

DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-320-333

УДК 551.8

АНАЛИЗ КАЙНОЗОЙСКОЙ ЭРОЗИИ ОСАДОЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОСТОЧНО-БАРЕНЦЕВСКОГО МЕГАБАССЕЙНА С УЧЕТОМ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СИСТЕМ

Д. Ю. Голованов, О. В. Богоявленская, В. А. Никишин
ООО «РН-Шельф-Арктика»

Н. А. Малышев, В. Е. Вержбицкий, Д. К. Комиссаров
ПАО «НК «Роснефть»

Статья поступила в редакцию 15 июля 2022 г.

Представлены результаты палеореконструкции кайнозойского этапа развития Восточно-Баренцевского мегабассейна, выполненной с учетом последних представлений об обстановках осадконакопления, результатов трекового анализа апатитов и данных по отражательной способности витринита в комплексе с 3D термическим моделированием. Комплексный анализ всех материалов позволил уточнить прогноз величины кайнозойской эрозии в областях, где ранее применялась методика экстраполяции, а также высказать предположение о возможности осадконакопления в пределах Адмиралтейского мегавала в мел-палеогеновое время.

Ключевые слова: Восточно-Баренцевский шельф, мегабассейн, кайнозойская эрозия, бассейновое моделирование, трехмерное моделирование, углеводороды (УВ), отражательная способность витринита (ОСВ).

Введение

Проведение геолого-разведочных работ на шельфе арктических морей рискованно, высокозатратно и требует надежного обоснования выбора поисковых площадей и методов исследований. Одним из современных подходов к выполнению прогноза нефтегазоносности является использование современных технологий бассейнового моделирования углеводородных систем (УВС), позволяющих комплексовать широкий набор геолого-геофизических данных в региональном и субрегиональном масштабах. Трехмерное (3D) бассейновое моделирование в отличие от двухмерного (2D) моделирования позволяет корректно восстановить и откалибровать термический режим осадочного бассейна, учитывая объемное влияние неоднородностей ли-

тологического состава пород и, как следствие, оценить геотермический градиент.

По результатам региональной оценки перспектив нефтегазоносности Восточно-Баренцевского мегабассейна с учетом обобщения большей части доступных данных исследований прошлых лет авторами была создана 3D модель формирования УВС. Один из важных этапов моделирования — реконструкция термической истории бассейна с контролем полученных модельных трендов пластовых температур и значений отражательной способности витринита (ОСВ) по фактическим данным. С учетом данных по ОСВ крайне важно корректно восстановить пространственно-временные характеристики эрозионных процессов (как индикатора вертикальных тектонических движений).

Признаки кайнозойской эрозии в Баренцевоморском регионе очевидны и зафиксированы многими геолого-геофизическими методами. Одна из пер-

© Голованов Д. Ю., Богоявленская О. В., Никишин В. А.,
Малышев Н. А., Вержбицкий В. Е., Комиссаров Д. К., 2022

вых оценок величины эродированной части разреза (мощности эродированных отложений) представлено в работе Е. Ф. Безматерных в 1993 г. [1]. За последние 20 лет изучением кайнозойской фазы эрозии занимались Е. Henriksen с соавторами, В. Cramer, А. В. Соловьев, П. О. Соболев и ряд других авторов, в работах которых [2—7] опубликованы различные вариации оценки масштабов эрозии — от первых сотен метров в Южно-Баренцевской впадине до двух километров и более в северной части Баренцева моря. При этом величины эрозии сильно варьируются для одних и тех же тектонических элементов (от минимальных 200 м в районе Штокмановско-Лунинского порога до 1000 м в пределах Адмиралтейского поднятия). Такая неопределенность одного из ключевых параметров, влияющих на оценку интенсивности новейших тектонических движений в регионе, степень уплотнения горных пород и катагенетическую зональность в разрезе, поставила перед авторами настоящей статьи задачу комплексной переоценки времени и величины эрозионного среза осадочных пород в процессе выполнения 3D моделирования УВС и прогноза нефтегазового потенциала региона.

Исследования проводились с учетом обобщения результатов работ прошлых лет, в том числе оценок экзарации, связанной с позднекайнозойским-плиоцен-плейстоценовым оледенением (около 2,7 млн лет). Отличительной чертой этих исследований является комплексирование геоморфологических, литолого-фациальных, геохимических и геотермических методов в процессе построения трехмерной бассейновой модели. Благодаря применению такого комплекса методов удалось увязать между собой геологические данные (структурные карты и карты мощности выделяемых комплексов пород, литологический состав отложений и др.), результаты петрофизических (тренд уплотнения, коэффициенты пористости) и геохимических исследований (ОСВ, T_{max} , температурный градиент) и в конечном счете существенно уточнить значения мощности эродированных отложений.

Методология

В российской части Баренцева моря геолого-геофизические исследования ведутся на протяжении многих десятков лет, однако палеоструктурные реконструкции, приводимые в опубликованных работах ряда исследователей, выполнялись в основном по нескольким отдельным сейсмическим профилям и дополнялись лишь одно- (1D) и двухмерным (2D) моделированием.

Данная работа выполнена на основе обобщения в масштабе единой физико-математической модели выполненных авторами детальных геоморфологических реконструкций (с учетом последних представлений об обстановках осадконакопления), тренового анализа апатитов и выполнения 3D термического моделирования.

Детальный структурный каркас для трехмерной модели региона, созданный благодаря региональной интерпретации сейсмических данных и построению 16 поверхностей, отвечающих основным стратиграфическим границам (акустического фундамента — AF и осадочного чехла: C_{1v} , P_2 , 1 и 5 секвенции T_{1i} , T_{1o} , T_{2l} , T_{3l} , J_{1-2} , J_{2a} , J_{2bt} , J_3 , ВСУ, K_{1nc-1} , K_{1nc-2} , поверхность дна моря) для площади более 770 тыс. км², позволил провести восстановление тектонической истории развития мегабассейна на различных ее этапах. В мезозойско-кайнозойской истории развития Восточно-Баренцевского мегабассейна всеми геолого-геофизическими методами зафиксировано несколько фаз тектонической перестройки и связанных с ними эпизодов эрозии (предтриасовая, предсреднеюрская, предмеловая, предаптская и кайнозойская фазы эрозии). В данной работе внимание сконцентрировано на реконструкции величины эрозии кайнозойского этапа развития как наиболее важного для оценки рисков, связанных с негативными последствиями структурообразования для работы УВС бассейна.

Первой итерацией оценки величины кайнозойской эрозии стало выполнение детальных геоморфологических реконструкций с использованием сейсмогеологических данных. Однако с учетом низкой и неравномерной плотности сейсмических данных в регионе такая оценка имеет наибольшую степень неопределенности.

Для повышения степени достоверности прогноза в модель были включены результаты литолого-фациальных реконструкций, призванные, с одной стороны, учесть положение и объем породных комплексов различного состава, их физико-механические свойства, а с другой — контролировать характер изменения состава и мощностей породных ассоциаций в зависимости от геоморфологии бассейна. Контроль и детализация литологического наполнения модели осуществлялся с использованием скважинных данных. Там, где это представлялось необходимым и возможным, проводилось дополнительное стратиграфическое расчленение для корректного воспроизведения неоднородностей разреза. Следует отметить, что также учитывались положение в разрезе гипабиссальных интрузий и время их внедрения во вмещающие толщи.

Минимальную погрешность (до 150 м) допускает методика реконструкции величины эрозии [2], основанная на анализе тренда уплотнения пород (анализ изменения по разрезу значений пористости, данных каротажа и сейсмических скоростей). Однако проведение таких видов анализа для всего Восточно-Баренцевского региона затруднительно в связи с ограниченным набором данных, а также с необходимостью учета существенного влияния процессов магматизма на наиболее мощный триасовый интервал разреза осадочных пород.

