

УДК 550.82:004.94+55(1-922.1/.2)
doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-92-99

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ КЛИНОФОРМНЫХ КОМПЛЕКСОВ СЕВЕРО-ЧУКОТСКОГО БАССЕЙНА

**Максим Валерьевич Коротаев¹✉, Наталья Витальевна Правикова²,
Ксения Федоровна Алёшина³**

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; korm1111@yandex.ru✉;
<https://orcid.org/0009-0007-4542-7787>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; npravikova@mail.ru;
<https://orcid.org/0000-0001-5605-9261>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kfstartseva@gmail.com;
<https://orcid.org/0009-0000-6261-4110>

Аннотация. Выполнено двухмерное и трехмерное моделирование осадконакопления кайнозойских клиноформных комплексов в Северо-Чукотском бассейне. В осадочном чехле бассейна существуют два клиноформных комплекса: нижний – палеоцен-эоценовый и верхний — олигоценовый. Источником осадочного материала для клиноформ являются орогены Аляски и Чукотки. Выполнено двухмерное моделирование верхнего клиноформного комплекса, определены палеоглубины моря, необходимые для формирования клиноформ. По результатам трехмерного седиментационного моделирования определены возможные источники сноса и количественные характеристики привноса осадочного материала. Реки, обеспечивающие поступление обломочного материала в олигоцене сопоставимы с современными Колымой и Северной Двиной.

Ключевые слова: Арктика, Чукотское море, трехмерная модель, седиментация, клиноформы, моделирование

Для цитирования: Коротаев М.В., Правикова Н.В., Алёшина К.Ф. Трехмерное моделирование осадконакопления клиноформных комплексов Северо-Чукотского бассейна // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 92–99.

3D MODELING OF SEDIMENTATION OF CLINOFORM COMPLEX OF NORTH-CHUKCHI BASIN

Maxim V. Korotaev¹✉, Natalia V. Pravikova², Kseniya F. Aleshina³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; korm1111@yandex.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; npravikova@mail.ru

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

Abstract. 2D and 3D modeling of sedimentation of Cenozoic clinoform complexes was done. There are two clinoform complexes in the North Chukchi basin, the lower — Paleocene-Eocene and the upper — Oligocene. The source of sedimentary material for clinoforms are the orogens of Alaska and Chukotka. Two-dimensional modeling of the upper clinoform complex was performed, and sea level fluctuations necessary for the formation of clinoforms were determined. Based on the results of three-dimensional sedimentation modeling, possible sources of demolition and quantitative characteristics of the input of sedimentary material were determined. The rivers that provided the sediment supply in the Oligocene are comparable to the modern Kolyma and Northern Dvina.

Keywords: Arctic, Chukchi Sea, 3D model, sedimentation, clinoforms, modeling

For citation: Korotaev M.V., Pravikova N.V., Aleshina K.F. 3D modeling of sedimentation of clinoform complex of North-Chukchi basin. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 6: 92–99. (In Russ.).

Введение. Северо-Чукотский бассейн достаточно хорошо изучен сейсмическими методами. На сейсмических профилях ясно видны несколько уровней клиноформных комплексов. Целью данной работы было на основании двухмерного и трехмерного седиментационного моделирования оценить палеоглубины бассейна и их эволюцию, определить вероятные источники сноса, оценить интенсивность привноса и количественный состав материала, а также оценить вероятные коллекторские свойства

кайнозойских резервуаров, связанных с клиноформными комплексами.

Сейсмостратиграфия, хронология основных геологических событий, особенности формирования осадочных комплексов в Северо-Чукотском бассейне разработаны достаточно детально [Фрейман, 2019; Скарягин, 2020; Nikishin, et al., 2021; Никишин и др., 2022]. В восточной части бассейна, на шельфе Аляски пробурены 10 глубоких скважин [Mineral..., 2006] с полным комплексом исследований. В работе авторы

построили двухмерные и трехмерные седиментационные модели регионального уровня, позволяющие оценить источники сноса и количественные характеристики процессов осадконакопления в Северо-Чукотском бассейне в олигоцен-миоценовое время.

Материалы и методы. Северо-Чукотский бассейн (рис. 1) является одним из наиболее глубоких в Арктическом регионе, мощность осадков достигает 20–22 км. Бассейн подстилается, вероятно, гиперрастянутой континентальной корой [Kashubin, et al., 2018; Petrov and Smelror, 2021; Nikishin, et al., 2021].

Для Северо-Чукотского бассейна выделяются следующие сейсмокомплексы [Nikishin, et al., 2021, Никишин и др., 2022]: 1) синрифтовый с полуграбенами и признаками комплексов SDRs и базальтовых траппов, 2) пострифтовый с горизонтальным залеганием осадков, 3) нижний клиноформный комплекс, 4) верхний клиноформный комплекс, 5) верхний комплекс без типичных клиноформ.

