

УДК 550.84+550.47+553.98+551.735+551.736

ОРГАНИЧЕСКАЯ ГЕОХИМИЯ КАРБОН-ПЕРМСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ АНАБАРО-ХАТАНГСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Е.А. Костырева¹, И.С. Сотнич¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. академика А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3, Россия

В работе представлены результаты изучения рассеянного органического вещества (ОВ) из карбон-пермских отложений Анабаро-Хатангской нефтегазоносной области. Впервые на основе детальных современных геохимических исследований представительной коллекции кернового материала как по площади, так и по разрезу показано, что ОВ пермских отложений полигенно по всему разрезу и находится на разных стадиях преобразованности (МК₁¹-АК), при этом в большей части разреза его нефтегазогенерационный потенциал израсходован. В изучаемых отложениях помимо автохтонных (сингенетичных) выявлены параавтохтонные и аллохтонные битумоиды, что свидетельствует об интенсивно протекающих миграционных процессах. В разрезах раннепермского возраста скв. Южно-Тигянская, Нордвикская встречаются также битумоиды со следами биодеградации.

Битумоиды, углеводороды-биомаркеры, Анабаро-Хатанская нефтегазоносная область, органическая геохимия

GEOCHEMISTRY OF ORGANIC MATTER IN CARBONIFEROUS AND PERMIAN SEDIMENTS OF THE ANABAR-KHATANGA PETROLEUM PROVINCE

E.A. Kostyрева¹, I.S. Sotnich¹

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and geophysics of Siberian branch of Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), 630090, Novosibirsk, Koptug ave. 3, Russia

The article presents the results of the detailed modern geochemical investigation of a representative (both by area and by section) collection of core material from Permian deposits of the Anabar-Khatanga petroleum province. The organic matter of Permian deposits has been firstly shown to be polygenous within all the section and have a different thermal maturation level (stages MC₁₁-AC). It also has exhausted oil and gas generative potential in the most part of the section. The studying deposits contain paraautochthonous and allochthonous bitumoids (chloroform source rock extracts) in addition to autochthonous (syngenetic) ones, that can be the evidence of intensively occurring migration processes. There are also bitumoids with traces of biodegradation in Early Permian deposits from the Yuzhno-Tiganskaya and Nordvikskaya wells.

Bitumoids, hydrocarbon biomarkers, Anabar-Khatanga petroleum province, organic geochemistry

ВВЕДЕНИЕ

Поисково-разведочные работы на нефть и газ на территории Анабаро-Хатангской нефтегазоносной области (НГО) были начаты в 30-ые годы прошлого века. С момента открытия нефтяных залежей на Нордвикской, Южно-Тигянской, Кожевниковской, Ильинской площадях возник вопрос о возрасте нефтематеринских пород [Грамберг, 1958, Калинко, 1958, 1959]. Источником этих нефлей ранее было принято считать исключительно пермские нефтегазоматеринские толщи, что подтверждало многочисленные результаты геохимических

исследований как самих отложений, так и органического вещества в них [Недра Арктики, 1946; Грамберг, 1958; Калинко, 1959; Степаненко 1981, 1983, 1986 и др.]. Пермский возраст нефтематеринских пород признается всеми исследователями и сегодня. Открытие Центрально-Ольгинского нефтяного месторождения в 2017 с залежью в пермских отложениях стало еще одним доказательством их перспективности [Конторович и др., 2024, и др.].

Тем не менее, в настоящее время вопрос о возрасте нефтегазоматеринских отложений на территории Анабаро-Хатангской НГО вызывает дискуссии [Кринин, 2011; Девятов, Савченко, 2012; Каширцев и др., 2013; Мазитов и др., 2017, Соболев и др., 2019; Конторович и др., 2024; Ларичев и др., 2024; Фомин, 2024 и др.]. Помимо пермских пород, по мнению исследователей, источниками нафтидов могут быть как девонские, так и кембрийские толщи. В работах Каширцева В.А. с соавторами показано, что изученные нефти Южно-Тигянского, Нордвикского месторождений и нефтепроявления Северо-Суолемской площади (скв. 2) генерированы, главным образом, органическим веществом девонского соленосного комплекса при подчиненной роли верхнепалеозойских образований [Каширцев и др., 1999, 2013 и др.]. Кринин В.А. по результатам геохимических исследований насыщенных и полициклических структур нафтидов Норильского и Нордвикского районов, учитывая тенденцию изменения мощности отложений, фациальные условия, геотермический градиент и пластовую температуру, проводит вычисления и делает вывод, что «процесс нефтегенерации приурочен к отложениям нижнего кембрия на глубинах более 3559м» [Кринин, 2011].

Специалисты ИНГГ СО РАН по инициативе академика А.Э. Конторовича, в рамках программ фундаментальных исследований института и хоздоговорных работ, последние два десятилетия комплексно занимаются изучением Сибирского сектора Арктического региона, составная часть этих исследований – это органическая геохимия нафтидов (рассеянного органического вещества, битумоидов, нефтепроявлений и нефтей) Анабаро-Хатангской НГО.

Цель настоящей работы – выявление особенностей состава и строения органического вещества карбон-пермских отложений Анабаро-Хатангской НГО современными геохимическими методами. Сравнительный анализ состава и строения нафтидов позволяет повысить степень достоверности определения возраста нефтематеринских отложений и оценки нефтегазоносности изучаемой территории, что определяет актуальность исследований.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование органического вещества проводилось по принятой в ИНГГ СО РАН схеме [Костырева, 2005 и др.]. На начальном этапе регистрировалось содержание органического углерода на нерастворимый (бескарбонатный) остаток породы при его сжигании в токе кислорода при температуре 1000-1100⁰С с помощью экспресс-анализатора на углерод АН-7529, которое затем пересчитывалось на породу. Пиролитические характеристики РОВ (S_1 , S_2 , T_{max} , остаточный нефтегенерационный потенциал – НП) определялись экспрессным пиролитическим методом в варианте «Рок-Эвал» [Конторович и др., 1986] на приборе Source Rock Analyzer (SR Analyzer, Humble Instruments). Измерения стабильных изотопов органического углерода проводились в Томском филиале АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья» на масс-спектрометре “Finnigan MAT-253” с использованием универсальной системы подготовки и ввода проб Gas Bench II. Результаты изотопного состава углерода приведены к международному стандарту PDB, который представляет собой карбонат кальция белемнита позднемелового возраста из формации Пи-Ди (Южная Каролина).