Выполненное детальное литологическое расчленение разреза позволило максимально корректно

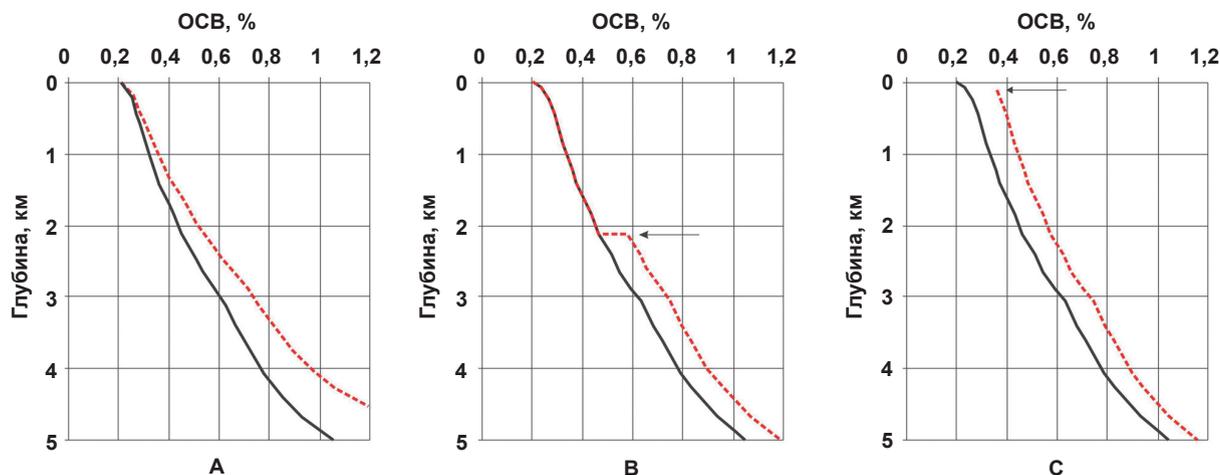


Рис. 1. Примеры изменения вида кривой ОСВ от скорости осадконакопления, величины теплового потока или наличия катагенетического несогласия в разрезе осадочного чехла. Условные обозначения: черные линии – кривые изменения ОСВ с глубиной при постоянном равномерном погружении, красные линии – кривые изменения ОСВ с глубиной при увеличении скорости осадконакопления (А), при наличии катагенетического несогласия в середине разреза (Б) и в верхней части разреза (В), стрелка – катагенетическое несогласие

Fig. 1. Examples of changes in the vitrinite reflectance curve depending on the sedimentation rate, the value of the heat flow, or the presence of catagenetic unconformity. Symbols: black lines – vitrinite reflectance curves in basin with constant subsidence, red line – vitrinite reflectance curves in case of an increase in the rate of sedimentation (A), in basins with catagenetic unconformity in the middle section (B) and in the upper part of the section (B), arrow – position of the catagenetic unconformity

учесть величину дополнительного теплового потока за счет распада радиоактивных элементов пород и обеспечило высокую достоверность выполненных тепловых реконструкций.

Базовая термическая модель основана на имеющихся к настоящему времени представлениях об истории геологического развития бассейна и учитывает этапы регионального повышения теплового потока во время проявления магматизма. Значения палеотеплового потока как наиболее неопределенного входного параметра устанавливались при калибровке тепловой истории бассейна по рассчитанным в модели и замеренным в разрезах скважин значениям ОСВ. Оценка погрешности данного метода при реконструкции величины эрозии — до 220 м [2].

Показатель ОСВ пропорционален интенсивности катагенетического процесса, реализуемого в органическом веществе (ОВ) по угольному циклу. При увеличении/уменьшении скорости осадконакопления или величины палеотеплового потока изменяется угол наклона кривой ОСВ (рис. 1А). Увеличение/уменьшение величины эрозии проявляется в смещении модельной кривой ОСВ, которая в данном случае будет соответствовать максимальной глубине погружения пород всего разреза до начала эрозионных процессов. При этом в зависимости от геологической истории региона катагенетическое несогласие на кривой ОСВ может проявиться в виде ступени на границе несогласия (рис. 1Б), что связано со сменой эрозионной фазы дальнейшим процессом осадконакопления. Оно может также проявиться в смещении всей кривой относительно начального значения ОСВ, равного 0,2—0,25% (лабораторный минимум) (рис. 1В). Последний вариант является

результатом проявления процесса эрозионного срезания на поздних стадиях развития осадочного бассейна, наблюдаемого в Баренцевоморском регионе.

Ограничением метода является необратимость величины ОСВ, которая увеличивается только при возрастании температуры как функции погружения или возросшего теплового потока, а при их снижении сохраняет максимально достигнутый уровень. При любых последующих инверсиях тектонических движений величина ОСВ остается неизменной. Если же при последующем осадконакоплении отложения претерпевают большее погружение или прогрев (например, под действием внедрения интрузий), то по ОСВ невозможно будет восстановить предшествующую тепловую историю бассейна [8].

За последние годы база геологической информации по данному региону значительно пополнилась замерами ОСВ, результатами геохимических исследований и трекового анализа апатитов. База данных ОСВ, в том числе и по опубликованным материалам, формировалась авторами настоящей статьи с 2010—2011 гг. и продолжает пополняться в настоящее время. В 2017 г. благодаря исследованиям специалистов ООО «РН-Шельф-Арктика» база пополнилась 75 замерами по разрезам скважин Адмиралтейской, Крестовой, Ледовой, Ферсмановской и Северо-Мурманской площадей и на момент выполнения реконструкций включала 136 замеров по разрезам 12 скважин. Таким образом, имеющийся на сегодня объем информации по Восточно-Баренцевскому мегапрогибу является вполне достаточным для регионального 3D моделирования термической истории бассейна. Этому способствует также усовершенствование за последние годы тех-

нических возможностей программных комплексов для проведения бассейнового моделирования на больших площадях.

База данных замеров ОСВ в породах различного возраста, формировавшаяся в течение длительного времени, позволила надежно оценить тренды изменения ОСВ с глубиной залегания отложений и влияние на них глубинного теплового потока и эрозионной деятельности. Выполненные оценки дополнительно контролировались данными трекового анализа апатитов, выполненного различными исследователями в предыдущие годы.

Методический подход авторов настоящих исследований заключался в итерационном построении термической модели, при котором значения ОСВ в местах расположения скважин использовались в качестве одного из основных параметров контроля палеотемпературных условий погружения осадочной толщи. Для калибровки тепловой модели на скважинные данные схемы реконструкции величины эрозии итерационно перестраивались и заново погружались в модель. Контроль достоверности осуществлялся также с учетом анализа тренда изменения значений пористости пород в разрезах скважин, в районе которых осуществлялась коррекция изменения палеотолщин осадочных пород и величины погружения в модели.

Результаты исследований

Мезозойско-кайнозойские этапы развития бассейна

К концу пермского — началу триасового времени в исследуемом регионе можно выделить две фациальные зоны: шельфовую мелководно-морскую в пределах Печорского моря и глубоководную (глубины палеобассейна оцениваются в 1—2 км) с некомпенсированным осадконакоплением в пределах современного Восточно-Баренцевского мегапрогиба. С востока палеобассейн граничил через серию предгорных прогибов с системой позднепалеозойских орогенных поднятий (Байдарацкого, Северо-Таймырского и др.).

К началу триаса унаследованный глубоководный бассейн начал заполняться осадками (прежде всего со стороны растущего уральского орогена). На территории современных Западной и Восточной Сибири и Таймыра господствовала суша с развитой речной системой, которая также поставляла обломочный материал в Восточно-Баренцевский палеобассейн. С территории Русской платформы осадки практически не поступали за исключением лишь Балтийского щита как второстепенного источника сноса [9; 10]. Это также подтверждается результатами лабораторно-аналитических исследований, проведенных ПАО «НК «Роснефть». Приблизительно в индское время палеобассейн (его глубины оцениваются в 1—2 км) заполнился огромным количеством обломочного материала. Примерно с середины индского века бассейн осадконакопления мелел (палеоглубины оцениваются в 200—300 м), и в нем начали

формироваться клиноформные комплексы. В пределах палеобассейна в большей степени отмечается проградация клиноформ в западном направлении от современных архипелага Новая Земля и полуострова Таймыр и в меньшей степени фиксируется проградация клиноформ в северном направлении от современного Балтийского щита. В среднем и поздне триасе территория современного Восточно-Баренцевского мегапрогиба представляла собой обширную аллювиально-дельтовую равнину, при этом морские обстановки осадконакопления отмечались западнее, в пределах норвежской части Баренцева моря. Анализ толщин отложений верхнего триаса показывает их увеличение вдоль Южного острова архипелага Новая Земля, что, вероятно, связано с формированием в это время предгорного прогиба. Одновременно с этим уменьшение толщин отмечается в пределах Федынского поднятия и Варнекского выступа. Таким образом, условно для среднего-позднего триаса в Баренцевоморском регионе можно выделить эпизод проявления разнонаправленных вертикальных тектонических движений.

В юрское время в пределах Восточно-Баренцевского мегабассейна в целом сохранялись относительно стабильные палеогеографические обстановки. Так, в ранней юре преобладали континентальные и мелководно-морские условия осадконакопления. Система палеоподнятий на месте современных Урала, Новой Земли и Таймыра в юре испытывала воздымание и подвергалась процессам эрозии. Севернее архипелага Земля Франца-Иосифа предположительно могло существовать палеоподнятие, включавшее в том числе и современный хребет Ломоносова (суша Крокерлэнд). В раннеюрское время отмечается важный этап вертикальных движений и связанная с ним фаза эрозии по периферии Восточно-Баренцевского мегабассейна (в бортовых частях современных прогиба Фобос и Южно-Баренцевской впадины). Это событие пока плохо датировано. Мы условно считаем его предааленским, так как отложения средней юры перекрывают относительно приподнятые участки антиклинальной природы по периферии Восточно-Баренцевского мегабассейна. Скорее всего, данное событие связано с тектоническими деформациями и формированием Пайхойско-Новоземельской и Таймырской складчатых областей. В позднеюрское время большая часть Восточно-Баренцевского мегапрогиба и территория Русской платформы были покрыты шельфовым морем.

