

УДК 551.24:551.77

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-3-31-38

ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИНВЕРТИРОВАННОГО ПЕГТЫМЕЛЬСКОГО РИФТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ (ЧУКОТСКОЕ МОРЕ)

**Наталья Витальевна Правикова¹✉, Максим Валерьевич Коротаев²,
Ксения Федоровна Старцева³, Михаил Олегович Беляев⁴,
Анатолий Михайлович Никишин⁵**

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; pravikova@mail.ru✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; korm1111@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kfstartseva@gmail.com

⁴ Институт геологии и разработки горючих ископаемых, Москва, Россия; belyaevmo@igirgi.rosneft.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; amnikishin@gmail.com

Аннотация. Построена кинематическая модель по сейсмическому профилю, проходящему через Пегтумельский инвертированный рифт (Чукотское море). Выделены основные этапы формирования рифта: 1) 125–34 млн лет; 2) 34–20 млн лет; 3) 20–0 млн лет. Проведено сопоставление выделенных этапов с историей развития Восточной Арктики.

Ключевые слова: Арктика, Чукотское море, сбалансированные разрезы, кинематическая реконструкция

Для цитирования: Правикова Н.В., Коротаев М.В., Старцева К.Ф., Беляев М.О., Никишин А.М. Этапы формирования инвертированного Пегтумельского рифта по результатам кинематической реконструкции (Чукотское море) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 3. С. 31–38.

EVOLUTION OF THE INVERTED PEGTYMEL RIFT BASED ON THE RESULTS OF KINEMATIC RECONSTRUCTION (CHUKCHI SEA)

**Natalia V. Pravikova¹✉, Maxim V. Korotaev², Kseniya F. Startseva³,
Mikhail O. Belyaev⁴, Anatoly M. Nikishin⁵**

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; npravikova@mail.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; korm1111@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kfstartseva@gmail.com

⁴ Institute Of Geology and Development of Fossil Fuels, Moscow, Russia; belyaevmo@igirgi.rosneft.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; amnikishin@gmail.com

Abstract. A kinematic model was built for the seismic profile passing through the Pegtymel inverted rift (Chukchi Sea). The main stages of rift formation have been identified: (1) 125–34 Ma; (2) 34–20 Ma; (3) 20–0 Ma. The identified stages are compared with the history of the development of the Eastern Arctic.

Keywords: Arctic, Chukchi Sea, balanced cross-sections, kinematic reconstruction

For citation: Pravikova N.V., Korotaev M.V., Startseva K.F., Belyaev M.O., Nikishin A.M. Evolution of the Inverted Pegtymel Rift Based on the Results of Kinematic Reconstruction (Chukchi Sea). *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 3: 31–38. (In Russ.).

Введение. В последние годы появилось большое количество сейсмических данных по Арктическому региону, в том числе по Чукотскому морю, включая его Российский сектор. Сейсморазведочные исследования проводились компаниями ОАО «ДМНГ», TGS, ОАО «Севморгео», а также в рамках программ «Арктика-2011», «Арктика-2012» и «Арктика-2014». Многие из них собраны нами в единый проект [Nikishin et al., 2021; Никишин и др., 2022]. Сейсмические данные скоррелированы со скважинными данными по Американскому сектору акватории [Mineral..., 2006]. На основании полученных данных

была построена новая схема сейсмостратиграфии [Никишин и др., 2019].

Целью данной работы является восстановление геологической истории Пегтумельского инвертированного рифта. Для этого в рамках новой модели [Никишин и др., 2022] были проинтерпретированы сейсмические профили; проведена проверка корректности интерпретации методом сбалансированных разрезов и создана кинематическая реконструкция профиля, определены этапы деформаций рифта и проведена их корреляция с этапами развития Арктического региона.

Материалы и методы исследований. *Геология Южно-Чукотского бассейна.* Изученный профиль располагается на границе Восточно-Сибирского и Чукотского морей и пересекает западное замыкание Южно-Чукотского бассейна (рис. 1). Бассейн расположен в Восточной Арктике, к северу от Чукотского полуострова, к востоку от Восточно-Сибирского моря, на западе продолжается вдоль Аляски до залива Коцебу. Американская часть Южно-Чукотского бассейна называется бассейном Хоупа.

Бассейн сформировался на месте апт-альбских континентальных рифтов и подстилается фундаментом позднемезозойского возраста Новосибирско-Чукотского орогена [Никишин и др., 2022; Nikishin, 2021]. Мощность осадочного чехла в среднем 4 км, в наиболее глубоких частях бассейна достигает 8 км [Verzhbitky et al., 2012; Малышев и др., 2010].