Экстракция битумоидов хлороформом из палеозойских отложений и методы их исследования (элюентная хроматография, газожидкостная хроматография, хромато-масс-спектрометрия насыщенной и ароматической фракций УВ), согласно принятой в ИНГГ СО РАН схеме описаны в работах [Костырева, 2005; Костырева и др., 2025 и др.].

Объектом исследования является рассеянное органическое вещество карбон-пермских отложений из разрезов скважин Восточная-1, Гуримисская-1, 2, Нордвикская-41, 42, Рыбинская-1, Северо-Суолемская-1, 2, 4, Улаханская-1, 2, Хорудалахская-1, Южно-Тигянская-1, Южно-Суолемская-10 Анабаро-Хатангской НГО и скважин Волочанская-1, 2 Енисей-Хатангской НГО (рис. 1). Коллекция кернового материала включала 322 образца карбон-пермского (C-P) возраста, из них 4 – C, 263 – раннепермского (P₁), 46 – среднепермского (P₂), 9 – позднепермского (P₃).

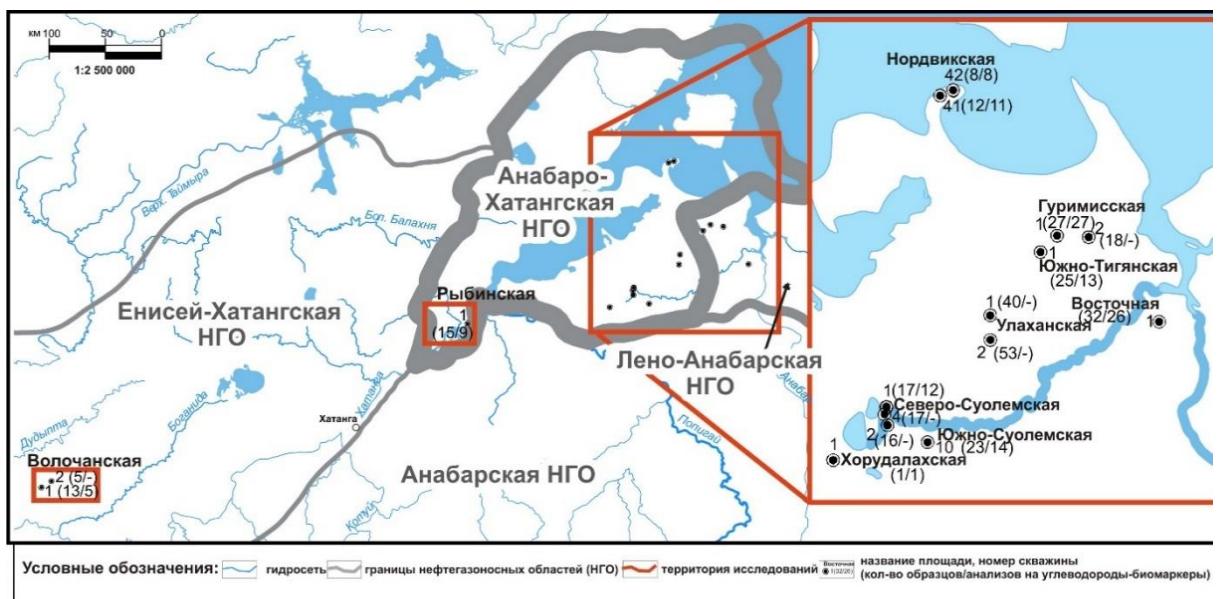


Рис. 1. Точки отбора образцов керна скважин из карбон-пермских отложений на геохимические исследования рассеянного органического вещества.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение ОВ, нефтегенерационный потенциал пород, типы битумоидов

Каменноугольные отложения представлены карбонатными породами (нерасторимый остаток (НО) <16% на породу) скв. Южно-Суолемская-10 (3 обр.) и аргиллитом (НО=85%) скв. Рыбинская - 1. Для Южно-Суолемской площади характерно низкое содержание органического углерода (0,04-0,05%), при повышенном битумоидном коэффициенте ($\beta = 8,5-9,4\%$). В аргиллитах концентрация C_{опт} возрастает до 1,9%, при $\beta = 0,4\%$. Выход хлороформенного битумоида не превышает 0,01% на породу. В групповом составе всех образцов доминируют углеводороды (54,3-72,7%) - рис. 2. Значения отношения концентраций насыщенных УВ к ароматическим изменяется от 4,4 до 9,1. Содержания асфальтенов очень низкие (<1%).

Для образца из скв. Рыбинская-1 были определены пиролитические показатели, согласно которым аргиллит характеризуется очень бедным нефтегенерационным потенциалом (HI = 8 мгУВ/г С_{опт}). При этом, значение S₁>S₂ и индекс продуктивности (PI)=0,65, что предполагает миграционные процессы. По пиролитическим характеристикам скв. Рыбинская-1, повышенному битумоидному коэффициенту в скв. Южно-Суолемская и групповому составу все битумоиды относятся к миграционным (аллохтонным).

Нижнепермские отложения представлены терригенными породами (нерасторимый остаток ≥75% на породу) из тустахской (141 обр.) и нижнекожевниковской (122 обр.) свит Восточная-1,