Нижний сейсмокомплекс выделяется только на отдельных сейсмических профилях и представлен отложениями заполнения полуграбенов и сейсмокомплексами, сходными с SDR. Диапазон возрастов сейсмокомплекса 125–100 млн лет, его образование происходило синхронно с раскрытием области поднятия Менделеева.

Нижний пострифтовый комплекс характеризуется горизонтальным залеганием слоев. В центральной части Северо-Чукотского бассейна пострифтовые отложения залегают непосредственно на породах акустического фундамента. В составе комплекса выделяется пакет ярких рефлекторов (HARS-2). Предполагается, что эта особенность комплекса соотносится с изменением литологического состава, связанного с проявлением позднемелового потепления (примерно 80 млн лет). Кровлей нижнего пострифтового комплекса является основание нижнего клиноформного комплекса (65 млн лет).

Нижний клиноформный комплекс хорошо выделяется на многих сейсмических профилях как непрерывная клиноформная последовательность. Начало формирования клиноформного комплекса связывается с воздыманием территории современной Аляски и других соседних регионов в ходе Средне-Брукского орогенеза. Между нижним и верхним клиноформными комплексами выделяется отчетливая граница, отвечающая главной трансгрессивной поверхности, вероятно, связанной с кратковременным этапом быстрого погружения. Она соответствует границе HARS-1, выделяемой в бассейне Подводников с возрастом 45 млн лет.

Верхний клиноформный комплекс характеризуется отчетливой проградацией клиноформ в направлении более глубоководной части моря. Его верхней границей является горизонт 20 Ma, осадки выше этого горизонта примерно равномерно перекрывают все структуры.

Верхний клиноформный комплекс начал формироваться в начале среднего эоцена, и в его составе

можно выделить 2 разноориентированных комплекса (рис. 2): Аляскинской на востоке и Колымский на западе. Аляскинский комплекс имеет мощность порядка 1,5 км и характеризуется вертикальной амплитудой клиноформ в среднем 400–450 м, что примерно соответствует значениям глубин в этой части палеобассейна для среднеэоценового–миоценового этапа [Фрейман и др., 2019]. Предположительно, источником материала Аляскинского комплекса послужил хр. Брукса на Аляске, где в это время происходило активное воздымание [Craddock, et al., 2018; Moore, Box, 2016].

Методика моделирования. Для создания модели распределения литологии геологических тел существует два основных подхода: стохастическое моделирование и процессное моделирование.

Стохастическое моделирование применяется во всех пакетах геологического моделирования месторождений. В этом случае распределение фаций внутри тела задается случайным образом, при этом в точках скважин разрез должен совпадать с реальными данными, а процентное распределение фаций должно соответствовать среднему по скважинам. Пользователь может влиять на распределение заданием вариограмм, карт трендов, трехмерных трендов на основе анализа и преобразования сейсмических данных. Один из вариантов стохастического моделирования — объектное моделирование — позволяет задавать геологические объекты (руслы, старицы, каналы) заданной геометрии и ориентации в пространстве, но их распределение по модели остается стохастическим.

Процессное моделирование — специальные пакеты седиментационного моделирования (Sedsim (CSIRO Petroleum), DionisosFlow (Beicip Franlab), Mazay (Sbm — «Лаборатория геологии»), GPM Petrel (Schlumberger)), в которых моделируется именно процесс осадконакопления, основными исходными данными являются конфигурация бассейна, изменение уровня моря, количество и состав осадочного материала, скорость потоков, привносящих материал в бассейн. Такие модели могут калиброваться на скважинные данные или данные сейсмической съемки.

Алгоритмы процессного моделирования осадконакопления можно разделить на три класса — на основе геометрического задания формы осадочных тел, на основе численного решения уравнения Навье–Стокса и на основе решения уравнения диффузии.

Для моделирования были использованы программные пакеты Mazay (Д.Н. Линев, ООО «Лаборатория геологии»), использующий геометрический метод в комбинации с диффузией, и Sedsim (CSIRO Petroleum), использующий решение уравнения Навье–Стокса.

