенное увеличение плотности пород и степени их метаморфизма. Его развитие сопровождается повышением скоростей

продольных волн в породах вплоть до значений, типичных для мантийных перидотитов. В результате наблюдается сильное сокращение мощности земной коры, определяемой по сейсмическим данным. Именно такая ситуация характерна для Западно-Сибирского осадочного бассейна. Мощность земной коры на его окраинах составляет 40–45 км. В большинстве внутренних районов, судя по сейсмическим данным, она сокращается до 30–40 км, а в северной части бассейна – до 30–35 км. Поскольку эти области перекрыты мощным слоем осадков, то сокращение мощности консолидированной коры оказывается еще более значительным – до 25–30 км. При этом мощность нижней части коры (10–20 км), испытавшей метаморфическое преобразование с увеличением скоростей продольных волн до значений, типичных для мантии, оказывается сопоставимой с полученной выше оценкой (19).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значительная часть площади континентов покрыта глубокими осадочными бассейнами. Образование таких структур большинством исследователей связывается с сильным растяжением литосферного слоя – с рифтогенезом. Как показал, однако, анализ данных сейсмического профилирования, в ряде крупных бассейнов на их фундаменте деформации растяжения невелики, и они могут обеспечить лишь малую долю наблюдаемых погружений коры ([1, 2] и др.). Сторонники растяжения как главной причины крупных погружений коры такой вывод всегда могут подвергнуть сомнению, ссылаясь на ненадежность интерпретации данных сейсмического профилирования для глубин 10–20 км.

Образование Западно-Сибирского осадочного бассейна многими исследователями связывается с пострифтовым погружением, последовавшим за сильным растяжением литосферного слоя в конце перми–начале триаса. За каждые 70–80 млн лет скорость пострифтового погружения коры должна была бы уменьшаться в нем в несколько раз ([19] и др.). Анализ данных по двум сверхглубоким скважинам, пробуренным на севере бассейна, показал, однако, что в течение первых 70–80 млн лет после предполагаемого растяжения погружение коры в этой области в несколько раз ускорилось [4]. Это исключает большой вклад растяжения коры в ее погружение в области, расположенной вблизи скважин.

Аналогичное рассмотрение проведено выше для трех сейсмогеологических разрезов

протяженностью 700–900 км на севере Западной Сибири и в Карском море. Эти разрезы позволяют проследить динамику погружения коры с начала триаса по ранний олигоцен, а в Карском море – вплоть до современной эпохи. Анализ показал, что во всей этой обширной области за 220–240 млн лет происходило не сильное замедление погружения, а его ускорение в несколько раз. Отсюда следует, что растяжение литосферы могло обеспечить не более 10% наблюдаемого погружения коры.

Растяжение земной коры обычно сопровождается образованием в ней крупных сбросов с типичными углами падения порядка 45° (см. рис. 2, 4 и 5). Существование в осадочном бассейне таких сбросов, в свою очередь, часто рассматривается как указание на то, что бассейн образовался в результате растяжения коры. При этом обычно не проверяется, было ли растяжение достаточным для образования бассейна. Величина растяжения на подошве мезозоя в Западно-Сибирском бассейне (см. рис. 2, 4 и 5) была нами оценена по амплитуде смещения этой границы на крыльях разломов. Проведенный таким образом подсчет показал, что относительное растяжение на подошве мезозоя не превышает 1%. Оно могло обеспечить накопление не более нескольких процентов общей мощности осадков мезозоя и кайнозоя.

При больших размерах бассейна кора в нем должна была оставаться близкой к изостатически равновесному положению. В таких условиях накопление на ней 5–6 км осадков могло произойти только в результате значительного уплотнения пород в нижней части коры за счет проградного метаморфизма. Для определения его природы необходимо провести анализ развития погружения земной коры в Западной Сибири во времени и в пространстве, как это было ранее сделано в отношении другого региона [3].

В настоящей работе были рассмотрены данные по трем сейсмогеологическим разрезам в мезозойско-кайнозойском осадочном бассейне Западной Сибири. На данной основе, с помощью простых приемов удалось оценить роль растяжения литосферы в образовании бассейна, а также определить интенсивность растяжения земной коры на его фундаменте. К настоящему времени накоплен большой фактический материал по строению множества осадочных бассейнов на разных континентах. Способы анализа разрезов, использованные в настоящей работе, могут существенно помочь в интерпретации этих данных.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках госзаданий Минобрнауки России для ИФЗ РАН на 2022-2024 гг., № гос. задания FMWU-2022-0002 (рег. № 122040600077-1) и МГУ им. М.В. Ломоносова ИД № 26874048 (рег. № AAAA-A16-116042010088-5).