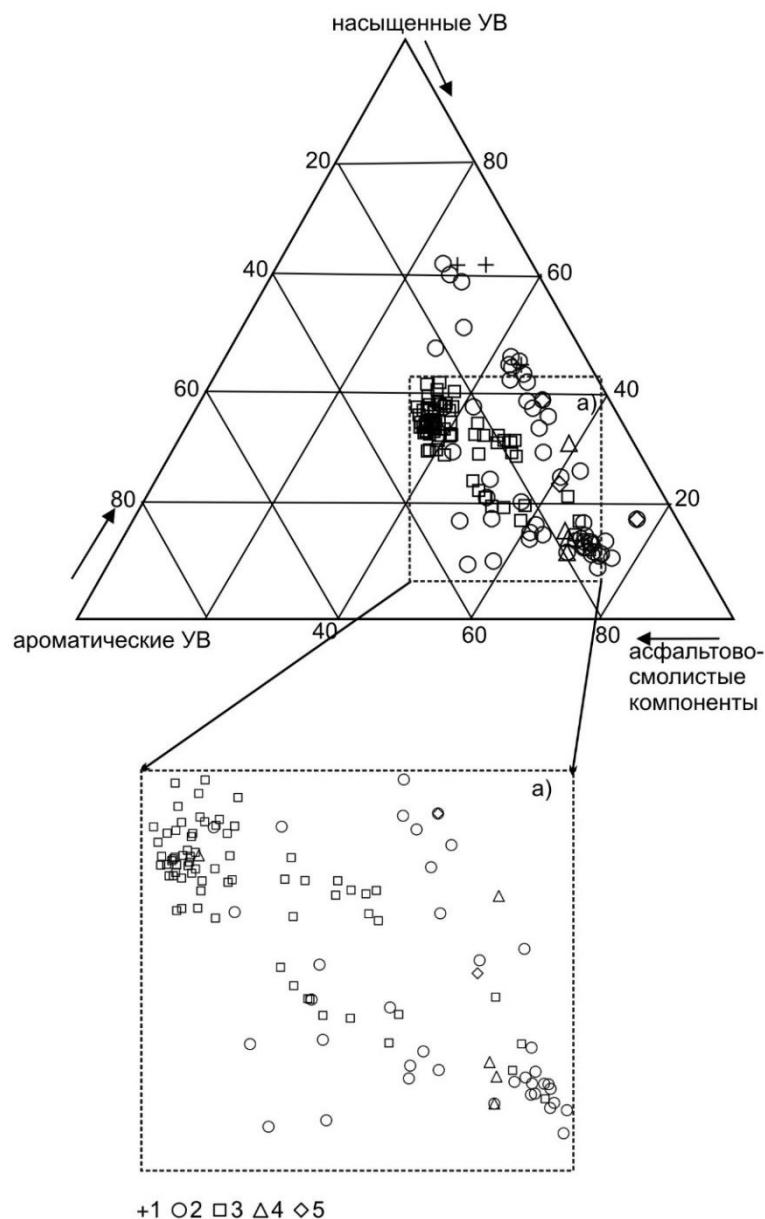


Рис. 2. Тригонограмма группового состава битумоидов из карбон-пермских отложений.
Возраст, свита: 1 – карбон; пермь: 2- нижнекожевниковская, 3 – тустанская, 4 – верхнекожевниковская, 5 – мисайлапская.

Гуримисская-1, Нордвикская-41, 42, Рыбинская-1, Северо-Суолемская-1, Улаханская-1, 2, Хорудалахская-1, Южно-Суолемская-10, Южно-Тигянская-1 и единичными образцами карбонатных (нерасторимый остаток 51,0-73,5% на породу) пород из тустанской свиты скв. Гуримисская-1, Нордвикская-41, Северо-Суолемская-1, 2, Улаханская-1 и Южно-Тигянская-1. В исследованных терригенных породах нижнепермских отложений скв. Восточная-1, Гуримисская-1, 2, Рыбинская-1 и Северо-Суолемская-1, 2, 4, Южно-Тигянская-1 отмечен углистый материал, углефицированный и обугленный растительный детрит.

Концентрации органического углерода ($C_{опт}$) в большинстве образцов тустанской свиты приходится на интервал значений 1,0÷2,0% на породу, а в нижнекожевниковской – 1,5÷2,5 % на породу (рис. 3).

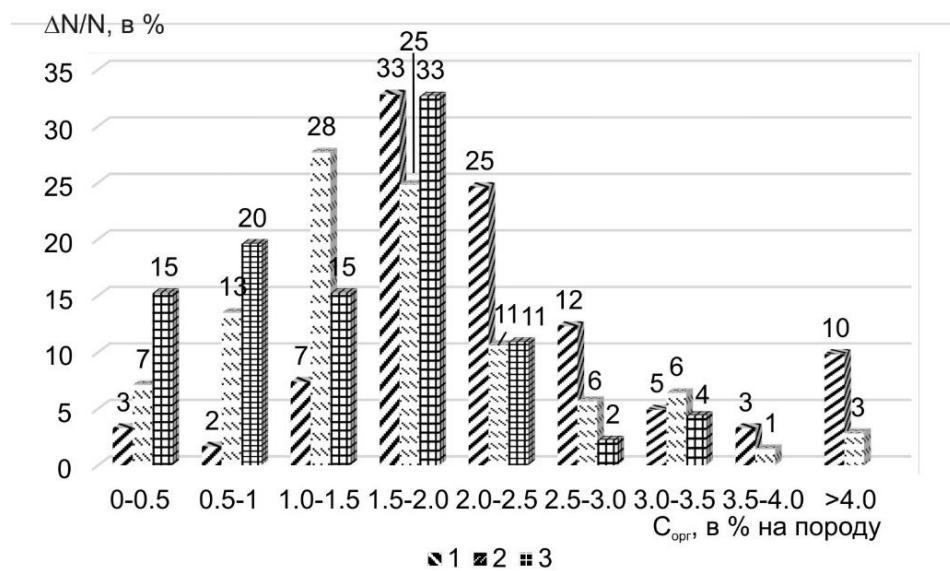


Рис. 3. Гистограммы распределения содержания органического углерода в пермских отложениях.
Свиты: 1 - нижнекожевниковская, 2 - тустахская, 3 – верхнекожевниковская.

Нефтегенерационный потенциал нижнепермских отложений по содержанию $C_{\text{орг}}$ в породах согласно классификации [Лопатин и др., 1997] удовлетворительного качества (от невысокого до богатого). В углистых породах концентрации $C_{\text{орг}}$ могут достигать в нижнекожевниковой свите 6-9% на породу, а в тустахской до 22,4% на породу. По значениям пиролитических параметров ($S_1 < 0,5$ и $S_2 < 2,5$ мгУВ/г породы) в большинстве образцов нижнепермских отложений нефтегенерационный потенциал плохого качества. В единичных образцах скв. Гуримская-1, Северо-Суолемская-1, 2, 4, Южно-Суолемская-10, Южно-Тигянская-1 значения $S_1 > S_2$ и индекс продуктивности ($PI \geq 0,5$), что предполагает миграционные процессы. Остаточный водородный индекс, как правило, бедный и не превышает 150 мгУВ/г $C_{\text{орг}}$.