На рубеже юры и мела локально отмечается разрыв верхнеюрских отложений, проявившийся в основном в северной части Восточно-Баренцевского мегапрогиба. В целом для раннемелового (доаптического) этапа характерны колебания относительного уровня моря с формированием клиноформного комплекса отложений. При этом депоцентр осадконакопления сместился в крайнюю западную часть мегапрогиба, остальная часть территории представляла

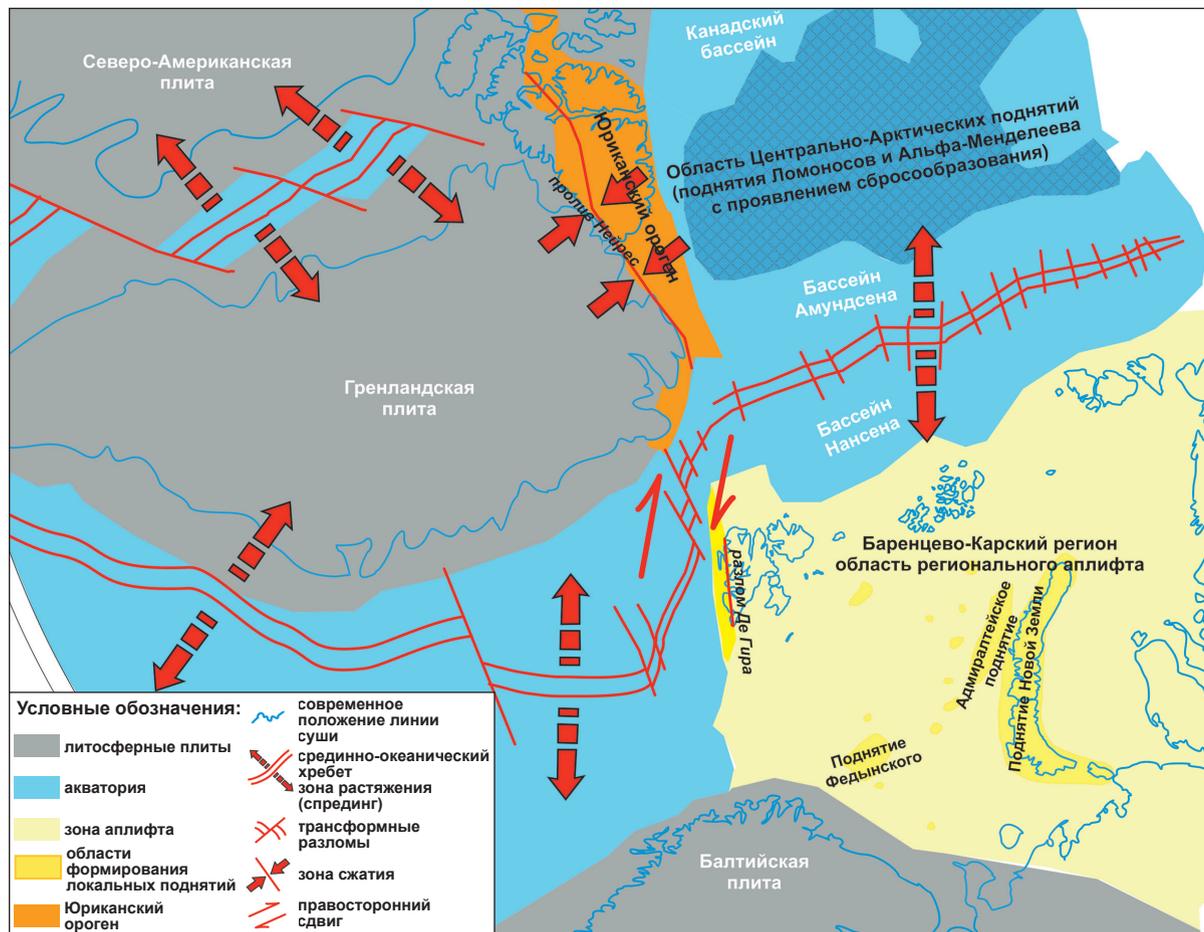


Рис. 2. Схема палеотектонической реконструкции на второй этап юриканской орогении (47–34 млн лет) на современной географической основе с использованием данных [12; 14]
 Fig. 2. Scheme of paleotectonic reconstruction for the second stage of the Eureka Orogeny (47–34 Ma) on a modern geographical basis using the data of 12; 14]

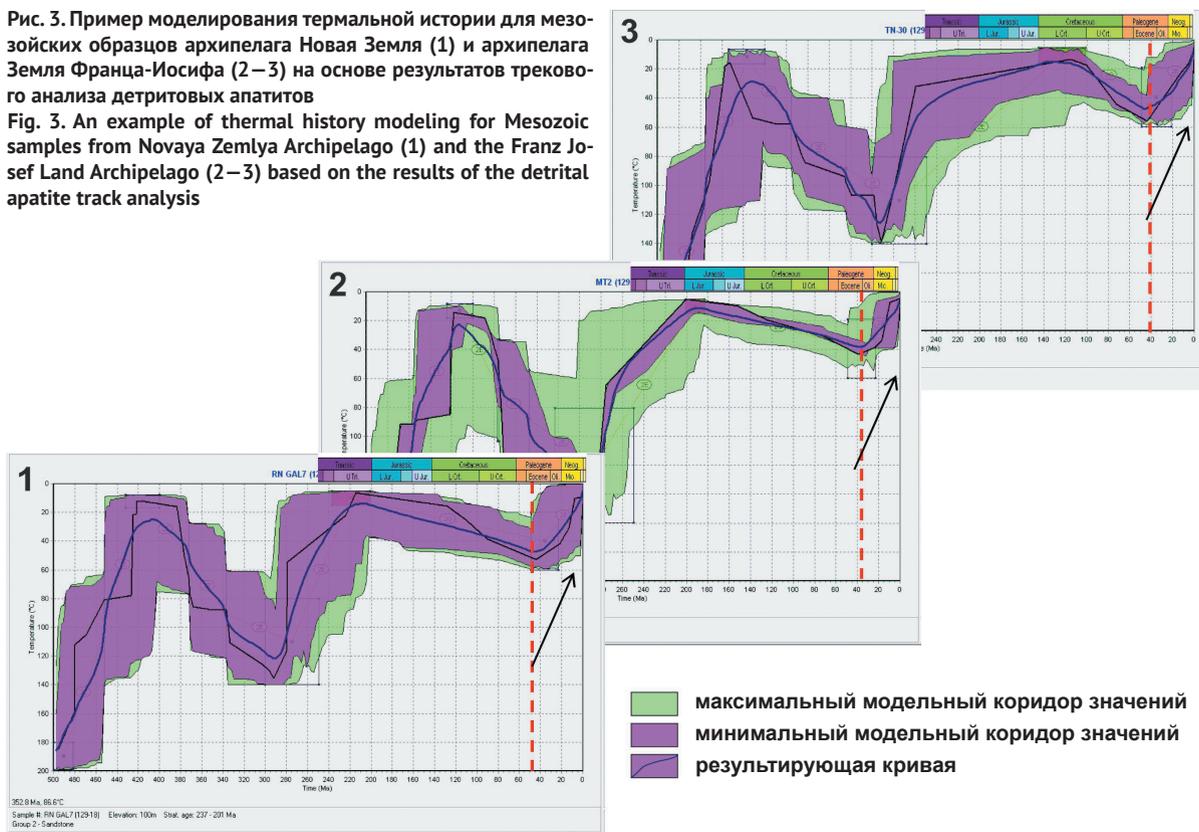
собой обширную аллювиальную равнину. Система орогенных сооружений Урал — Новая Земля — Таймыр представляла собой область размыва и сноса обломочного материала. Поступление осадков отмечается частично и с Балтийского щита. Масштабная фаза эрозии выделяется условно на рубеже баррема и апта преимущественно в северо-восточной части Восточно-Баренцево-Карского палеобассейна. Скорее всего, это событие связано с отголосками верхоянской фазы складчатости на Чукотке, Таймыре, Новосибирских островах и в Верхоянье. Отложения апт-альба и верхнего мела представлены континентальными и мелководно-морскими отложениями.