Основными параметрами при геометрическом моделировании служат приток осадочного материала и дальность его распространения от береговой

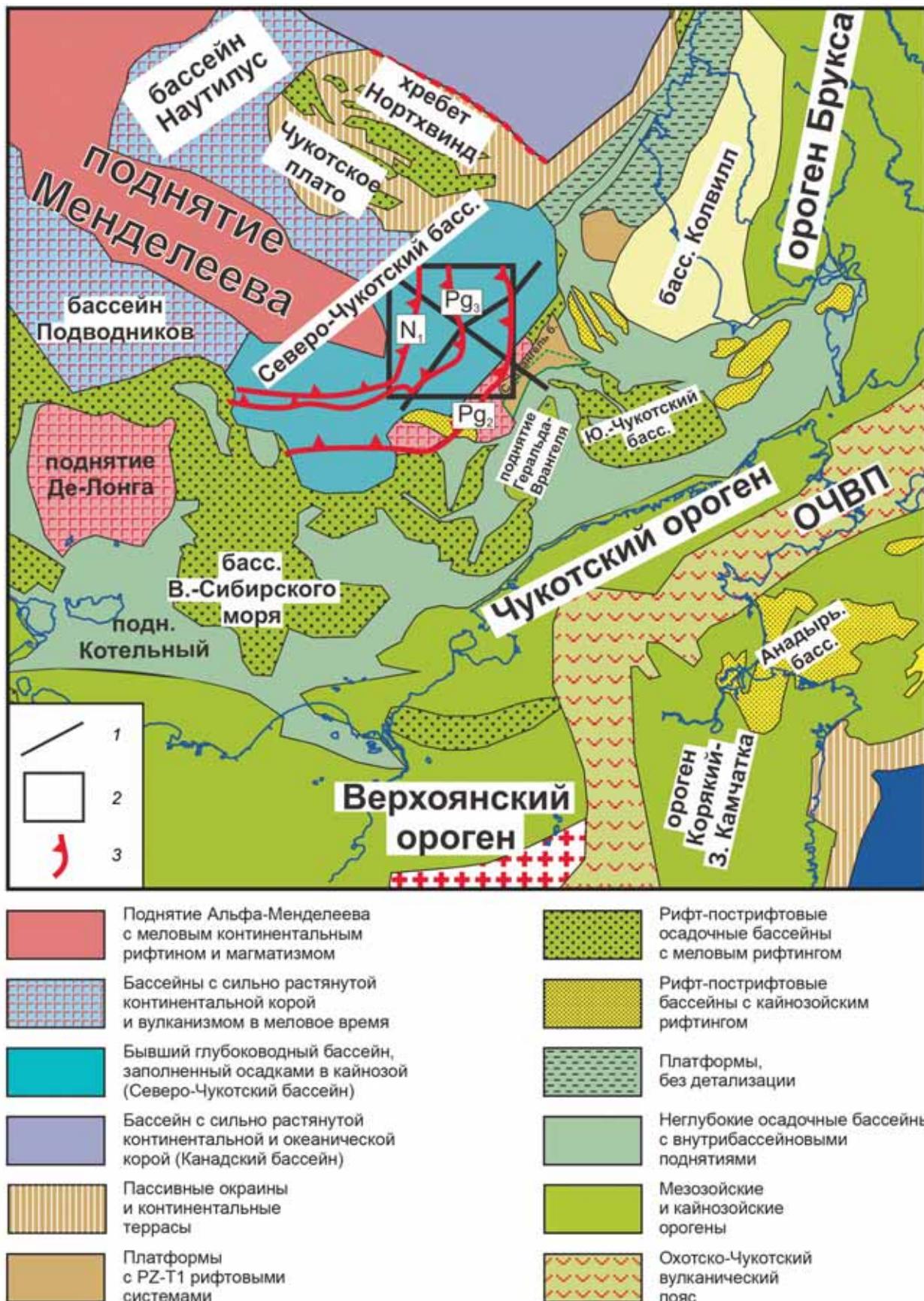


Рис. 1. Расположение Северо-Чукотского бассейна в структуре Арктических бассейнов [Никишин и др., 2022, с изм.]. Показаны профили, использованные для седиментационного моделирования (1), область трехмерного моделирования (2) и положение бровки шельфа (3) для эоцена-миоцена по [Фрейман и др., 2019]