## 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-Баренцевская 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 РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 2. С. 119–131.  
<https://doi.org/10.31857/S2686739722601843>
4. *Артюшков Е.В., Чехович П.А.* Западно-Сибирский осадочный бассейн. Отсутствие сильного растяжения земной коры по данным сверхглубокого бурения // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 512, № 2. С. 90–99.  
<https://doi.org/10.31857/S2686739723601175>
5. *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.
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., Ершов С.В., Калинин А.Ю., Калинина Л.М., Канаков М.С., Соловьев М.В., Сурикова Е.С., Шестакова Н.И.* Сейсмостратиграфия, история формирования и газонасность структур Надым-Пурского междуречья // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 8. С. 1583–1595.  
DOI: 10.15372/GiG20160810
8. *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.  
DOI: 10.15372/GiG20170307
9. *Конторович В.А., Аюнова Д.В., Гусева С.М., Калинина 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. 2018. № 4. С. 10–26.  
DOI: 10.18303/2619-1563-2018-4-3
10. *Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю.* Тектоническая эволюция Сибирского палеоконтинента от неопротерозоя до позднего мезозоя // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 7. С. 883–899.
11. *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 OYQEVF.
12. *Сараев С.В., Батурина Т.П., Пономарчук В.А., Травин А.В.* Пермьтриасовые вулканы 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. [http://www.ngtp.ru/rub/2022/1\\_2022.html](http://www.ngtp.ru/rub/2022/1_2022.html)
14. *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.
15. *Allen P.A., Allen J.R.* Basin analysis. Oxford. 2005. Blackwell. 549 p.
16. *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.
17. *Kaban M.K., P. Schwintzer P., Tikhotsky S.A.* Global isostatic gravity model of the Earth // Geophys. J. Int. 1999. V. 136. P. 519–536.
18. *Lithgow-Bertelloni C., Silver P.G.* Dynamic topography, plate driving forces and the African Superswell // Nature. 1998. V. 395. P. 269–272.
19. *McKenzie D.* Some remarks on the development of sedimentary basins // Earth Planet. Sci. Lett. 1978. V. 40. P. 25–32.
20. *Molnar P., England P.C., Jones C.H.* Mantle dynamics, isostasy, and the support of high terrain // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. 2015. V. 120. P. 1932–1957.  
<https://doi.org/10.1002/2014JB011724>

# WEST SIBERIAN SEDIMENTARY BASIN. CRUSTAL SUBSIDENCE CAUSED BY ROCK CONTRACTION IN ITS LOWER PART DUE TO PROGRADE METAMORPHISM

Academician of the RAS **E.V. Artyushkov<sup>a,\*</sup>**, **P.A. Chekhovich<sup>a,b,\*\*</sup>**

*Received November 23, 2023*

*After revision December 14, 2023*

*Accepted December 22, 2023*

<sup>a</sup>*Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

<sup>\*</sup>*E-mail: arty-evgenij@yandex.ru*

<sup>\*\*</sup>*E-mail: p.chekhovich@gmail.com*

The history of the crustal subsidence in the Mesozoic and Cenozoic in the West Siberian Basin – the largest sedimentary basin in the world – is considered. Most researchers associate its formation with post-rift subsidence of the crust, which followed an episode of strong lithospheric stretching about 250 million years ago near to the Permian to the Triassic transition. A characteristic feature of post-rift subsidence is a decrease in its rate in time. During the Mesozoic-Cenozoic history, in Western Siberia the rate of crustal subsidence should have slow down by an order of magnitude. However, the analysis of long (700–900 km) seismic profiles in the north of Western Siberia and in the Southern Kara Sea shows that since the beginning of the Mesozoic in these regions, on average, there has been an acceleration of the crustal subsidence. Under such circumstances, lithospheric stretching in them could be responsible for only a small part of the total subsidence of the crust of 6–7 km. In Western Siberia, the Earth's crust is close to the isostatic equilibrium. Then, in the absence of strong stretching, the accumulation of thick sedimentary sequences in the basin could only have been caused by rock contraction in the lower crust due to prograde metamorphic reactions. To obtain the above results, we used, for the first time, some simple methods to analyze the structure of the sedimentary cover in the West Siberian Basin. Detailed seismic profiles have been published for many other deep basins on all the continents. The methods of their interpretation implemented in this paper can be easily applied to determine the role of lithospheric stretching in the formation of deep sedimentary basins on the global scale.

*Keywords:* West Siberian Basin, crustal subsidence, lithospheric stretching, prograde metamorphism, rock contraction