В мезозойское и кайнозойское время Восточно-Баренцево-Карский мегабассейн был подвержен нескольким фазам тектонической перестройки и связанным с ними эпизодами эрозии. Наиболее значительные деформации, которым подверглись почти все известные поднятия в пределах Баренцево-Карского региона, были связаны предположительно с тектоническими движениями Гренландской плиты в кайнозойское время.

Начало раскрытия Северной Атлантики вследствие подъема мантийного плюма и формирования зон спрединга вызвало перемещение Гренландской плиты в северном направлении (рис. 2). Время проявления процессов сжатия, происходивших в эоценовую эпоху вдоль северной части Северной Америки и западной части Баренцево-Карского шельфа, отвечает юриканской орогении («Eureka Orogeny» по R. Thorsteinsson и E. T. Tozer [11]). Наиболее значительным деформациям были подвержены острова Королевы Елизаветы Канадского Арктического архипелага, северная и северо-восточная окраины Гренландии, а также западное побережье и центральная часть архипелага Шпицберген. K. Piejohn, W. von Gosen и F. Tessensohn выделяют два основных этапа юриканской орогении [12]. Первый (53—47 млн лет) характеризуется формированием Гренландии как самостоятельной литосферной плиты, окруженной зонами спрединга, и ее вращением против часовой стрелки, что привело к сжатию вдоль западного побережья Шпицбергена. В конце этого этапа и в начале следующего произошла смена на-

Рис. 3. Пример моделирования термальной истории для мезозойских образцов архипелага Новая Земля (1) и архипелага Земля Франца-Иосифа (2–3) на основе результатов трекового анализа детритивных апатитов

Fig. 3. An example of thermal history modeling for Mesozoic samples from Novaya Zemlya Archipelago (1) and the Franz Josef Land Archipelago (2–3) based on the results of the detrital apatite track analysis



правления дрейфа Гренландии к северо-западу. Это вызвало сжатие в проливе Нейрес и правосторонний сдвиг вдоль зоны разлома Де Гира между северо-восточной Гренландией и Шпицбергенем, проходившие в течение второго этапа (с 47 до 34 млн лет). Перемещение Гренландии в северном направлении закончилось около 35—33 млн лет назад [13].

В настоящее время нет достоверных данных о процессах осадконакопления в эоцене в пределах Восточно-Баренцевского мегабассейна [15]. Морские отложения известны только в пределах западной части Баренцевоморского шельфа [16]. Интерпретация сейсмических данных позволяет оценить время окончательного этапа формирования основных крупных поднятий Баренцева моря, таких как Штокмановское, Федынское и Адмиралтейское, в период между мелом и неогеном. По последним опубликованным реконструкциям [14] региональное воздымание началось с конца эоцена и протекало в олигоцене-неогене. По сейсмическим данным в бассейне Нансена на одном из профилей выделяется антиклиналь (Eureka-FJL [14]), время формирования которой можно датировать по магнитным аномалиям в интервале 50—34 млн лет. По результатам трекового анализа апатитов из триаснижнемеловых образцов пород в скважине Ферсмановская-1 [4] начало воздымания Ферсмановского поднятия относится к палеоцену (60 млн лет). По имеющимся на сегодня результатам трекового анализа апатитов из образцов мезозойских пород, ото-

бранных в ходе геологических экспедиций на территории архипелага Земля Франца-Иосифа, подъем территории начался около 40—35 млн лет назад (рис. 3). Все это не противоречит выделяемому около 45 млн лет интенсивному этапу сжатия в регионе в течение юриканской фазы орогении [14].

Следует отметить, что оценки масштабов кайнозойской эрозии пород, приводимые в [4] и работах ряда других исследователей, включают, вероятно, также величину позднекайнозойской (плиоцен-плейстоценовой, примерно 2,7 млн лет) ледниковой эрозии, которую в настоящее время не представляется возможным выделить отдельно. По опубликованным расчетам, проведенным методом массового баланса, эта величина оценивается в среднем около 410—650 м [16]. Данные цифры отражают возможные толщины эродированных пород, поступивших в Северный Ледовитый океан с северо-западного шельфа Баренцева моря.

Восстановление модели теплового потока

Известно, что интенсивность теплового потока в недрах непостоянна. Она изменяется как во времени, так и в пространстве и является основным параметром оценки геотермического режима. При моделировании последнего в исследуемом регионе имеется возможность учета фактических замеров температур и плотности теплового потока (ПТП). Для реконструкции тепловой истории нами выполнялся прогноз палеотеплового режима на

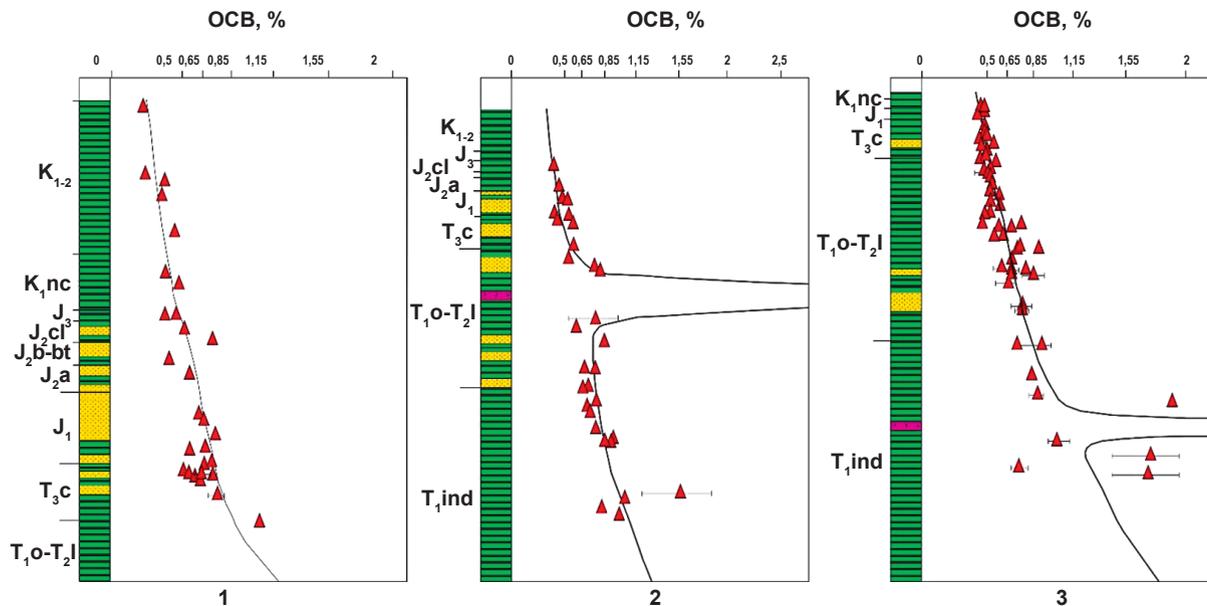


Рис. 4. График калибровки фактических замеров ОСВ с глубиной и модельной кривой изменения ОСВ с глубиной для Арктической-1 (1), Северо-Кильдинской (2) и Крестовой (3) площадей
 Fig. 4. Calibration of the vitrinite-reflectance (VR) measurement data (red triangles) and simulation results of Arkticheskaya-1 (1), Severo-Kildinskaya (2) and Krestovaya (3) areas

основные этапы геологической истории развития региона, базирующийся на методе аналогий с современными величинами ПТП в областях с различным геодинамическим режимом (в том числе на примере современных бассейнов), и последующей калибровке прогноза тепловой истории на данных по ОСВ. Однако выполнение палеотермических реконструкций в Баренцевоморском регионе осложняет тот факт, что имеющиеся замеры ОСВ характеризуют величину ПТП на время максимального погружения отложений, т. е. на этап, предшествующий началу юриканской фазы воздымания и эрозии. Только по разрезу скважины Арктическая-1 представляется возможным выполнить оценку палеотеплового потока, так как для этой площади влияние кайнозойской эрозии было минимальным или отсутствовало.

Графики изменения ОСВ с глубиной в большинстве разрезов скважин Восточно-Баренцевого шельфа являются линейными. О проявлении кайнозойской эрозии можно судить по отклонению линии тренда ОСВ в верхней части разреза от минимальных лабораторных значений. Другие резкие катагенетические несогласия в разрезе, связанные с более ранними фазами эрозии, не выделяются, что свидетельствует о максимальных глубинах погружения осадочных толщ в этап, предшествующий последней стадии воздымания и эрозии.