В породах тустахской свиты содержание хлороформенного экстракта изменяется от 0,003-0,10% в алевроаргиллитах до 0,14-0,18% на породу в углистых аргиллитах. Битумоидный коэффициент не превышает 9,4%, изменяясь в 92% образцов от 0,1 до 5,3%.

В большинстве образцов (93,5%) нижнекожевниковой свиты содержание битумоидов не выше 0,2% на породу. В единичных образцах из аргиллитов скв. Гуримская-1, Северо-Суолемская-1 выход хлороформенного экстракта равен 0,3-0,6% на породу. Битумоидный коэффициент варьирует в нижнекожевниковой свите от 0,3 % до 9,7 % и только в скв. Северо-Суолемская-1 (глубины 1501,5м), Южно-Тигянская-1 (1530,2м) и Гуримская-1 (1136,5м) выше (11,6-22,5%).

По групповому составу битумоиды из нижнепермских пород можно разделить на 3 группы. В первой группе, к которой относится большая часть образцов, в групповом составе преобладают асфальтово-смолистые компоненты – до 75 % на битумоид (рис. 2).

Среди них содержание асфальтенов изменяется на порядок от 2 до 26-29% на битумоид, а значение отношения смол к асфальтенам – от 1,2 до 68. Концентрация насыщенных УВ в нижнепермских битумоидах, как правило, меньше ароматических и лишь в единичных образцах выше в 2,0-3,4 (нижнекожевниковая свита) или в 1,5-4,8 (тустахская свита). Согласно перечисленным показателям эти битумоиды могут быть классифицированы как автохтонные.

Ко второй группе относятся битумоиды нижнекожевниковой свиты скв. Гуримская-1 (1136,5-1140,3 м, 1304,1-1312,8 м, 1317,9-1319,7 м, 1327,96 м), Северо-Суолемская-1 (1499,28-1503,25 м) скв. Южно-Тигянская-1 (1553,2 м, 1587,25 м)) и тустахской свиты скв. Восточная-1

(2217,0-2237,45 м, 2608,75 м), скв. Южно-Тигянская-1 (3300,2-3302,96 м, 2815,02-2818,16 м,), скв. Гуримисская-1 (1528,96 м, 1532,97 м, 2545,57-2658,33 м), Северо-Суолемская-1 (1742,46 м, 2553,53 м), Южно-Суолемская-10 (1516,72 м, 1518,58-1520,45 м, 1636,75-1922,1 м), Нордвикская-42 (735,9-739,6 м, 1233,8-1240,2 м). В их составе преобладают углеводороды от 50,1 % до 75,2 % на битумоид (рис. 2). Значения отношения концентраций насыщенных УВ к ароматическим изменяется от 0,9-1,0 до 4,9 в нижнекожевниковской свите, достигая 9-9,6 в тустахской. В составе асфальтово-смолистых компонентов большинства битумоидов концентрация асфальтенов меньше 5,0%. Содержание смол превышает асфальтены во всех битумоидах при разбросах 11÷94,5 в нижнекожевниковской и 4÷185 в тустахской свитах. Битумоиды этой группы, где $\beta \leq 10$, а сумма УВ>50%, относим к параавтохтонным.

В третью группу попадают битумоиды из нижнекожевниковской свиты в скв. Северо-Суолемская-1 (1501,5м), Гуримисская-1 (1136,5м), Южно-Тигянская (1530,2м), для которых $\beta=11,6-21,4$ %, сумма УВ = 72-75 % на битумоид, асфальтенов не более 1,5%, поэтому их классифицируем как аллохтонные.

Среднепермские отложения на изучаемой территории вскрыты в скв. Гуримисская-2, Рыбинская-1, Улаханская-1, 2, Южно-Суолемская-10 и на сопредельной в скв. Волочанская-1, представлены верхнекожевниковской (46 обр.) свитой.

Содержание органического углерода в большинстве образцов попадает в интервал значений 1,5-2,5% (рис. 3), изменяясь от 0,2-0,6 % в алевролитах до 2,5 % на породу в алевроаргиллитах, достигая 3,2% в углистых породах. Значения пиролитических характеристик $S_1 \leq 1,0$ и $S_2 < 5,0$ мгУВ/г породы соответствуют невысокому качеству по классификации [Лопатин и др., 1997]. Остаточный водородный индекс, как правило, бедный и не превышает 100мгУВ/г $C_{опр}$.

Выход хлороформенного битумоида определен в одном образце скв. Рыбинская-1 (0,03 % на породу) и 4 образцах на сопредельной территории скв. Волочанская-2 (0,01%), битумоидный коэффициент низкий (0,8-2,7%). В групповом составе битумоидов преобладают асфальтово-смолистые компоненты (62,0-69,0 % на битумоид) – рис. 2. Содержание смол превышает асфальтены в 2-6 раза. Значения отношения концентраций насыщенных УВ к ароматическим изменяется от 0,6 до 1,6. Все битумоиды из среднепермских отложений автохтонные.

Верхнепермские отложения на изучаемой территории представлены мисайлапской (9 обр.) свитой в скв. Рыбинская-1, Улаханская-1 и сопредельной в скв. Волочанская-1.

Содержание органического углерода изменяется в алевроаргиллитах от 0,7 до 1,5 % на породу. Значения пиролитических характеристик $S_1 \leq 0,1$ и $S_2 < 1,0$ мгУВ/г породы соответствуют плохому качеству по классификации [Лопатин и др., 1997]. Остаточный водородный индекс бедный и не превышает 95мгУВ/г $C_{опр}$.

Битумоидный коэффициент низкий (<2,2 %). Выход хлороформенного битумоида в верхнепермских отложениях равен 0,01-0,02 % на породу. В групповом составе битумоидов преобладают асфальтово-смолистые компоненты (до 73,1 % на битумоид) – рис. 2. Среди асфальтово-смолистых компонентов содержание смол превышает асфальтены в 4-6 раза. УВ составляют 23,2 – 48,0 % на битумоид. Значения отношения концентраций насыщенных УВ к ароматическим изменяется от 0,5 до 3,9. Все битумоиды из верхнепермских отложений автохтонные.