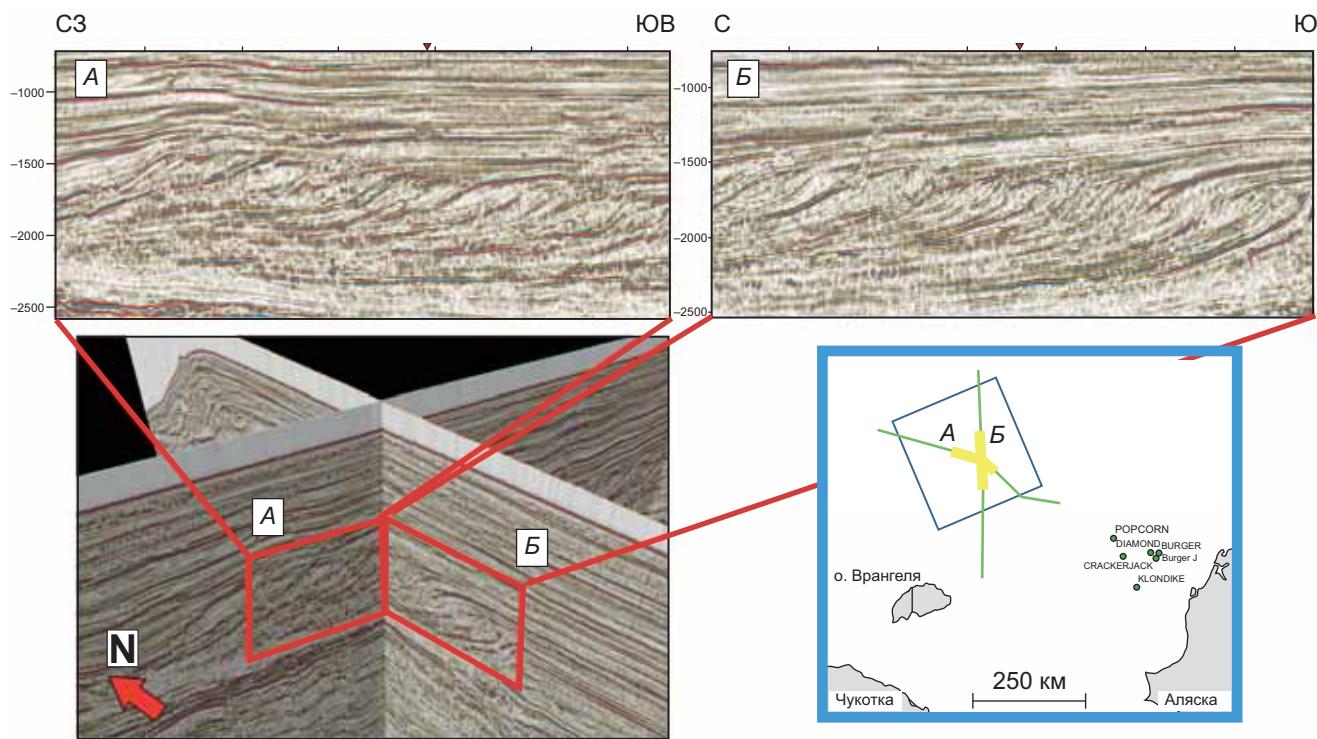


Рис. 2. Общий вид кайнозойских клиноформных комплексов на профилях ION-11-1400 (А), ION-11-4300 (Б). На врезке показаны расположение профилей и область моделирования

линии. На основе этих данных рассчитывается форма накопленного геометрического тела. В каждый момент времени область осадконакопления делится на 2 части: в первой — осадочный материал занимает все пространство, во второй — формируется тело, размер которого определяется параметром « дальность распространения материала » [Линев, Ершов, 2014]. Область транзита материала, где не происходит осадконакопление, зависит от скорости потока и учитывается соотношение высоты надводного рельефа (h_1) и глубины подводной части (h_2) транзитной области (рис. 3). Геометрический алгоритм позволяет рассчитать гранулометрическое распределение в накопленном осадке, используя зависимость размера зерен от расстояния от берега [Линев, Ершов, 2014].

В программе SedSim используется техника маркеров или элементов тока (Fluid Element), для того чтобы смоделировать поток жидкости и транспорт материала, сохранить фиксированную сетку и упростить вычисления для большинства параметров осадконакопления (глубина бассейна, рельеф, граница вода-осадок). Элементы тока определяются заданием временной продолжительности, превышения, скорости тока, позиции и начальной скорости элемента.

SedSim рассчитывает, как много осадка может удержать элемент тока на каждом шаге (рис. 4). Формула расчета транспорта осадков учитывает скорость, плотность флюида, глубину воды и коэффициент Меннинга (коэффициент трения элемента потока зависит от типа потока). Осадконакопление

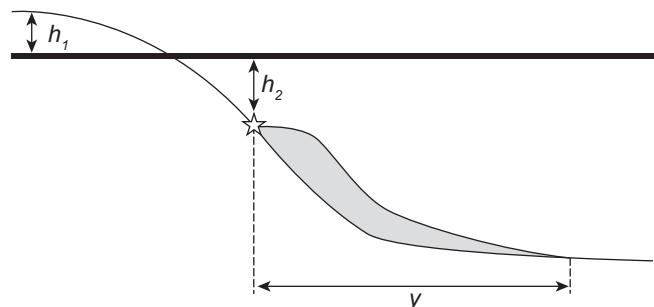


Рис. 3. Схема работы геометрического алгоритма осадконакопления [Линев, Ершов, 2014]

происходит, когда количество осадка в элементе превосходит его способность к удержанию. Эрозия происходит, когда загрузка элемента меньше, чем способность к удержанию, и напряжение сдвига от элемента к поверхности превышает критическое напряжение сдвига [Griffits, 2001; 2012].