Непосредственно в Южно-Чукотском бассейне нет скважин, однако на шельфе Аляски есть большое количество скважин (Clondike-1, CrackerJack-1, Popcorn-1, Burger-1, Diamond-1) с полным комплексом исследований [Mineral..., 2006], по которым проведена привязка отражающих горизонтов.

Сейсмическая интерпретация. Нами были проинтерпретированы композитные сейсмические профили, где выявлен инверсированный меловой Пегтымельский рифт (рис. 2). Для интерпретации выбран центральный сегмент профиля ION15_4410 (ION-GXT (USA), 2015), пересекающего Пегтымельский рифт. Сейсмические профили, представленные изначально во временном масштабе, были преобразованы в глубинный масштаб по данным скважин на шельфе Аляски [Mineral..., 2006]. Структурная интерпретация выполнена на профилях в масштабе глубин в программном пакете “Move 2017” (Midland Valley).

При интерпретации профиля выделены следующие отражающие горизонты [Nikishin et al., 2021; Никишин и др., 2022].

H125 (125 млн лет, баррем-апт) — время начала рифтинга в Чукотском бассейне, время проявлений магматизма на хр. Менделеева и на островах Восточной Арктики. Граница выражена как несогласие предаптского возраста.

H45 (45 млн лет, середина эоцена) — высококомплитудные рефлекторы HARS-1. Соответствуют подошве верхнего клиноформного комплекса в Северо-Чукотском бассейне. Граница коррелируется с возрастными датировками океанической коры по данным линейных магнитных аномалий [Nikishin et al., 2021].

H34 (34 млн лет, начало олигоцена) — кровля хаотического комплекса в Восточно-Сибирском и Чукотском морях, соответствует кровле терминального эоценового комплекса в бассейнах Аляски, совпадает со временем резкого падения уровня моря в Арктическом бассейне. Возраст ее увязан с возрастами линейных магнитных аномалий в Евразийском бассейне [Nikishin et al., 2018].

H20 (20 млн лет, миоцен) — поверхность регионального эрозионного события, вероятно связанного с началом формирования системы единых донных морских течений в Атлантике и Арктическом океане [Никишин и др., 2022]. Возраст датируется по линейным магнитным аномалиям в Евразийском бассейне [Nikishin et al., 2018].

На сейсмических данных можно выделить большое количество разрывных нарушений, современная кинематика разломов — взбросо-надвиговая, разрывные нарушения смещают горизонты H125 и H45, в разной степени деформируют горизонты H34 и H20, затухают в верхах плиоцена.

Литологический состав отложений и палеогеография Южно-Чукотского бассейна тесно связаны с геодинамикой формирования восточной части Арктического бассейна, Чукотского орогена [Nikishin et al., 2021] и поднятия Менделеева. Бассейн представлял собой типичный пострифтовый бассейн, заполнявшийся осадками, преимущественно с Чукотского орогена. Общая мощность осадочного чехла варьирует в пределах 4–8 км. Предполагаемый литологический состав отложений — преимущественно глины с прослоями песчаников [Никишин и др., 2022; Mineral..., 2006].

Методика построения балансированных разрезов. Для проверки правильности интерпретации и восстановления ключевых моментов геологической истории была выполнена кинематическая реконструкция профиля. Для этого был использован метод двухмерного кинематического восстановления, иногда называемый методом сбалансированных разрезов.

Сбалансированный разрез — логичный разрез, непротиворечиво объясняющий наблюдаемую структурную ситуацию на поверхности, в скважинах и на сейсмических профилях, и допускающий геометрически корректный вариант восстановления первичного горизонтального залегания слоев [Гайдук, Прокопьев, 1999; Геологический..., 2010; Dahlstrom, 1969; Woodward et al., 1985].

Объем и площадь слоя, не учитывая влияния уплотнения пород, не меняются в процессе деформации, соответственно, исходная площадь (или длина) любого слоя остается постоянной, а длины слоев в разрезе должны быть согласованы друг с другом.

Построение сбалансированных разрезов проводилось в программном комплексе Move с использованием модуля 2D Kinematic Modeling.

Разрез Пегтымельского рифта может быть кинематически восстановлен с помощью последовательного комбинирования трех основных методик: 1) снятие слоев с учетом разуплотнения пород (Backstripping); 2) моделирования движения по разломам (2D Move-on-Fault); 3) выпрямления слоев на додеформированное состояние — момент окончания осадконакопления (2D Unfolding).