Таким образом, анализ остаточного нефтегенерационного потенциала органического вещества пород карбон-пермского возраста Анабаро-Хатангской НГО показал его бедность и невысокое качество. Наиболее высокие значения НИ и $C_{опр}$ характерны для отложений нижнепермского возраста. Особенности степени битуминозности пород и группового состава битумоидов в изученном разрезе позволили дифференцировать их на автохтонные и аллохтонные (миграционные) - рис. 2. Миграционные битумоиды из отложений каменноугольного и нижнепермского возраста будут детально рассмотрены в отдельной статье. Ниже представлены результаты исследования углеводородного состава насыщенной и ароматической фракций автохтонных битумоидов.

Фациально-генетический тип ОВ

Нижнепермские отложения. По распределению н-алканов в автохтонных битумоидах нижнепермских отложений можно выделить 2 основные группы. Для первой группы характерно типовое для аквагенного (морского) органического вещества одномодальное распределение н-алканов с максимумом на одном из УВ в области н-C₁₆ – н-C₁₈ (до 24,3% в нижнекожевниковской и 28,3 % от суммы н-алканов в тустахской) (рис. 4а, б).

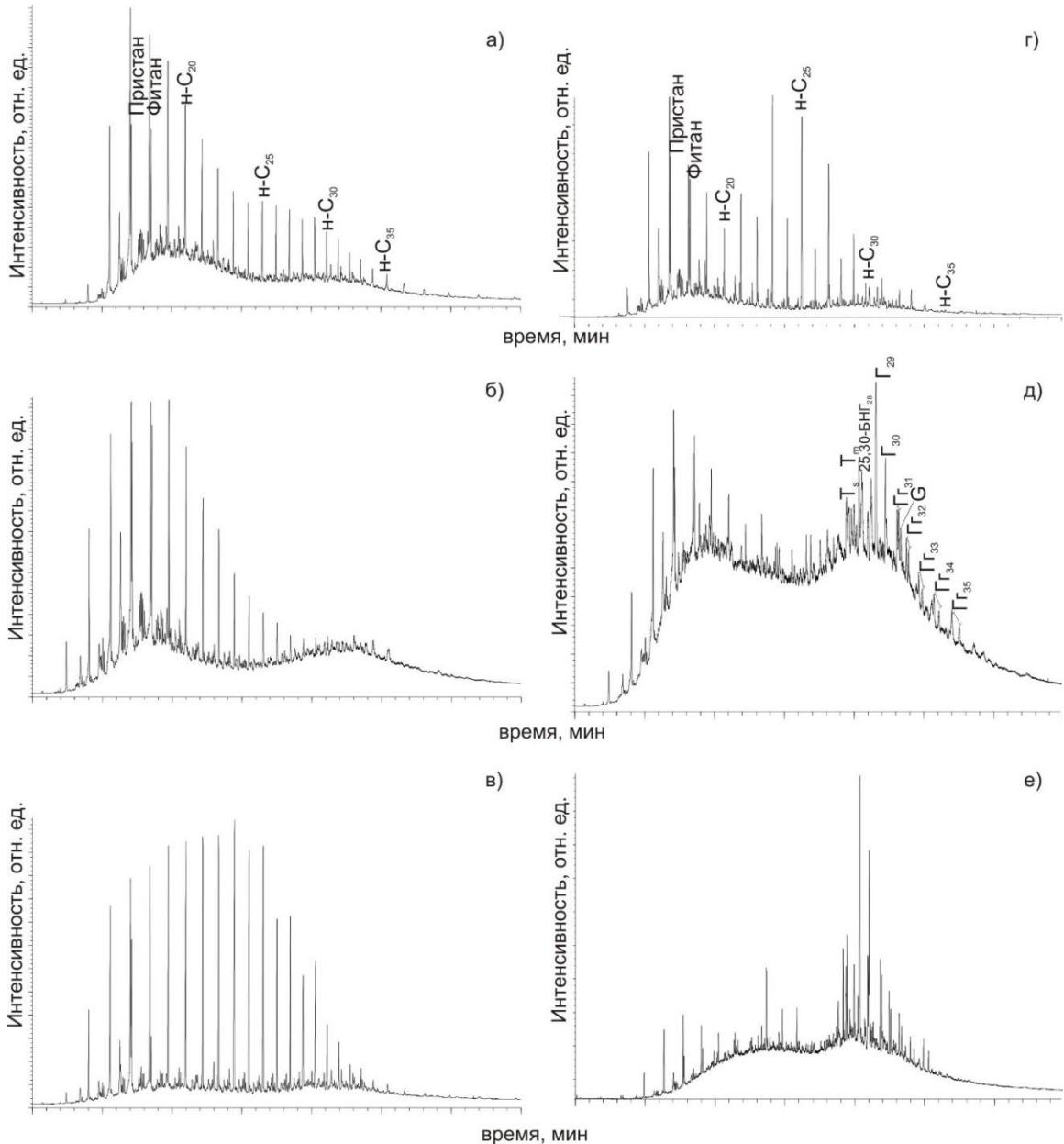


Рис. 4. Типовые хроматограммы нормальных алканов насыщенной фракции битумоидов из пермских отложений.
Органическое вещество: а-б – аквагенное, в-г – террагенное, д-е – биодеградированное;
25,30-БНГ₂₈ – бисноргопан C₂₈, Г_n – гопаны (n – количество атомов углерода), ГГ_n – гомогопаны.

В эту группу попали все битумоиды нижнекожевниковой свиты, большинство параавтохтонных битумоидов тустахской, а также единичные образцы террагенно-аквагенное ОВ скв. Южно-Тигянская-1, е – скв. битумоидов из скв. Гуримисская-1, Северо-Суолемская-1, Южно-

Суолемская-10 и Хуродолахская-1. Значения отношения нормальных алканов C_{27}/C_{17} не превышают 0,5, при среднем 0,15, коэффициент CPI $\leq 1,3$, при среднем 1,1.