При моделировании осадконакопления периодически перераспределяется недавно отложившийся осадок так, что образуются устойчивые склоны, тем самым имитируя скатывание осадка по склону до тех пор, пока он не достигнет устойчивого положения.

По общей схеме седиментационного моделирования [Griffits, 2012] необходимо поэтапно:

1. Определить проблему, решаемую седиментационным моделированием.
2. Определить область моделирования и разрешение сетки модели.
3. Определить геологическое время решения и детальность шага времени при моделировании.

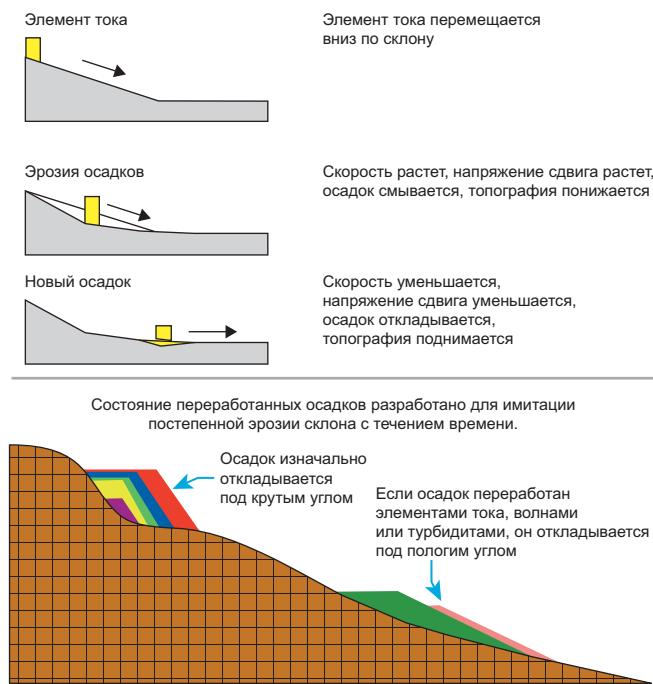


Рис. 4. Базовые принципы моделирования Sedsim [Griffits, 2012]

4. Определить/извлечь исходную поверхность, необходимую для моделирования по сейсмическим или скважинным данным при помощи программ для картопостроения, поверхность должна быть выровнена по соответствующему горизонту.

5. Обсудить биостратиграфические и седиментологические доказательства осадочных обстановок для области и времени моделирования, учесть данные палеоклимата.

6. Если необходимо, проверить данные керна и каротажа на предмет определения направлений транспорта осадков и обстановок осадконакопления.

7. Определить точки входа осадков (руслы рек, береговая линия), рассчитать закон уплотнения, разуплотнить осадки.

8. Рассчитать модель с грубым разрешением.

9. Редактировать концептуальную модель и исходные данные до совпадения с исходными данными.

10. Определить критерии калибровки модели.

11. Перезапустить модель на детальной сетке несколько раз, пока не будет достигнута сходимость данных для тестовых скважин.

12. Подготовить карты необходимых параметров (фации, NG, пористость) и разрезы псевдоскважин.

Результаты моделирования и их обсуждение.

Для моделирования выбран профиль ION-11-4200, на котором хорошо видна геометрия и внутренняя структура верхнего клиноформенного комплекса. По профилю, сконвертированному в глубинный масштаб по данным скважин на шельфе Аляски [Mineral..., 2006], была прорисована подошва клиноформенного комплекса и проведена кривая миграции бровки клиноформы. Профиль подошвы клиноформного комплекса приподнят так, что-



Рис. 5. Кривая палеоглубин Северо-Чукотского бассейна, использованная для моделирования

бы глубина верхней части шельфа приближалась к 0, кривая миграция бровки клиноформенного комплекса была использована для построения кривой палеоглубин во времени. Возраст начала формирования комплекса — 34 млн лет, возраст окончания — 20 млн лет. При моделировании варьировались глубина, интенсивность сноса, соотношение глинистого и песчаного материала. Эти параметры подбирались таким образом, чтобы соблюдались следующие условия: полное заполнение пространства бассейна терригенным материалом за время формирования комплекса; проградационная форма комплекса, соответствующая сейсмической записи; соответствие акустически более жестких фрагментов сейсмической записи песчаным телам клиноформ. По окончании моделирования комплекса была внесена поправка на уплотнение пород с глубиной. Кривая палеоглубин с учетом кривой глобальных колебаний мирового океана [Наq, 1996], использованная для моделирования, показана на рис. 5. Результаты моделирования для 30 и 20 млн лет приведены на рис. 6.