Для простой геологической структуры, формирующейся в обстановке растяжения/сжатия, наи-

Рис. 1. Тектоническая карта Арктики, карта рельефа акустического фундамента шельфовых морей Восточной Арктики по [Никишин и др., 2022] и расположение композитного сейсмического профиля ION15_4410

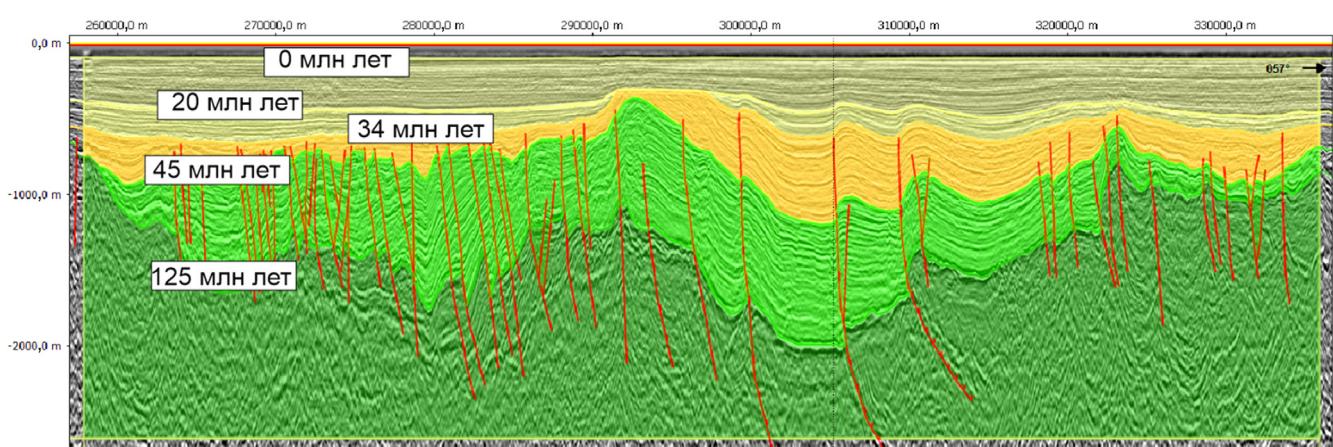
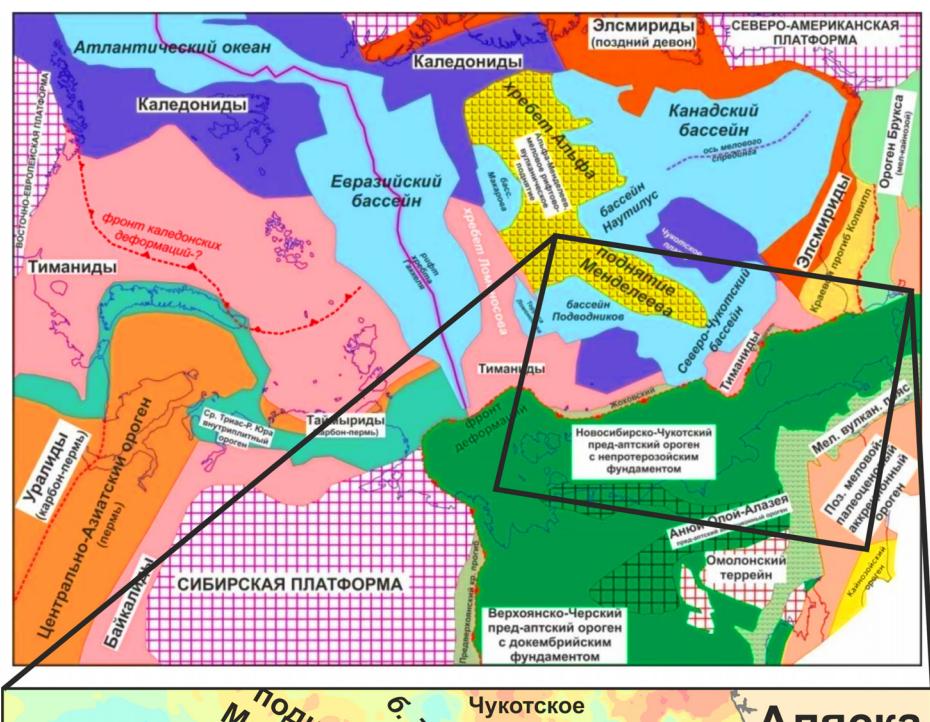


Рис. 2. Фрагмент композитного сейсмического профиля ION15_4410 и его геологическая интерпретация

более применим алгоритм простого сдвига (Simple Shear).