Величина ОСВ в образцах, отобранных в разрезе скважины Арктическая-1 на глубине около 1—1,2 км, равна 0,25—0,36% (рис. 4.1). В то же время для Штокмановской и Ледовой площадей на такой же глубине значения ОСВ составляют около

0,3%, для Северо-Кильдинской (рис. 4.2), Лудловской и Ферсмановской площадей — около 0,4%, а для Крестовой площади (рис. 4.3) — больше 0,5%. Такие различия в значениях ОСВ на небольших глубинах являются следствием разномасштабного влияния эрозионной деятельности. Реконструкция термического режима недр, выполненная с учетом имеющихся неоднозначностей прогнозируемых значений ПТП, способствовала более корректному восстановлению угла наклона смоделированного тренда ОСВ, изменения которого становятся более выраженными с увеличением глубины.

Моделирование процессов магматической деятельности, проявившейся в виде внедрения интрузивных тел, показано нами на примере Северо-Кильдинской площади. Здесь на кривой ОСВ в разрезе отмечается резкое катагенетическое несогласие, отражающее непосредственное пересечение осадочных пород интрузией (интрузиями) и увеличение степени катагенеза отложений на 2—4 стадии по сравнению с начальной. На небольших глубинах на величину модельной кривой ОСВ помимо эрозионной деятельности влияют также значения палеопридонной температуры, однако вариативность в 1—5° не проявляется от площади к площади столь значительно. Величины эрозии, полученные по результатам калибровки в верхней части графиков ОСВ, варьируют от 0 м на Арктической до 400—600 м на Ледовой и Штокмановской, до 700—750 м на Лудловской и Северо-Кильдинской и около 1780 м на Крестовой площадях, что было учтено нами при площадных палеоструктурных реконструкциях масштабов эрозии (рис. 5).

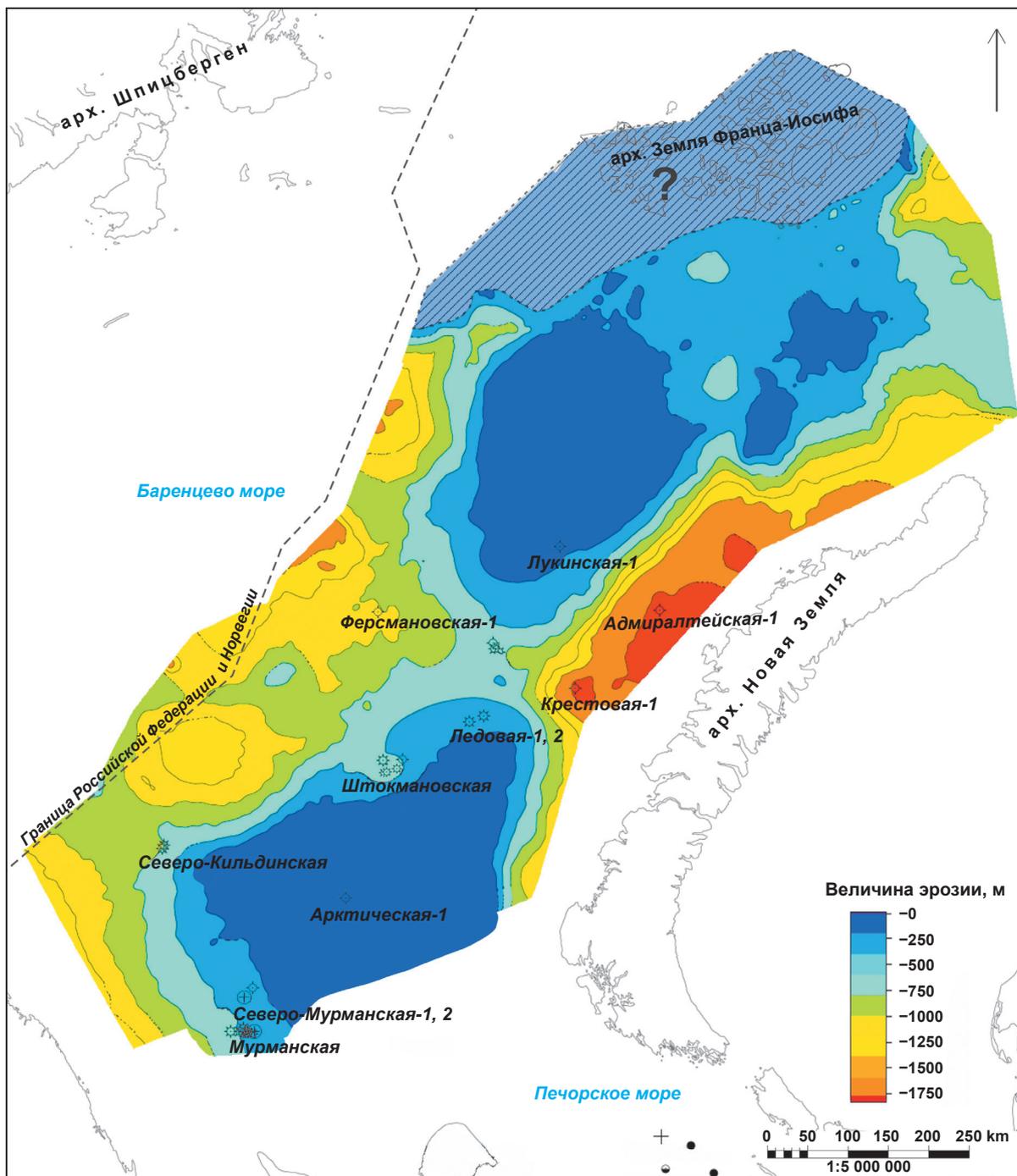


Рис. 5. Схематическая карта эродированных толщин пород в результате кайнозойской региональной эрозии
 Fig. 5. Schematic map of eroded thicknesses of the Cenozoic regional erosion

Анализ эродированных толщин пород

По результатам комплексного анализа имеющегося на сегодняшний день объема геолого-геофизических данных нами построена схематическая карта величины кайнозойской эрозии (см. рис. 5). Наименьшая неопределенность в оценке величин эрозии получена для центральной и южной частей исследуемого региона, где расположено большинство скважин и имеется достаточный объем факти-

ческого материала. Наибольшая неопределенность связана с Северо-Баренцевской впадиной, где отсутствуют данные ОСВ. Анализ результатов реконструкций мощности эродированных пород в местах расположения скважин показывает значительную неоднородность полученных значений в пределах исследуемой площади. В ходе реконструкций нами учитывался тот факт, что значения величины эрозии,

Таблица 1. Анализ величины регионального кайнозойского воздымания и эрозии (м) по данным [2—5, 17] и по расчетам авторов

Источник	Южно-Баренцевская впадина			Штокмановско-Лунинский порог	Северо-Баренцевская впадина		Адмиралтейский мегавал	
	Северо-Кильдинское месторождение	Мурманское месторождение	Арктическая площадь	Штокмановское месторождение	Ледовое месторождение	Лудловское месторождение	Крестовая площадь	Адмиралтейская площадь
Dimakis et al., 1998 [17]	600	450	700	400	500	500	700	1400
Henriksen et al., 2011 [2]	1400	850	350	600	800	700	1250	1450
Соболев, Крамер и др., 2009 [3]	400—700	400—700	700—1000	400—700	> 1000	> 1000	> 1000	—
Соболев, 2011 [5]	~ 500	—	< 250	~ 750	—	~ 750	—	—
Sobolev, Soloviev, 2013 [4]	940	670	500	505	655	845	—	—
Реконструкции авторов, 2018—2020 гг.	750	400	~0	600	400	700	~ 1780	~ 1800
Отличие расчетов авторов от величин предыдущих оценок	От +47 до -86%	От 0 до -113%	Кардинально	От +33 до -25%	От -25 до -150%	От +29 до -43%	От +61 до +30%	От +22 до +19%

полученные по ОСВ, некорректно распространять методом экстраполяции, так как почти все имеющиеся данные соответствуют разрезам скважин, пробуренных на локальных поднятиях, где влияние эрозии проявилось в больших масштабах.

Сопоставление результатов оценки величины регионального кайнозойского воздымания и эрозии (табл. 1) показало значительные расхождения у разных авторов [2—5; 17], что может быть связано как с разным объемом имеющейся информации, так и с различиями применяемых методик.

Обсуждение результатов

Сопоставление полученных нами величин регионального кайнозойского воздымания и эрозии с расчетами и построениями других авторов [2—5; 17] позволило выявить ряд значительных отличий (см. табл. 1).

Был выполнен сравнительный анализ результатов оценок масштаба региональной кайнозойской эрозии для 8 площадей/месторождений, на которых пробурены поисковые и разведочные скважины (рис. 6). Наименьшие отличия отмечаются для Штокмановского (от +33% от минимального до -25% от максимального) и Лудловского (от +29 до -43%) месторождений, а также для Адмиралтейской площади (от +22 до +19%). Это, возможно, обусловлено наибольшей степенью изученности месторождений сейсморазведкой и бурением: Штокмановское — 7 скважин (две с данными ОСВ), Лудловское — 3 скважины (одна с ОСВ). Вместе с тем на хорошо изученном бурением Мурманском месторождении (9 скважин, из которых две с данными ОСВ) разница в оценках составила от 0 до -113%, а на Северо-Кильдинском месторождении (3 скважины, из них одна с ОСВ) — от +47 до -86% от предыдущих оценок.