Для трехмерного седиментационного моделирования использована поверхность подошвы верхнего клиноформного комплекса. Поверхность сконвертирована в масштаб глубин [Minerals..., 2006], введена поправка на уплотнение пород.

Поверхность приведена к положению начала осадконакопления: в юго-восточной части профиля расположен источник сноса (суша), на северо-востоке — некомпенсированный бассейн, глубина которого соответствует мощности клиноформенного комплекса. Использован график колебаний палеоглубин во времени по результатам двухмерного моделирования (рис. 5). Для модели использованы два источника сноса: южный, с направлением транспорта материала на север, и юго-восточный, с направлением транспорта материала на северо-запад. Расстояние между источниками — около 300 км.

При моделировании варьировались скорость течения потока в источнике сноса, объем флюида, концентрация обломочного материала в потоке. Эти параметры подбирались таким образом, чтобы выполнялись следующие условия: полное заполнение пространства бассейна терригенным материалом за время формирования комплекса, проградационная форма комплекса, трехмерная конфигурация внутренней структуры клиноформенных комплексов, видимых на сейсмических профилях (рис. 2).

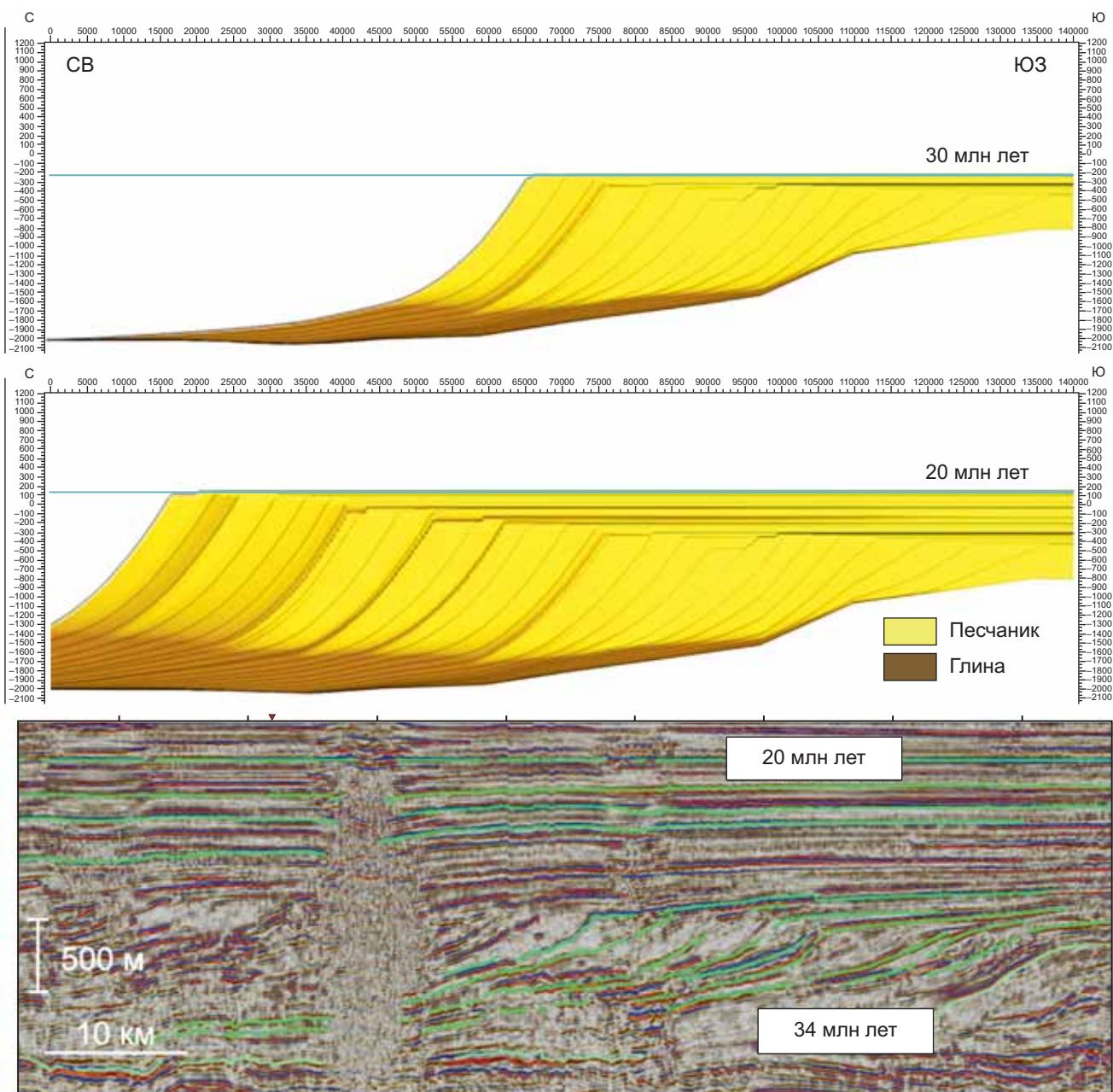


Рис. 6. Результаты двухмерного моделирования верхнего клиноформенного комплекса и фрагмент сейсмического профиля ION-11-4200. Профиль выровнен по поверхности кровли верхнего клиноформенного комплекса

Границные условия модели: скорость потока — 3 м/с, расход воды 3000 м³/сек, концентрация твердого осадка 0,1 кг/м³, соотношение фракций принято по среднему по скважинам на шельфе Аляски для эоцена — олигоцена [Minerals..., 2006]: 15% грубая, 20% крупная, 30% средняя, 35% тонкая. Такой расход воды соответствует современным рекам типа Колымы и Северной Двины [Михайлов, Добролюбов, 2017].

Результат моделирования показан на рис. 7. Как видно, за время с 34 до 20 млн лет все аккомодационное пространство заполняется осадками, в модели наблюдается проградация клиноформ на северо-восток, модель показывает наличие проградационного клиноформенного рисунка на перпендикулярных

сечениях, соответствующих сейсмическим профилям. Модель может быть использована для прогноза распространения коллекторов и построения региональных карт распределения фильтрационно-емкостных свойств.

Выводы. Впервые выполнено двухмерное и трехмерное седиментационное моделирование верхнего клиноформенного комплекса Северо-Чукотского бассейна.

Глубина моря при формировании верхнего клиноформного комплекса изменялась от -500 до 100 м.

Для формирования существующего рисунка осадочных комплексов необходимо минимум два источника осадочного материала, расположенных к югу и юго-западу от бассейна. Параметры источ-