В остальных битумоидах, включая и большинство битумоидов из углистых пород в максимальной концентрации находятся н-алканы состава C_{16-29} (до 11,2-12,5% от суммы н-алканов), что характерно для органического вещества преимущественно континентального генезиса (рис. 4в). В высокомолекулярной области C_{23+} отмечается доминирование нечетных н-алканов («пилообразный» тип кривой) наиболее ярко выраженное в нижнекожевниковской свите, что подтверждается коэффициентом CPI, который изменяется от 1,3 до 1,7 в 76% битумоидов нижнекожевниковской против 32% тустахской свиты при среднем 1,4 и 1,2 соответственно. Значения отношения нормальных алканов C_{27}/C_{17} в этой группе битумоидов изменяются от 0,5 до 2,1 при среднем 0,7.

Отношение пристана к фитану (Pr/Ph), являющееся показателем окислительно-восстановительных условий накопления органического вещества, в нижнепермских битумоидах первой группы меньше 1,5, при среднем 0,95 (восстановительные условия), а во второй группе изменяется от 0,4 до 2,4 при среднем 1,6 в нижнекожевниковской свите и от 0,5 до 2,6 при среднем 1,3 в тустахской (менее восстановительные/субокислительные условия).

Из зависимости $Pr/h-C_{17}$ от $Ph/h-C_{18}$ (диаграмма Коннана-Кассоу) видно, что все битумоиды первой группы находятся в области аквагенного ОВ (рис. 5). Битумоиды второй группы неравномерно распределились по выделенным областям ОВ. В область смешанного ОВ попали преимущественно битумоиды из нижнекожевниковской свиты, а аквагенного - из тустахской свиты.

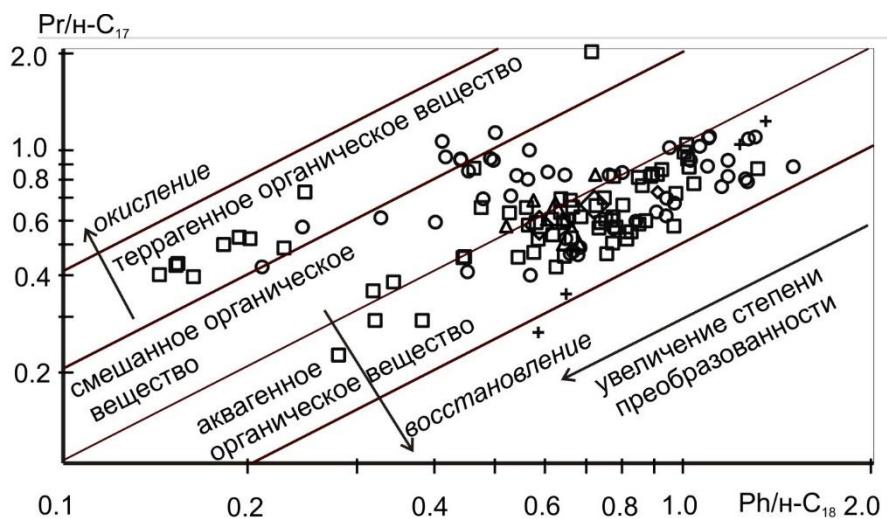


Рис. 5. Зависимость $Pr/h-C_{17}$ от $Ph/h-C_{18}$ (диаграмма Коннана-Кассоу) в насыщенной фракции битумоидов из пермских отложений.

Условные обозначения на этом и рис. 7-8 смотри на рис. 2.

В распределении стеранов ($C_{27}-C_{30}$) нижнепермских битумоидов также можно выделить два концентрационных ряда, свидетельствующих о различии в обстановках накопления органического вещества: $C_{27} \geq C_{29} > C_{28} > C_{30}$ (морское ОВ) и $C_{29} > C_{27} > C_{28} > C_{30}$ (континентальное ОВ) – рис. 6а. 7.

Первый ряд ($C_{29}/C_{27} \leq 1,2$) характерен, в первую очередь, для большинства битумоидов с одномодальным распределением н-алканов – это образцы тустахской свиты и нижнекожевниковской