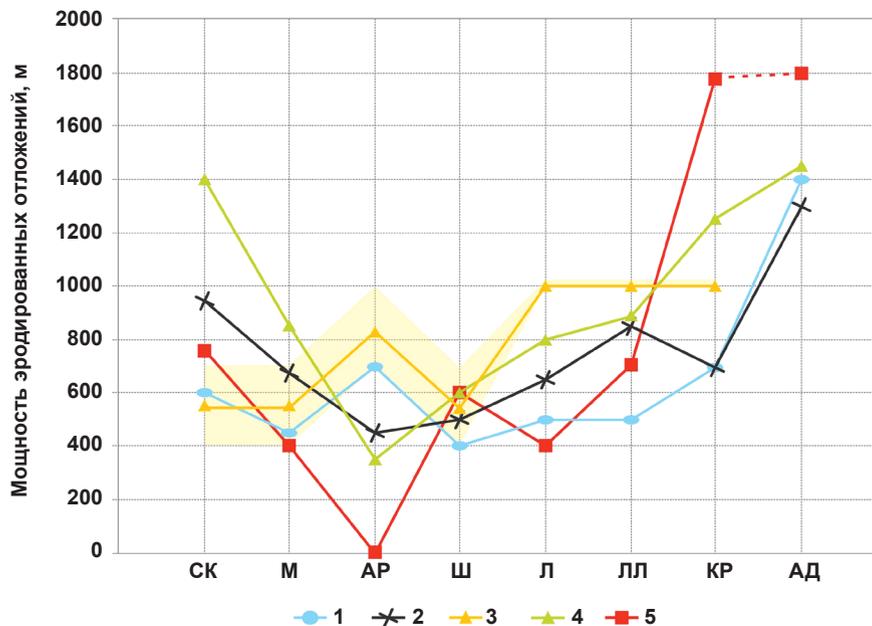


Рис. 6. Сравнение результатов восстановления величины кайнозойской эрозии для Баренцевоморского региона: 1 – [17], 2 – [2], 3 – [3], 4 – [4], 5 – расчеты авторов. Обозначения: СК – Северо-Кильдинское месторождение, М – Мурманское месторождение, АР – Арктическая площадь, Ш – Штокмановское месторождение, Л – Ледовое месторождение, ЛЛ – Лудловское месторождение, КР – Крестовая площадь, АД – Адмиралтейская площадь

Fig. 4. Uncertainty analysis of the Cenozoic erosion reconstructions for the Barents Sea region based on published data: 1 – [17], 2 – [2], 3 – [3], 4 – [4], 5 – reconstruction by the authors. Symbols: СК – Severo-Kildinskoe field, М – Murmanskoe field, АР – Arkticheskaya area, Ш – Shtokman field, Л – Ledovoye field, ЛЛ – Ludlovskoye field, КР – Krestovaya area, АД – Admiralteyskaya area

Наибольшие отличия величин эрозии установлены для Арктической и Крестовой площадей. Это связано, по нашему мнению, с несколькими факторами. На кривых ОСВ в верхней части разреза сложно однозначно восстановить угол наклона кривой без учета результатов трехмерных реконструкций термического режима, которые учитывают скорость осадконакопления и изменения теплового режима (рис. 1В). Так, при продлении тренда до начального значения ОСВ 0,2% отмечается существенная вариативность в оценке величины эродированных отложений. Кроме того, вместо использования замеров по ОСВ ввиду их небольшого количества многие исследователи учитывают значения, пересчитанные из замеров других мацералов или битуминитов ОВ пород. Часто это связано с использованием данных из открытых опубликованных источников, в которых обычно не указывается, каким именно образом был получен тот или иной замер.

Для Арктической площади ранее опубликованные оценки варьируют от 700–1000 м [3] до менее 250 м [5]. По результатам проведенного анализа и реконструкций отмечается вероятное отсутствие или очень незначительное проявление эрозионной деятельности в пределах центральной части Южно-Баренцевской впадины. Здесь в разрезе скважины Арктическая-1 имеется достаточное количество данных по ОСВ (28 замеров), что позволяет

относительно корректно построить линию изменения тренда и откалибровать на нее термическую модель.

Реконструкция величины эрозии на Адмиралтейской площади проведена на основе геометрических построений от Крестовой площади, где имеется более 40 замеров ОСВ, собранных из различных источников. Это связано с вероятной некондиционностью данных ОСВ в породах скважины Адмиралтейская-1, где в интервале разреза около 2,5 км имеющиеся значения хаотично варьируются от 0,6% до 1%, что не позволяет построить линию тренда изменения ОСВ с глубиной. В пределах Крестовой площади оценки величины эрозии по разным источникам также изменяются в широких пределах (от 700 до более 1000 м), что на 38–55% (1800 м) меньше нашей оценки. В процессе восстановления величины эродированных отложений в пределах Адмиралтейского мегавала нами были проанализированы опубликованные данные об обстановках осадконакопления в меловое время и использованы имеющиеся сейсмические данные. По результатам предшествующих палеореконов [15; 18] на протяжении практически всего мелового периода (с валанжинского века) территория Адмиралтейского мегавала являлась приподнятой, и в ее пределах осадконакопление отсутствовало. В Баренцевом море осадконакопление в незначительных масштабах продолжалось лишь в депоцентрах — в Южно-

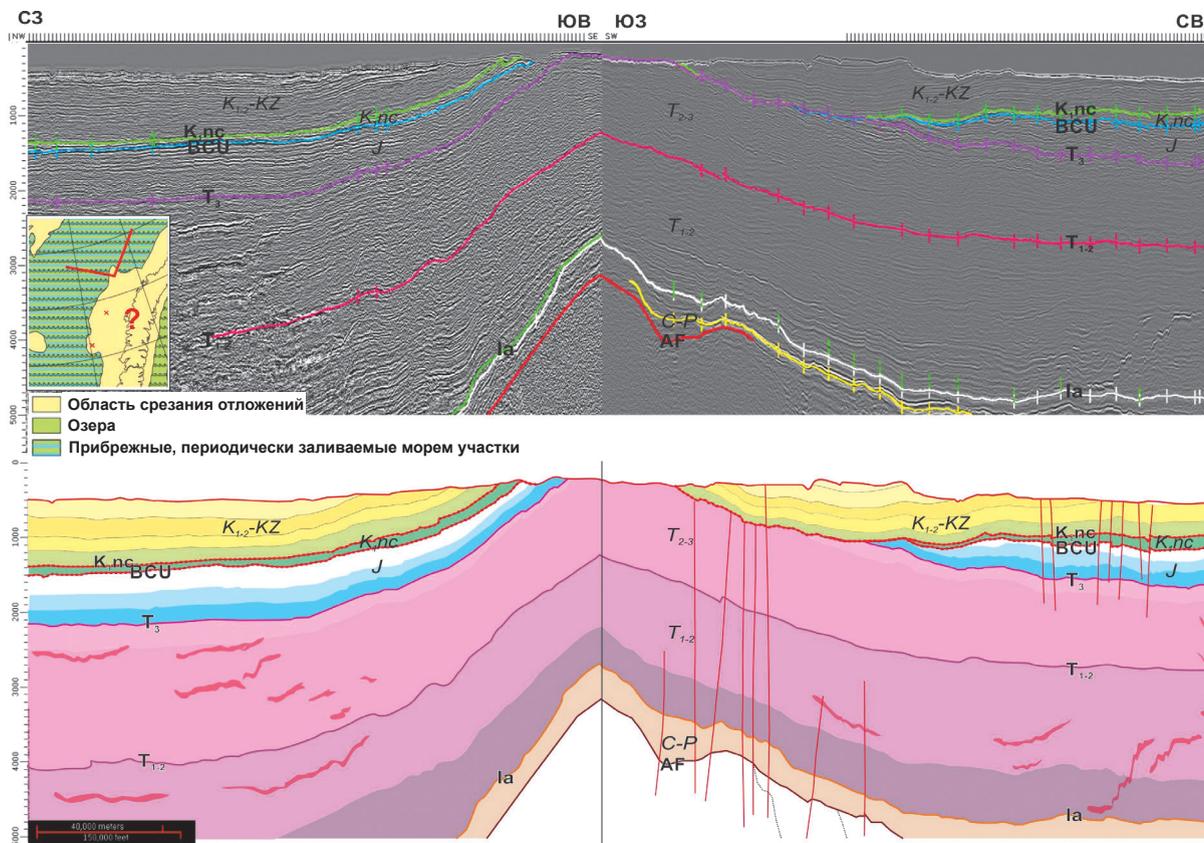


Рис. 7. Выделение меловых и более молодых отложений на составном сейсмическом профиле через северо-западное крыло Пахтусовской структуры. Положение профиля нанесено на приведенном фрагменте палеогеографической схемы альбского времени [15]

Fig. 7. Seismic interpretation of Cretaceous and earlier sediments on the composite seismic profile through the northwestern flank of the Pakhtusovskaya structure. The profile position is plotted on the given fragment of the paleo-geographic scheme of the Albian time [15]

и Северо-Баренцевской впадинах [19]. Однако на составном сейсмическом профиле (рис. 7) через северо-западное крыло Пахтусовской структуры наблюдается срезание отложений мезозоя-кайнозоя, в том числе более 1 км осадков, накопившихся позднее раннемелового времени. Следовательно, структуры мегавала были перекрыты в постранимеловое время молодыми осадочными образованиями.