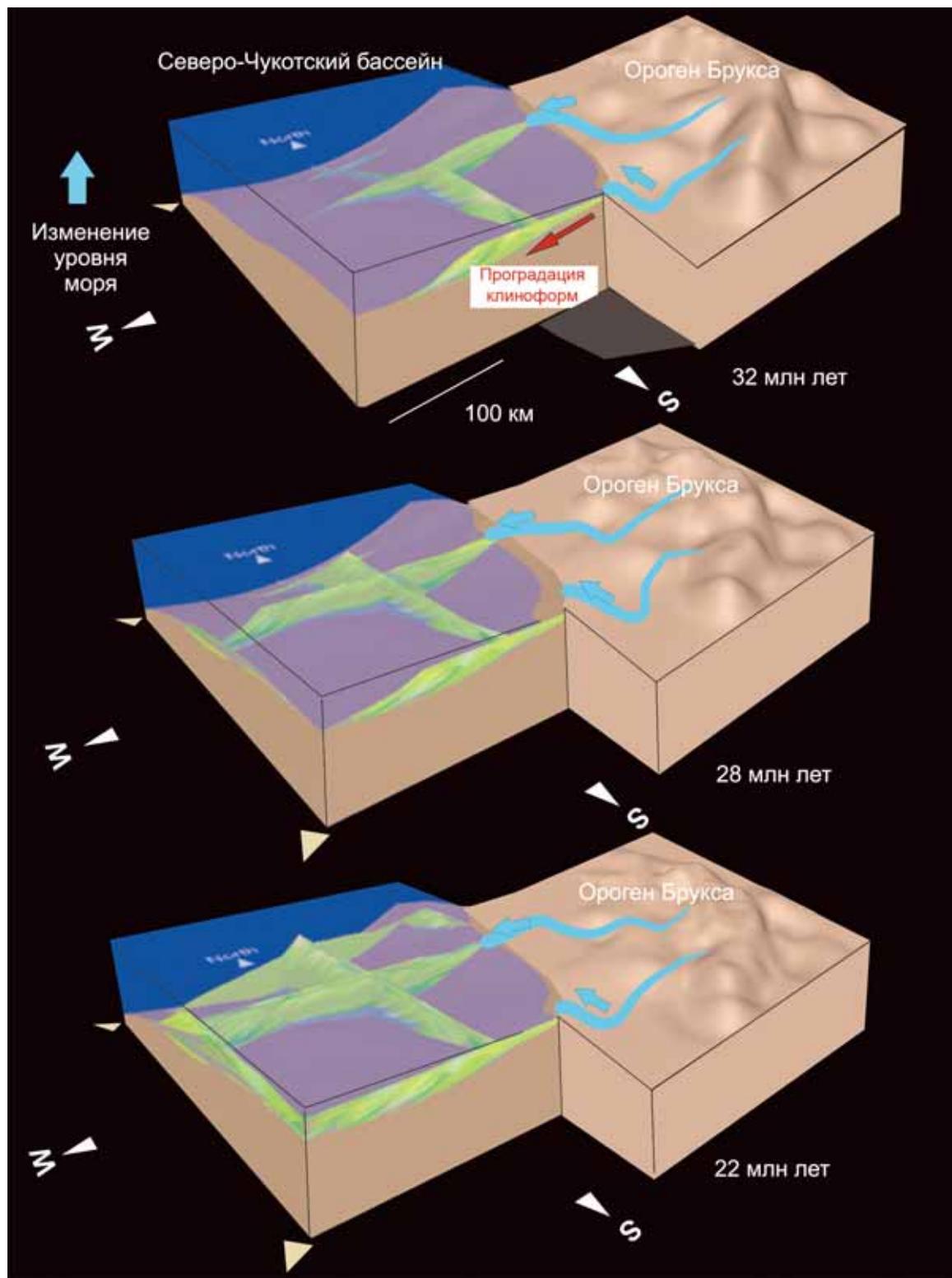


Рис. 7. Трехмерная модель осадконакопления Северо-Чукотского бассейна для моментов 32, 28, 22 млн лет. Гранулометрический состав осадков: желтый — грубозернистый, зеленый — крупнозернистый, светло-зеленый — мелкозернистый, серый — тонко-зернистый

ников сноса: скорость течения 3 м/с, расход воды 3000 м³/с, что соответствует современным рекам типа Колымы и Северной Двины.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-17-00020).

Благодарности. Авторы благодарят ООО «Лаборатория геологии» и CSIRO Petroleum за предоставленное для научных и образовательных целей ПО «Мазай» и SedSim. Авторы благодарят профессора А.М. Никишина за конструктивные замечания. Авторы благодарят Д.Н. Линева за помощь в работе с ПО «Мазай».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Линев Д.Н., Ериков А.В. Двухмерное моделирование накопления кластических клиноформенных комплексов в морских условиях // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 2. С. 11–14.
- Михайлов В.Н., Добролюбов С.А. Гидрология. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. 752 с.
- Никишин А.М., Петров Е.И., Старцева К.Ф. и др. Сейсмостратиграфия, палеогеография и палеотектоника Арктического глубоководного бассейна и его российских шельфов. М.: ГИН РАН, 2022. 156 с.
- Скарягин М.В., Ставицкая В.Н., Мазаева И.В. и др. Построение стратиграфического каркаса осадочного чехла Северо-Чукотского мегапрогиба на основе анализа траектории смещения кромки клиноформ в пространстве // Нефтяное хозяйство. 2020. № 11. С. 20–26.