В процессе растяжения алгоритм простого сдвига (Simple Shear) работает, смещающая висячий блок по поверхности сместителя вдоль заданного направления тектонического транспорта (рис. 3). При растяжении создается зазор между плоскостью разлома и висячим блоком, затем висячий блок смещается по направлению к плоскости разлома. Смещение контролируется вектором, который указывает путь, по которому элементы висячего блока проходят во время движения. Таким образом, алгоритм простого сдвига (Simple Shear) предполагает, что деформация происходит внутри висячего блока вдоль ряда параллельных векторов, которые перемещаются поперек плоскости разлома на расстояние, определяемое горизонтальной амплитудой. Длина векторов не изменяется на всем протяжении деформации, следовательно, топография плоскости разлома отражается в пластах висячего блока в виде складок.

Инструмент 2D-разуплотнения позволяет моделировать эффекты изменения объема породы из-за потери пористости, связанной с увеличением глубины залегания. Функция уплотнения пород в зависимости от глубины основана на работе [Slater, 1980]:

$$\varphi = \varphi_0(e^{-cy})$$

где: φ — современная пористость на глубине, φ_0 — пористость на поверхности, c — коэффициент пористости-глубины ($1/\text{км}$) и y — глубина (м).

Принятые параметры пород приведены в таблице.

Результаты исследований и их обсуждение. **Кинематическая реконструкция.** На первом этапе был снят интервал разреза возрастом 0–20 млн

Параметры пород, использованные для разуплотнения

Порода	Пористость на поверхности	Коэффициент c
Песчаник	0,49	0,27
Глина	0,63	0,51
Глинистый песчаник	0,56	0,39

лет, нижележащие отложения были разуплотнены (рис. 4, а) методом Backstripping.

В центральной части рифта восстановлены сэродирированные осадки с возрастом 34–45 млн лет (рис. 4, б). Горизонт Н34 (34 млн лет) был отстроен параллельно нижележащим отложениям, с учетом изменения мощности и направления оси складки. Последовательно смещения по пологим взбросам восстанавливались (рис. 4, в) методом простого сдвига (Simple Shear).

Далее было проведено выравнивание разреза (2D Unfolding) на горизонт Н20 (20 млн лет) (рис. 4, г).

Методом Backstripping снят интервал разреза с возрастом 20–34 млн лет, нижележащие отложения разуплотнены (рис. 4, д).

Далее было проведено выравнивание разреза (2D Unfolding) на горизонт Н34 (34 млн лет) (рис. 4, е).

На последнем этапе был снят интервал разреза (Backstripping) 34–45 млн (рис. 4, ж) и произведено выравнивание (2D Unfolding) на горизонт 45 млн лет (рис. 4, з).

Этапы формирования Пегтымельского рифта. В результате кинематической реконструкции можно выделить три ключевых этапа формирования инвертированного Пегтымельского рифта (рис. 5).

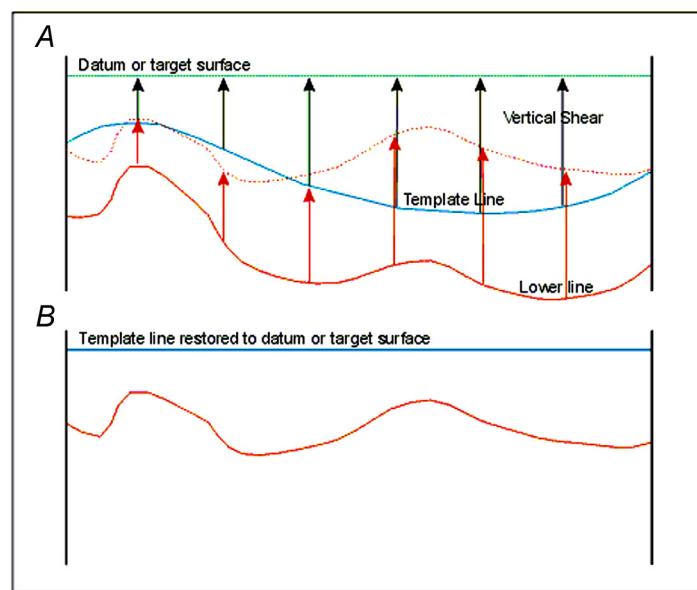
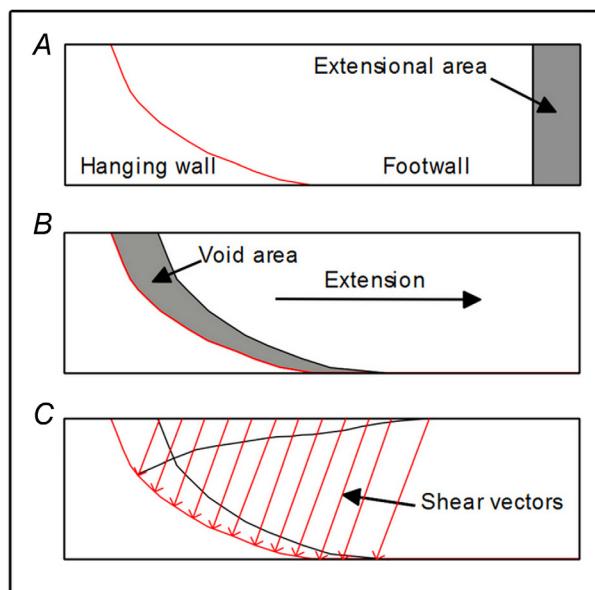