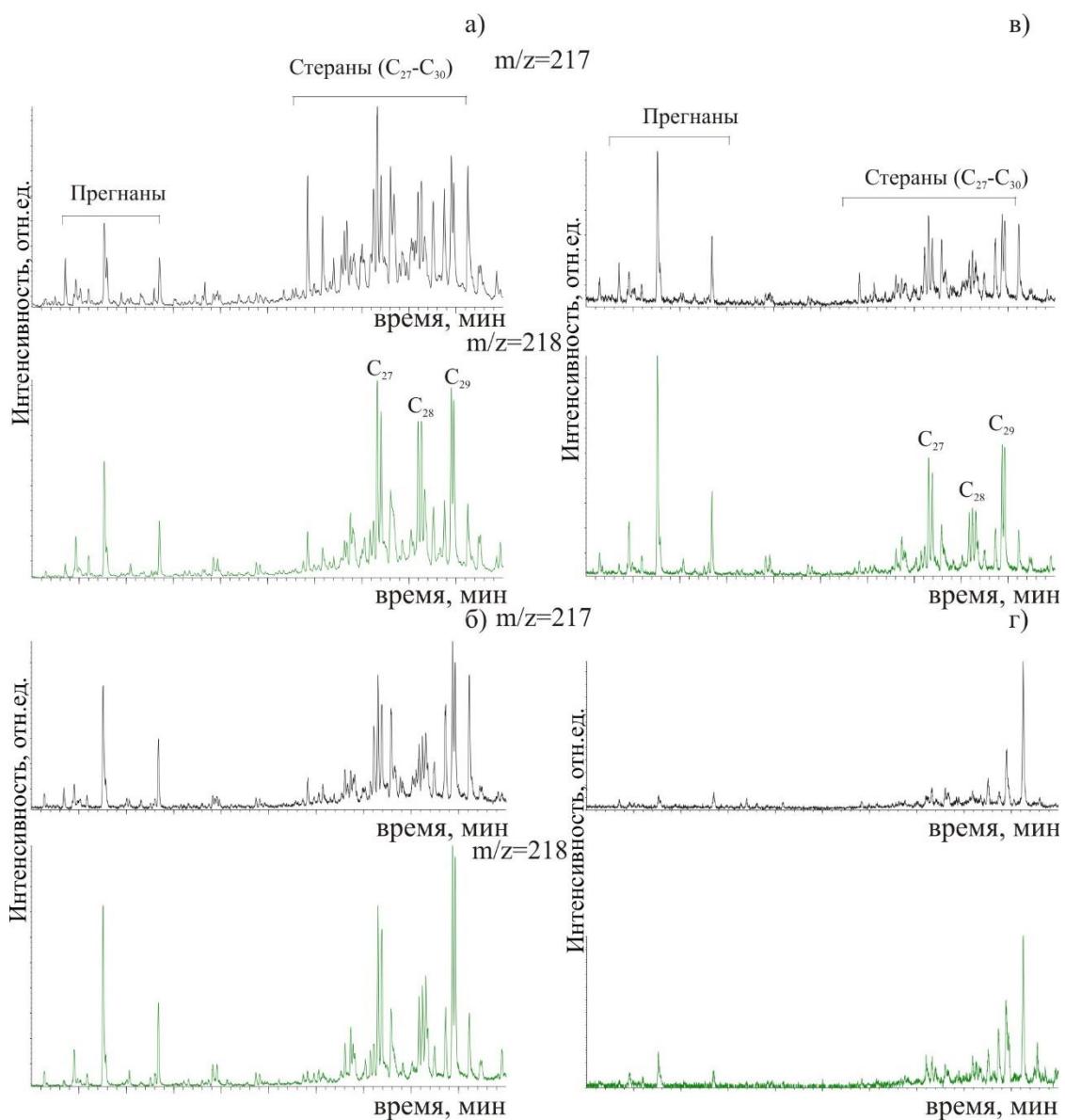


Рис. 6. Типовые масс-фрагментограммы стеранов ($m/z=217, 218$) насыщенной фракции битумоидов из пермских отложений.

Органическое вещество: а – аквагенное, б-г- террагенное.

свиты из скв. Гуримисская-1 и Хуродолахская-1 (рис. 6а, 8). Он отмечается также и в единичных образцах нижнекожевниковской свиты скв. Рыбинская-1 и тустахской свиты из скв. Гуримисская-1, Южно-Тигянская-1, Южно-Суолемская-10 (2 группа по распределению нормальных алканов) – рис. 4в, 5, 6а.

Этилхолестаны (C_{29}) в составе стеранов доминируют (до 75%) в битумоидах из скв. Восточная-1 нижнекожевниковской свиты и скв. Восточная-1, Нордвикская-41, 42 и Южно-Тигянская-1 тустахской свиты, где широкий максимум распределения нормальных алканов (рис. 6 б-в, 7).

Значение отношения стеранов C_{29}/C_{27} изменяется в нижнекожевниковской свите от 1,4 до 9,4 и до 5,9 в тустахской – рис. 8. Повышенные значения стеранов C_{29} (до 47,4%) характерны также для единичных образцов нижнепермских отложений скв. Южно-Тигянская с одномодальным распределением н-алканов. Стерановый индекс C_{29}/C_{27} в этих образцах изменяется от 1,2 до 1,4.

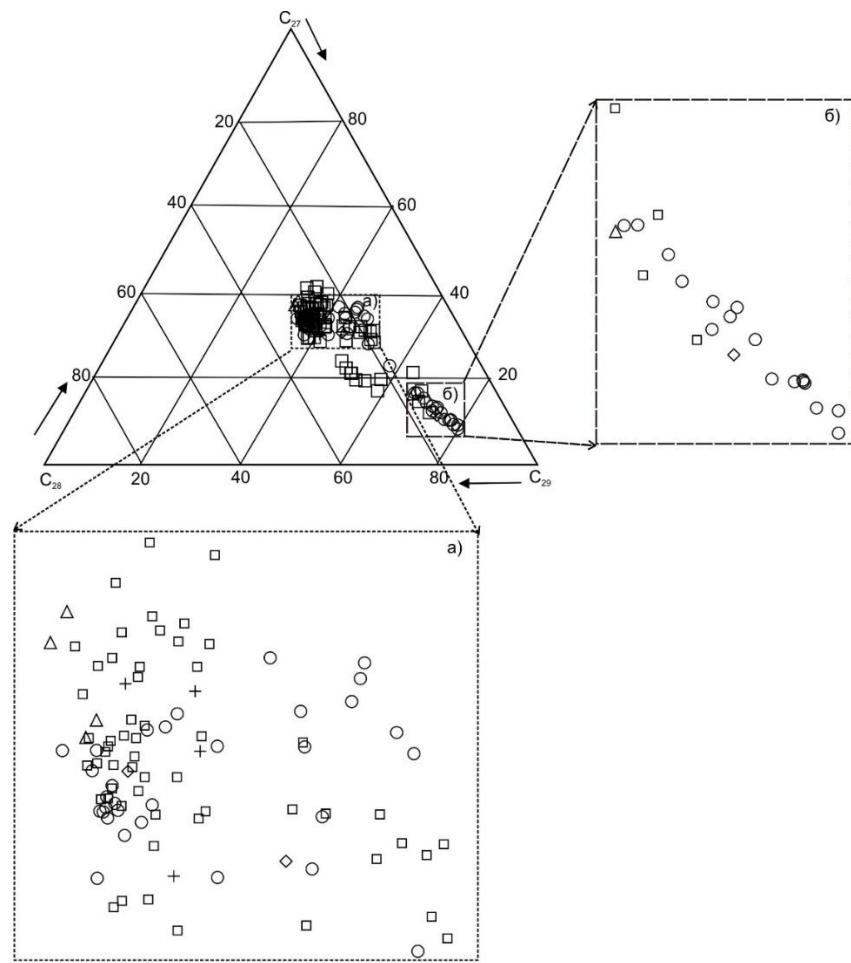


Рис. 7. Тригонограмма стеранов C_{27} - C_{29} в насыщенной фракции битумоидов из пермских отложений.