Палеоструктурные реконструкции, проведенные в пределах Адмиралтейского мегавала, являются хорошим примером результата комплексного анализа геолого-геофизических данных и применения современных методов моделирования. На их основе следует в дальнейшем провести дополнительный анализ и уточнить палеогеографические реконструкции на различные этапы, а также учесть возможную вариативность в процессе восстановления кайнозойской эрозии.

Значение результатов

Анализ величин эрозии по выполненным нами реконструкциям позволил скорректировать оценку геологических рисков, связанных с влиянием эро-

зионной деятельности на формирование УВС Баренцевоморского региона. В районах максимального проявления эрозии отмечается вероятность негативного влияния на всю последовательность процессов онтогенеза от генерации УВ к их миграции и аккумуляции, а также сохранности скопленных. В пределах Северо-Баренцевской впадины (с учетом высокой степени реализации триасовыми и юрскими нефтегазоматеринскими толщами генерационного потенциала в предшествующие эрозии этапы) в постэрозионном этапе происходило резкое сокращение объемов генерации ими УВ при подъеме территории и выходе из главной зоны нефтеобразования. В пределах локальных поднятий Восточно-Баренцевского мегабассейна для залежей УВ, которые могли быть сформированы до момента последней тектонической перестройки, повышался риск их разрушения или расформирования. Для некоторых структур это могло происходить вследствие ремиграции УВ по зонам активных разломов, для других — в результате срезания или ухудшения удерживающих свойств перекрывающих толщ (покрышек). Таким постакумуляционным процессам

подвержены в той или иной степени почти все локальные поднятия в осадочном чехле Баренцево-морского шельфа. Однако для севера, восточного и западного бортов Восточно-Баренцевского мегабассейна отмечается существенное увеличение тектонической дислоцированности разреза в отличие от Штокмановско-Лунинского порога и Южно-Баренцевской впадины, где открыт ряд газовых месторождений.

Выполненные нами оценки времени проявления, масштабов воздымания и эрозии осадочных пород в пределах различных частей мегабассейна являются определяющими показателями при прогнозе его нефтегазоносности, а критерий сохранности возможных залежей УВ является одним из основных рисков при оценке насыщения УВ перспективных объектов.

По результатам проведенного комплексного анализа необходимо наиболее тщательно учитывать влияние процессов тектонического воздымания и эрозии на формирование и современное размещение УВС при оценке геологических рисков для территории Адмиралтейского мегавала, а также для Федынского, Ферсмановского, Персеевского и Орловского поднятий.

Заключение

Для Восточно-Баренцевского мегапрогиба впервые выполнены палеоструктурные реконструкции величины кайнозойской эрозии, базирующиеся на данных, полученных путем комбинирования методов геоморфологических реконструкций (с учетом последних представлений об обстановках осадконакопления) и трехмерного термического моделирования истории бассейна. Основные результаты исследований таковы:

1. На основе реконструкции величины кайнозойской эрозии в пределах поднятий на западном и восточном бортах Восточно-Баренцевского мегапрогиба отмечаются максимальные масштабы кайнозойской эрозии. Отсутствие или крайне небольшое проявление эрозионной деятельности прогнозируется в пределах центральной части Южно-Баренцевской впадины.

2. В пределах Адмиралтейского мегавала (в частности на северо-западном крыле Пахтусовской структуры), который считался ранее на протяжении практически всего мелового периода приподнятым и в пределах которого отсутствовало осадконакопление, установлено срезание отложений мезозоя-кайнозоя (в том числе позднее раннемелового времени). Это позволило сделать предположение о наличии процессов осадконакопления в его пределах в мел-палеогеновое время, что следует учитывать при интегрированном анализе перспектив нефтегазоносности поисковых объектов в составе мегавала.

3. Реконструкции масштабов эрозионных процессов при прогнозе нефтегазоносности Восточно-Ба-

ренцевского мегапрогиба должны являться одним из основных направлений исследований. Результаты таких реконструкций позволяют спрогнозировать зоны наименьшего и наибольшего влияния эрозионных процессов на формирование УВС систем, а также оценить риски переформирования, расформирования и разрушения возможных залежей УВ на потенциально нефтегазоперспективных поисковых объектах региона.

Литература: современное состояние наук о земле / References: current state of earth sciences

1. Безматерных Е. Ф., Сенин Б. В., Шипилов Э. В. Осадочный чехол Западно-Арктической метаплатформы (тектоника и сейсмостратиграфия). — Мурманск: Север, 1993. — 167 с.
Bezmaternykh E. F., Senin B. V., Shipilov E. V. Sedimentary cover of the Western Arctic metaplatfrom (tectonics and seismostratigraphy). Murmansk, Sever, 1993, 167 p. (In Russian).
2. Henriksen E., Bjornseth H., Hals T. et al. Uplift and erosion of the greater Barents Sea: impact on prospectivity and petroleum systems. *Arctic Petroleum Geology. Geological Society, London, Memoirs*, 2011, no. 35, pp. 271—281. DOI: 10.1144/M35.17.
3. Соболев П. О., Соболев Н. Н., Васильев В. Е. и др. Оценка поздне мелового-кайнозойского воздымания российской части шельфа Баренцева моря и моделирование эволюции нефтегазосодержащих осадочных комплексов // *RAO/CIS Offshore: Тез. докл.* — 2009. — С. 41—47.
Sobolev P. O., Sobolev N. N., Vasiliev V. E., Petrov E. O., Kramer B. Assessment of the Late Cretaceous-Cenozoic uplift of the Russian part of the Barents Sea shelf and modeling the evolution of oil and gas-bearing sedimentary complexes. RAO/CIS Offshore, 2009, pp. 41—47. (In Russian).
4. Sobolev P. O., Soloviev A. V. Constraints on the Magnitude and Timing of Cenozoic Exhumation for the Russian Barents Sea, 75th EAGE conference and exhibition incorporating SPE EUROPEC. London, EAGE, 2013. DOI: 10.3997/2214-4609.20131053.
5. Соболев П. О. Оценка кайнозойского воздымания восточной части Баренцева моря // *Соврем. состояние наук о Земле.* — 2011. — С. 1756—1759.
Sobolev P. O. Estimation of the Cenozoic uplift of the eastern part of the Barents Sea. Current state of the earth sciences, 2011, pp. 1756—1759. (In Russian).
6. Sobolev P. O. Cenozoic uplift and erosion of the Eastern Barents sea — constraints from offshore well data and the implication for petroleum system modelling. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 2012, no. 163 (3), pp. 309—324. DOI: 10.1127/1860-1804/2012/0163-0323.
7. Sobolev P. Source rock evaluation and petroleum system modeling of the South Barents and South Kara basins. *Arktos*, 2018, no. 4, pp. 1—9. DOI: 10.1007/s41063-018-0039-x.