Рис. 3. Принципы работы алгоритма простого сдвига (Simple Shear) для смещения по разлому (слева): А — исходная конфигурация разлома, В — смещение висячего блока и образование зазора, С — смещение висячего блока по серии векторов; и расправление складок (справа): А — выбор слоя-шаблона и поверхности, до которой производится выравнивание, В — выравнивание слоя и смещение нижнего слоя по вертикальным векторам (www.mve.com)

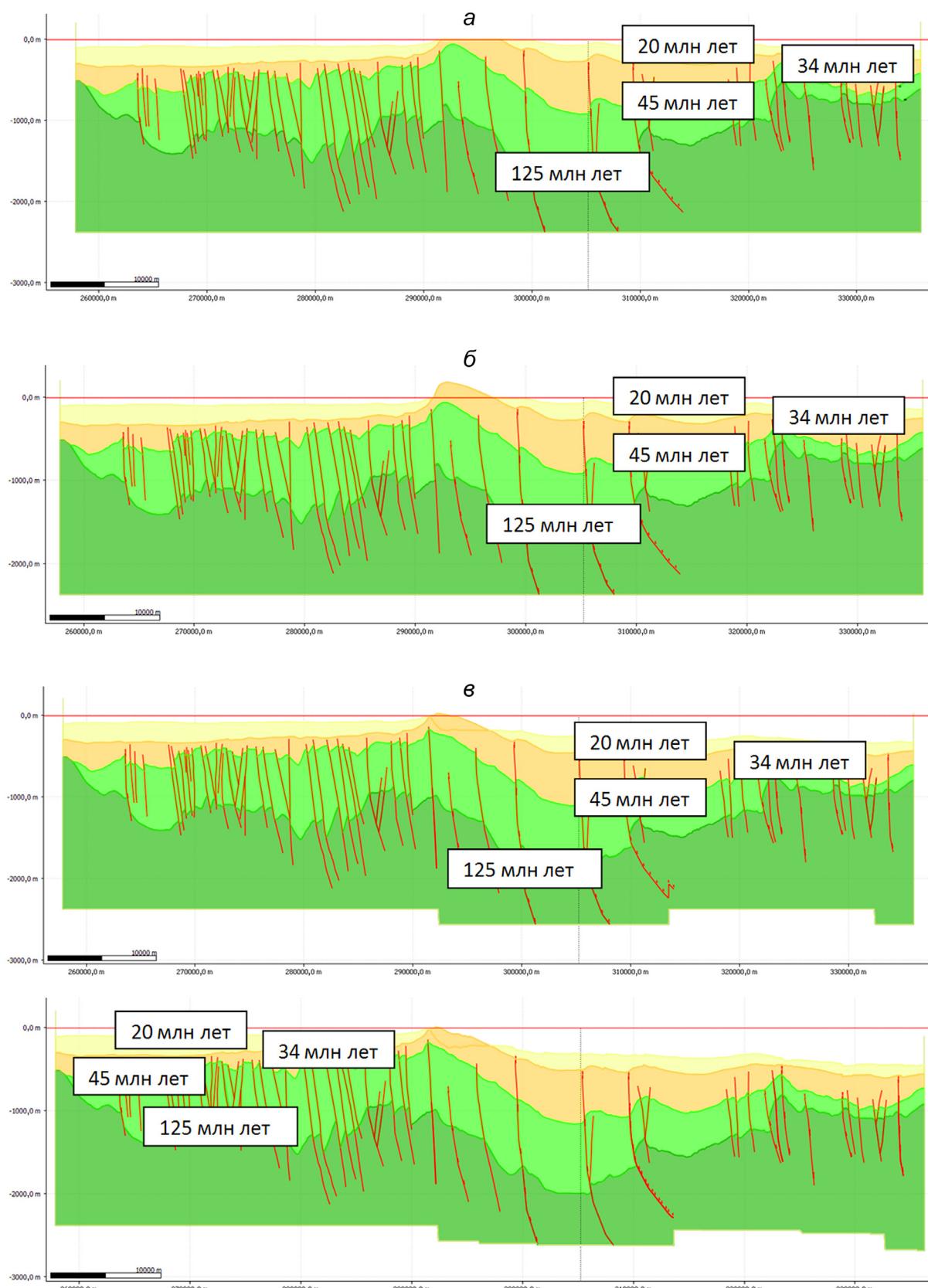


Рис. 4. Интерпретация фрагмента композитного сейсмического профиля ION15_4410 со снятыми отложениями 0–20 Ma (а); со снятыми отложениями 0–20 Ma и восстановленными отложениями с возрастом 34–45 Ma (б); со снятыми отложениями 0–20 Ma и восстановленными отложениями с