- Фрейман С.И., Никишин А.М., Петров Е.И. Кайнозойские клиноформные комплексы и геологическая история северо-чукотского бассейна // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 4. С. 11–19.
- Craddock W.H., Moore T.E., O'Sullivan P.B., et al. Late Cretaceous — Cenozoic exhumation of the Western Brooks Range, Alaska, revealed from apatite and zircon fission track data // Tectonics. 2018. Vol. 37, No. 12. P. 4714–4751.
- Griffiths C., Dyt C. Stratigraphic forward modelling CSIRO Short Course. Kensington, 2012. 19 p.
- Kashubin S.N., Petrov O.V., Artemieva I.M., et al. Crustal structure of the Mendeleev Rise and the Chukchi Plateau (Arctic Ocean) along the Russian wide-angle and multichannel seismic reflection experiment — Arctic-2012 // J. Geodyn. 2018. Vol. 119. P. 107–122.
- 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>
- Moore T, Box S. Age, distribution and style of deformation in Alaska north of 60°N: Implications for assembly of Alaska Tectonophysics. 2016. Vol. 691. P. 133–170.
- Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S., et al. Arctic Ocean Mega Project: Paper 1 — Data collection // Earth -Sci. Rev. 2021. Vol. 217. 103559.
- Petrov O.V., Smelror M. (eds.). Tectonics of the Arctic. Springer Geology, 2021. 208 p.

Статья поступила в редакцию 11.09.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 25.01.2025