8. Амосов И. И., Горшков В. И., Гречишников Н. П. и др. Петрология органического вещества в геологии горючих ископаемых. — М.: Наука, 1987. — 332 с.
Amosov I. I., Gorshkov V. I., Grechishnikov N. P. et al. Petrology of organic matter in the geology of fossil fuels. Moscow, Nauka, 1987, 332 p. (In Russian).
9. Соловьев А. В., Зайончек А. В., Супруненко О. И. и др. Эволюция источников сноса триасовых отложений архипелага Земля Франца-Иосифа: U/PB LA-ICP-MS датирование обломочного циркона из скважины Северная // Литология и полез. ископаемые. — 2015. — № 2. — С. 113—128. — DOI: 10.7868/S0024497X15020056.
Soloviev A. V., Zaionchek A. V., Rozhkova D. V., Khisamutdinova A. I., Suprunenko O. I., Stolbov N. M., Brekke H., Faleide J. I., Hourigan J. K. Evolution of the provenances of Triassic rocks in Franz Josef Land: U/PB LA-ICP-MS dating of the detrital zircon from well Severnaya. Lithology and Mineral Resources, 2015, vol. 50, no. 2, pp. 102—116. DOI: 10.7868/S0024497X15020056.
10. Khudoley A. K., Sobolev N. N., Petrov E. O., Ershova V. B., Makariev A. A., Makarieva E. V., Gai-na C., Sobolev P. O. A reconnaissance provenance study of Triassic–Jurassic clastic rocks of the Russian Barents Sea. GFF, 2019, vol. 141, iss. 4. DOI: 10.1080/11035897.2019.1621372.
11. Thorsteinsson R., Tozer E. T. Geology of the Arctic Archipelago. R. J. W. Douglass (ed.). Geology and Economic Minerals of Canada. Geological Survey of Canada, Economic Geology Report, 1970, vol. 1, pp. 547—590.
12. Piejohn K., von Gosen W., Tessensohn F. The Eurekan deformation in the Arctic: an outline. J. of the Geological Society, 2016, vol. 173, no. 6, pp. 1007—1024. DOI: 10.1144/jgs2016-081.
13. Глебовский В. Ю., Каминский В. Д., Минаков А. Н. и др. История формирования Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана по результатам геоисторического анализа аномального магнитного поля // Геотектоника. — 2006. — № 1. — С. 21—42.
Glebovskij V. Yu., Kaminskij V. D., Minakov A. N., Merkuriev S. A., Childers V. A., Brozina J. M. Formation of the Eurasia Basin in the Arctic Ocean as Inferred from Geohistorical Analysis of the Anomalous Magnetic Field. Geotektonika, 2006, no. 4, pp. 21—42. (In Russian).
14. Nikishin A. M., Petrov E. I. et al. Geological structure and history of the Arctic Ocean based on new geophysical data: implications for paleoenvironment and paleoclimate. Pt. 2. Mesozoic to Cenozoic geological evolution. Earth-Science Reviews, 2019.
15. Smelror M., Petrov O. V., Larssen G. B., Werner S. ATLAS: Geology History of the Barents Sea. Trondheim, NGU, 2009.
16. Lasabuda A., Geissler W. H., Leberg J. S., Knutsen S.-M., Rydningen T. A., Berglar K. Late Cenozoic erosion estimates for the northern Barents Sea: Quantifying glacial sediment input to the Arctic Ocean. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2018, vol. 19, no. 12, pp. 4876—4903. DOI: 10.1029/2018GC007882.
17. Dimakis P., Braathen B. I., Faleide J.-I., Elverhoi A., Gudlaugsson S. T. Cenozoic erosion and the preglacial uplift of the Svalbard-Barents Sea region. Tectonophysics, 1998, vol. 300, no. 1—4, pp. 311—327.
18. Sømme T. O., Dore A. G., Lundin E. R., Tørudbakken B. O. Triassic–Paleogene paleogeography of the Arctic: Implications for sediment routing and basin fill. AAPG Bull., 2018, vol. 102, no. 12, pp. 2481—2517.
19. Дараган-Суцова Л. А., Дараган-Суцов Ю. И., Руквишников Д. Д. и др. История геологического развития Баренцево-Карского региона на основе анализа структурных и палеоструктурных построений сейсмических карт // RAO/CIS Offshore. Тез. докл. — 2009. — С. 54—60.
Daragan-Sushchova L. A., Daragan-Sushchov Yu. I., Rukavishnikova D. D., Soloviev V. V., Petrov E. O., Kuznetsova L. F. History of the geological development of the Barents-Kara region based on the analysis of structural and paleostructural constructions of seismic maps. RAO/CIS Offshore, 2009, pp. 54—60. (In Russian).

Информация об авторах

Голованов Дмитрий Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по геологии, ООО «РН-Шельф-Арктика» (121151, Россия, Москва, ул. Можайский Вал, д. 8В), e-mail: dyugolovanov@rnsha.rosneft.ru

Богоявленская Ольга Васильевна, главный специалист, ООО «РН-Шельф-Арктика», (121151, Россия, Москва, ул. Можайский Вал, д. 8В), e-mail: ovbogoyavlenskaya@rnsha.rosneft.ru.

Никишин Валерий Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, менеджер по геологии, ООО «РН-Шельф-Арктика» (121151, Россия, Москва, ул. Можайский Вал, д. 8В), e-mail: v_nikishin@rosneft.ru

Малышев Николай Александрович, доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора департамента геолого-разведочных работ, ПАО «НК «Роснефть» (115054, Россия, Москва, Дубининская ул., д. 31А), e-mail n_malishev@rosneft.ru.

Вержбицкий Владимир Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, начальник управления геолого-разведочных работ по проектам с зарубежными партнерами ПАО «НК «Роснефть» (115054, Россия, Москва, Дубининская ул., д. 31А), e-mail v_verzhbitskiy@rosneft.ru.

Комиссаров Дмитрий Константинович, главный специалист управления геолого-разведочных работ по проектам с зарубежными партнерами, ПАО «НК «Роснефть» (115054, Россия, Москва, Дубининская ул., д. 31А), e-mail dk_komissarov@rosneft.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Голованов Д. Ю., Богоявленская О. В., Никишин В. А. и др. Анализ кайнозойской эрозии осадочных отложений Восточно-Баренцевского мегабассейна с учетом трехмерного моделирования углеводородных систем // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12. — № 3. — С. 320—333. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-320-333.

ANALYSIS OF THE CENOZOIC EROSION OF SEDIMENTARY DEPOSITS IN THE EAST BARENTS MEGA BASIN BASED ON 3D MODELING OF HYDROCARBON SYSTEMS

Golovanov, D. Yu., Bogoyavlenskaya, O. V., Nikishin, V. A.
RN-Shelf-Arctic LLC (Moscow, Russian Federation)

Malishev, N. A., Verzhbitskiy, V. E., Komissarov, D. K.
Rosneft Oil Company (Moscow, Russian Federation)

The article was received July 15, 2022

Abstract

The paper presents the results of a paleo-reconstruction of the Cenozoic development stage in the East Barents mega-basin. The authors based their research on detailed geomorphological reconstructions, including the latest concepts about sedimentation environment, the results of apatite fission track-analysis, and data on the vitrinite reflectance (VR) in combination with 3D thermal modeling. A comprehensive analysis of all materials made it possible to refine the forecast of the magnitude of Cenozoic erosion in areas where the extrapolation technique was previously used, as well as to suggest the possibility of sedimentation within the Admiralteisky mega-swath in the Cretaceous-Paleogene time.

Keywords: East Barents shelf, mega basin, Cenozoic erosion, basin modeling, 3D modeling, hydrocarbons (HC), vitrinite reflectance (VR).

Information about the authors

Golovanov, Dmitry Yur'evich, PhD of Geology and Mineralogy, Deputy Director for Geology, RN-Shelf-Arctic LLC (8B, Mozhaisky Val, Moscow, Russian Federation, 121151), e-mail: dyugolovanov@rnsha.rosneft.ru.

Bogoyavlenskaya, Olga Vasil'evna, Chief Specialist, RN-Shelf-Arctic LLC (8B, Mozhaisky Val, Moscow, Russian Federation, 121151), e-mail: ovbogoyavlenskaya@rnsha.rosneft.ru.

Nikishin, Valery Anatolyevich, PhD of Geology and Mineralogy, Manager of Geology, RN-Shelf-Arctic LLC (8B, Mozhaisky Val, Moscow, Russian Federation, 121151), e-mail: v_nikishin@rosneft.ru.

Malishev, Nikolai Aleksandrovich, Doctor of Geology and Mineralogy, Deputy Director of the Department of Geological Exploration, Rosneft Oil Company (31A, Dubininskaya st., Moscow, Russian Federation, 115054), e-mail: n_malishev@rosneft.ru.

Verzhbitskiy, Vladimir Evgen'evich, PhD of Geology and Mineralogy, Chief of the Department of Geological Exploration for Projects with Foreign Partners, Rosneft Oil Company (31A, Dubininskaya st., Moscow, Russian Federation, 115054), e-mail: v_verzhbitskiy@rosneft.ru.

Komissarov, Dmitrii Konstantinovich, Chief Specialist of the Department of Geological Exploration for Projects with Foreign Partners, Rosneft Oil Company (31A, Dubininskaya st., Moscow, Russian Federation, 115054), e-mail: dk_komissarov@rosneft.ru.

Bibliographic description of the article

Golovanov, D. Yu., Bogoyavlenskaya, O. V., Nikishin, V. A., Malishev, N. A., Verzhbitskiy, V. E., Komissarov, D. K. Analysis of the cenozoic erosion of sedimentary deposits in the East Barents Mega Basin based on 3d modeling of hydrocarbon systems. Arctic: Ecology and Economy, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 320—333. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-320-333. (In Russian).