возрастом 34–45 Ma, с последовательным восстановлением подвижек по взбросам (в); со снятым интервалом разреза 0–20 млн лет и восстановленными отложениями с возрастом 34–45 млн лет, разрез выровнен на горизонт H20 (20 млн лет) (г); со снятыми отложениями 0–20 млн лет и 20–34 млн лет (д); со снятыми отложениями 0–20 млн лет и 20–34 млн лет (ж); со снятыми отложениями 0–20 млн лет, 20–34 млн лет и 34–45 млн лет (з); со снятыми отложениями 0–20 млн лет, 20–34 млн лет и 34–45 млн лет, разрез выровнен на горизонт H45 (45 млн лет) (з)

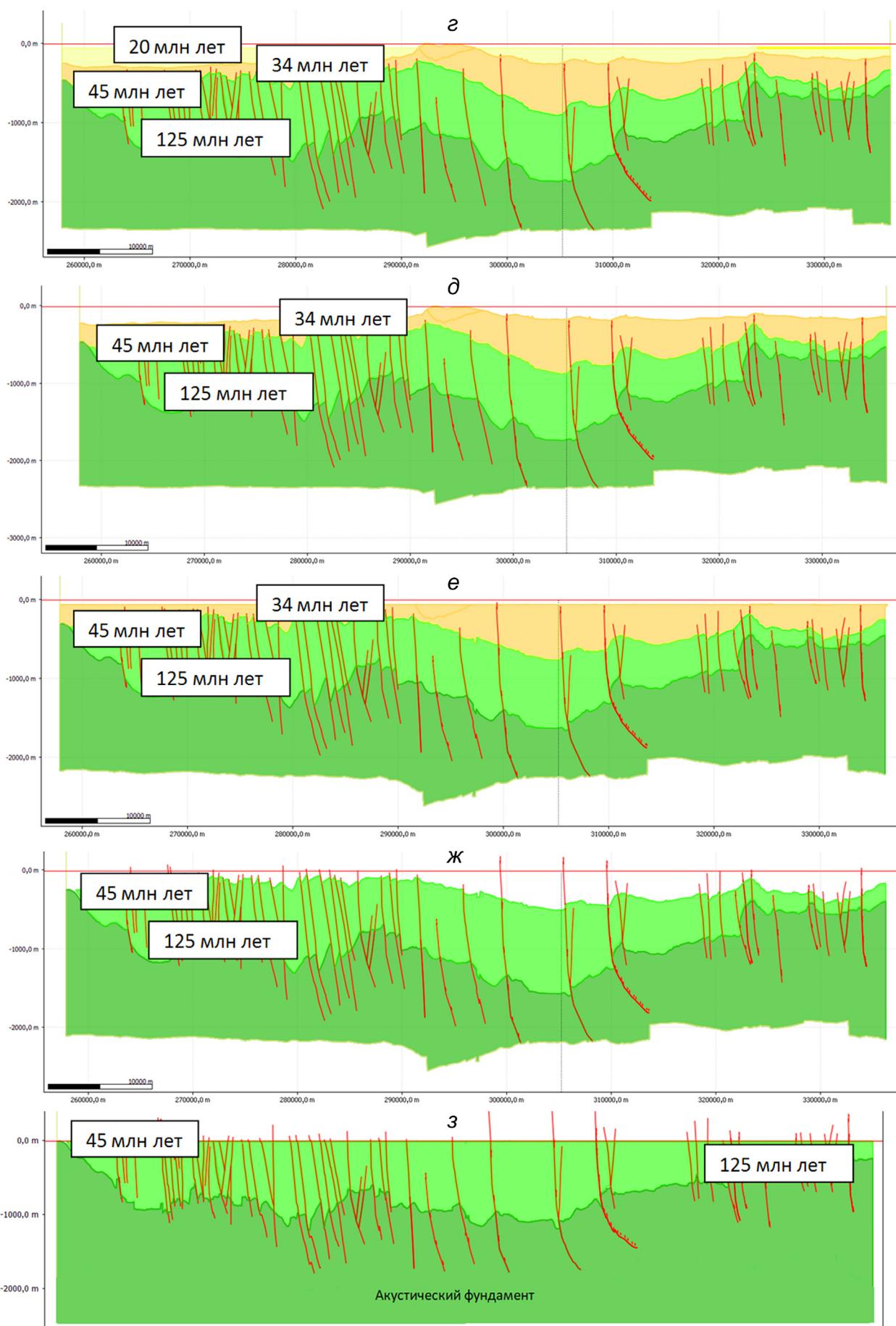


Рис. 4. Окончание

Этап 1. 125–34 млн лет. Этап растяжения и погружения (рис. 5, а), формирования рифта и его заполнения синрифтовыми и пострифтовыми осадками.

Рифтовая долина (рис. 4, з) закладывается в конце баррема-апте, около 125 млн лет. Это время отвечает обстановке общего рифтогенеза во всей Восточной Арктике и крупномасштабного магматизма на поднятии Менделеева [Никишин и др., 2022]. В апт-альбское время в обстановке общего растяжения рифт заполняется синрифтовыми осадками (рис. 4, ж, з). В позднем мелу в относительно спокойной тектонической обстановке медленного термального погружения [Никишин и др., 2022] рифтовая долина заполняется пострифтовыми осадками (рис. 4, е, ж, з). По данным возрастов дегритовых цирконов источником сноса обломочного материала в меловое время являлись мезозойские орогены Дальнего Востока [Никишин и др., 2022]. Граница между отложениями рифт/пострифт на данном профиле не выделяется. В эоцене продолжается медленное погружение и заполнение рифта пострифтовыми осадками. Регионально это время начала роста и эрозии орогена на востоке Азии. В Северо-Чукотском бассейне в это время формируются клиноформенные комплексы [Никишин и др., 2022].

Этап 2. 34–20 млн лет. Этап сжатия (рис. 5, б). На этом этапе рифт претерпевает инверсию. Происходят многочисленные подвижки по взбросам и надвигам (рис. 4, в), в центральной части рифта формируется принадвиговая антиклиналь (рис. 4, б), отложения с возрастом 34–45 млн лет частично оказываются выше уровня моря и размываются (рис. 4, б). Горизонтам Н34 и Н20 соответствуют угловые несогласия, и можно предположить, что именно этим возрастам отвечают главные фазы сжатия. Они коррелируют с ранее выделенными [Ихсанов, 2014; Skaryatin et al., 2022] в Южно-Чукотском бассейне олигоцен-миоценовым деформациями. Здесь в палеоцене-миоцене продолжалось погружение в режиме транстенсии, прерываемое компрессионными событиями. Две транспрессионные фазы привели к локальной инверсии в западной части Южно-Чукотского бассейна и формированию структур Ушакова и Надеждина [Skaryatin et al., 2022]. Как и в Пегтымельском рифте, фазы инверсии сопровождались эрозией замков антиклинальных складок [Skaryatin et al., 2022].

Этап 3. 20–0 млн лет. На этом этапе (рис. 5, в) обстановка стабилизируется, рифт перекрывается осадками. В Северо-Чукотском бассейне горизонт Н20 соответствует кровле верхнего клиноформенного комплекса. Осадки выше этого горизонта

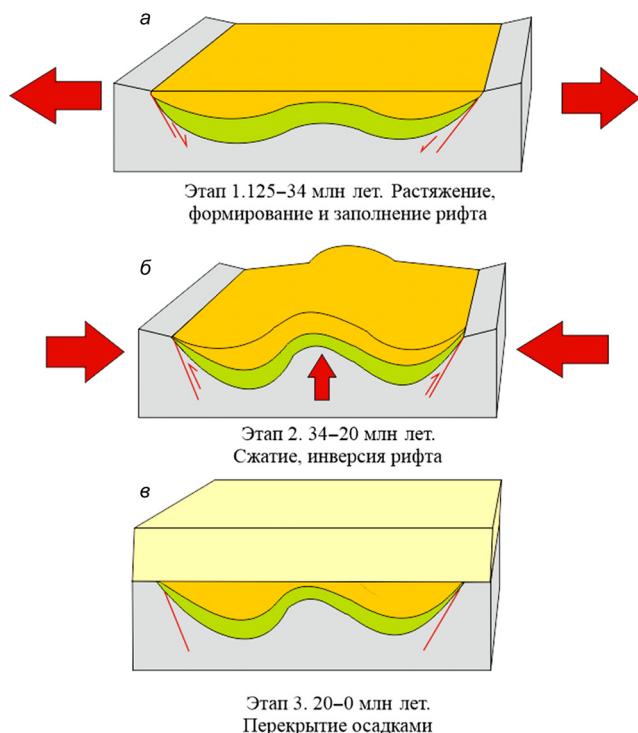


Рис. 5. Этапы формирования инвертированного Пегтымельского рифта

примерно равномерно перекрывают все структуры [Никишин и др., 2022].

Выводы. 1. С помощью метода сбалансированных разрезов подтверждена корректность проведенной сейсмической интерпретации.

2. В формировании Пегтымельского рифта выделено три крупных этапа:

- 125–34 млн лет — формирование рифта, его заполнение синрифтовыми и пострифтовыми осадками;
- 34–20 млн лет — инверсия рифта, многочисленные подвижки по надвигам;
- 20–0 млн лет — стабилизация территории, перекрытие рифта осадками.

3. Восстановленные этапы формирования Пегтымельского рифта коррелируют с основными событиями в Восточной Арктике.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00160, <https://rscf.ru/project/22-27-00160/> «Геологическое строение и история формирования района поднятия Менделеева в Арктическом океане».

Благодарности. Авторы благодарят М.А. Большакову, В.Е. Вержбицкого, В.В. Гайдука, Г.А. Заварзину, Н.А. Малышева, А.К. Худолея, А.Ф. Читалина за прочтение первичной версии статьи и конструктивные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гайдук В.В., Прокопьев А.В. Методы изучения складчато-надвиговых поясов / Отв. ред. Л.М. Парфенов; Рос. акад. наук. Сиб. отд-ние. Ин-т геол. наук. АО «Якутскгеофизика». Новосибирск: Наука; Сиб. предприятие РАН, 1999. 160 с.
- Геологический словарь: В 3 т. / Гл. ред. О.В. Петров. 3-е изд, перераб. и доп. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. 432 с.
- Ихсанов Б.И. Позднемезозойские и кайнозойские деформации в осадочных бассейнах акватории Чукотско-

го моря: Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. н. М.: МГУ, геол. факультет, 2014. 22 с.

4. Малышев Н.А., Обметко В.В., Бородулин А.А. и др. Тектоника осадочных бассейнов российского шельфа Чукотского моря // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя. Мат-лы XLIII Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2010. С. 23–29.

5. Никишин А.М., Петров Е.И., Старцева К.Ф. и др. Сейсмостратиграфия, палеогеография и палеотектоника Арктического глубоководного бассейна и его российских шельфов. М.: ИНП РАН, 2022. 156 с.

6. Никишин А.М., Старцева К.Ф., Вержбицкий В.Е. и др. Сейсмостратиграфия и этапы геологической истории осадочных бассейнов Восточно-Сибирского и Чукотского морей и сопряженной части Амеразийского бассейна // Геотектоника. 2019. № 6. С. 1–24.

7. Dahlstrom C.D.A. Balanced cross sections // Canadian J. Earth Sci. 1969. Vol. 6, N 4. P. 743–757. <http://www.mve.com/>

8. Mineral Management Service (MMS) 2006. Chukchi Sea Province Summary, 2006, Assessment — Alaska Region, World Wide Web Address: Seismic Framework, US Chukchi Shelf 13. <http://www.mms.gov/alaska/re/reports/2006Asmt/CHGA/chga.HTM>.

9. Nikishin A.M., Gaina C., Petrov E.I. et al. Eurasia Basin and Gakkel Ridge, Arctic Ocean: Crustal asymmetry, ultraslow spreading and continental rifting revealed by new seismic data // Tectonophysics. 2018. 746. 64–82.

10. Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S. et al. 2021. Arctic Ocean Mega Project: Paper 1 — Data collection // Earth — Sci. Rev. 217, 103559.

11. Sclater J.G., Christie P.A.F. Continental Stretching: An Explanation of the Post-Mid-Cretaceous Subsidence of the Central North Sea Basin // J. Geophys. Res. 1980. Vol. 85. P. 3711–3739.

12. Skaryatin M.V., Bulgakova E.A., Verzhbitskiy V.E. et al. South Chukchi–Hope Composite Tectono-Sedimentary Element, Chukchi Sea // Geol. Soc. London, Memoirs (2022), 57 (1).

13. Verzhbitsky V.E., Sokolov S.D., Frantzen E.M. et al. The South Chukchi Sedimentary Basin (Chukchi Sea, Russian Arctic): Age, structural pattern, and hydrocarbon potential, in D. Gao, ed., Tectonics and sedimentation: Implications for petroleum systems: AAPG Memoir 100. 2012. P. 267–290.

14. Woodward N.B., Boyer S.E. Suppe J. An outline of balanced cross-sections. University of Tennessee: Knoxville publications, 1985. 138 p.

Статья поступила в редакцию 01.03.2023,
одобрена после рецензирования 22.03.2023,
принята к публикации 22.07.2023