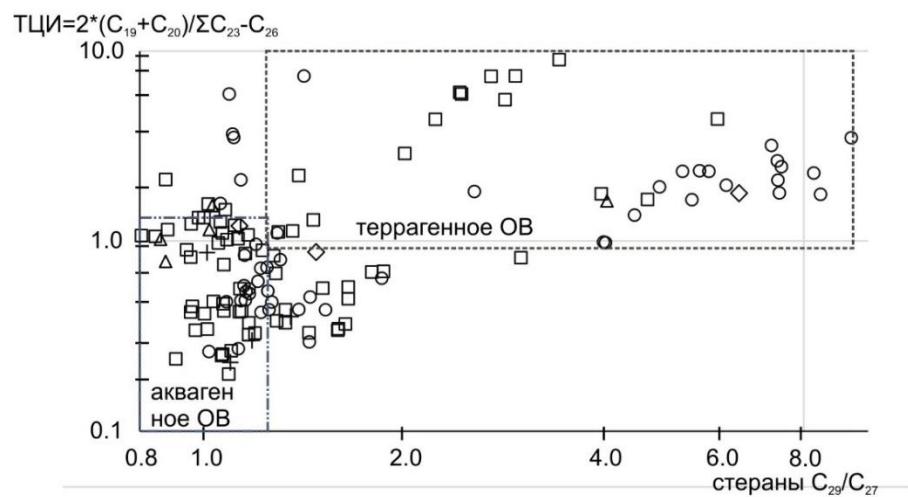


Рис. 8. Зависимость трициклического индекса (ТЦИ) от стеранового (C_{29}/C_{27}) в насыщенной фракции битумоидов из пермских отложений.

Среди терпанов в большинстве образцов в максимальной концентрации находятся гопаны (до 89,1 % от суммы терпанов) – рис. 9б-з. Их содержание варьирует от 50,1 до 78,8 % в битумоидах из нижнекожевниковской свиты и от 47,8 до 89,1 % – из тустахской. На трицикланы в них приходится от 1,7 до 46,4 % от суммы терпанов, при этом повышенные значения, как правило, характерны для параавтохтонных битумоидов. В единичных образцах тустахской свиты (автохтонные битумоиды скв. Северо-Суолемская-1 (1742,46 м), параавтохтонные битумоиды скв. Нордвикская-42 (1233,8 м), автохтонные и параавтохтонные битумоиды скв. Южно-Суолемской-10 (1518,58-1788,55 м)) отмечается доминирование трицикланов (50-70 % при концентрации гопанов 25,2-44,2% от суммы терпанов), свидетельствующее о большем вкладе аквагенного ОВ (рис. 9а). Среди гопанов и моретанов в максимальной концентрации находятся УВ С₃₀ (до 27,5 % от суммы гопанов и до 53,0 % от суммы моретанов). В нижнекожевниковской свите скв. Южно-Тигянская и Нордвикская-41 в составе гопанов и моретанов доминируют УВ С₂₉ (до 25,2 % от суммы гопанов и до 43,3 % от суммы моретанов) и идентифицированы 28, 30-бисноргопан С₂₈ и 25,30-бисноргопан С₂₈ (25,30-БНГ₂₈) (рис. 9б, д-з). В единичных битумоидах нижнекожевниковской свиты скв. Нордвикская и Южно-Тигянская отмечаются повышенные концентрации гаммацерана (рис. 9б, д). Среди трицикланов в большинстве образцов преобладают УВ С₂₃₋₂₆ (24,4-53,1 % от суммы трицикланов). Трициклановый индекс ($TCI=2*\Sigma C_{19-20}/\Sigma C_i (i = 23, 24, 25, 26)$), как правило, ≤ 1 (рис. 8). При повышенных значениях стеранов С₂₉ к С₂₇ (1,2-2,0) этот показатель изменяется от 0,3 до 7,4. Во всех битумоидах, где значения отношения стеранов С₂₉ к С₂₇ высокие ($\geq 2,0$) этот параметр выше 1,0.

Распределение ароматических соединений в составе нижнепермских битумоидов также свидетельствует о различии в обстановках формирования органического вещества (рис. 10). Так, в 89,7% образцов коллекции в максимальной концентрации (до 94-95%) идентифицируются фенантрены, что характерно для террагенного ОВ (рис. 10а, е). Однако, для битумоидов нижнекожевниковской свиты скв. Гуримисская-1, Южно-Тигянская-1, Хорудалахская-1, Нордвикская-41 и тустахской скв. Гуримисская-1, Рыбинская-1 Нордвикская-41, 42, Северо-Суолемская-1, Южно-Суолемская-10 отмечаются повышенные (>19%) содержания дибензотиофенов (рис. 10б), наличие которых говорит о процессах биохимического осернения липидов на ранних стадиях диагенеза, возможных лишь в высоко восстановительных условиях в осадке [Конторович и др., 2004]. Значения отношения фенантрены к дибензотиофенам изменяются в широких пределах от 1,2 до 47,7.

В единичных образцах тустахской свиты на Северо-Суолемской и Нордвикской площадей доминируют дибензотиофены (54-82%) – рис. 10в. Концентрация, триароматических стероидов в большинстве битумоидов меньше 10% и только на Нордвикской площади, как правило, значительно выше (18,5-38,1%), а на глубинах 456,65, 467,55м (скв. 41) и 592,5-593,3, 603,4м (в скв. 42) максимальная (43,0-57,9% и 37,3-49,3% соответственно) – рис. 10г. Значения отношения триароматические стероиды кmonoароматическим (ТАС/MАС) варьируют от 2 до 18 только в битумоидах тустахской свиты на Нордвикской площади, а в остальных образцах не превышают 5. Значительная роль триароматических стероидов в составе ароматической фракции битумоидов также может свидетельствовать о вкладе аквагенного ОВ.

Таким образом, для изученных битумоидов из нижнепермских отложений как в нижнекожевниковской, так и в тустахской свитах установленный разброс значений биомаркерных параметров подтверждает полигенный генотип органического вещества, хотя изотопный состав: δ¹³C= (-26,5) – (-22,0) ‰ и пиролитические характеристики – величины интегральные, предполагают III тип керогена. Полигенный генотип органического вещества на изучаемой территории определяется тем, что в раннепермское время «...в области Анабаро-Хатангской седловины находился своеобразный порог, разделявший области с разной степенью интенсивности погружения и являвшийся областью с повышенной ролью прибрежных и аллювиально-дельтовых фаций» [Афанасенков и др., 2018, стр. 7].

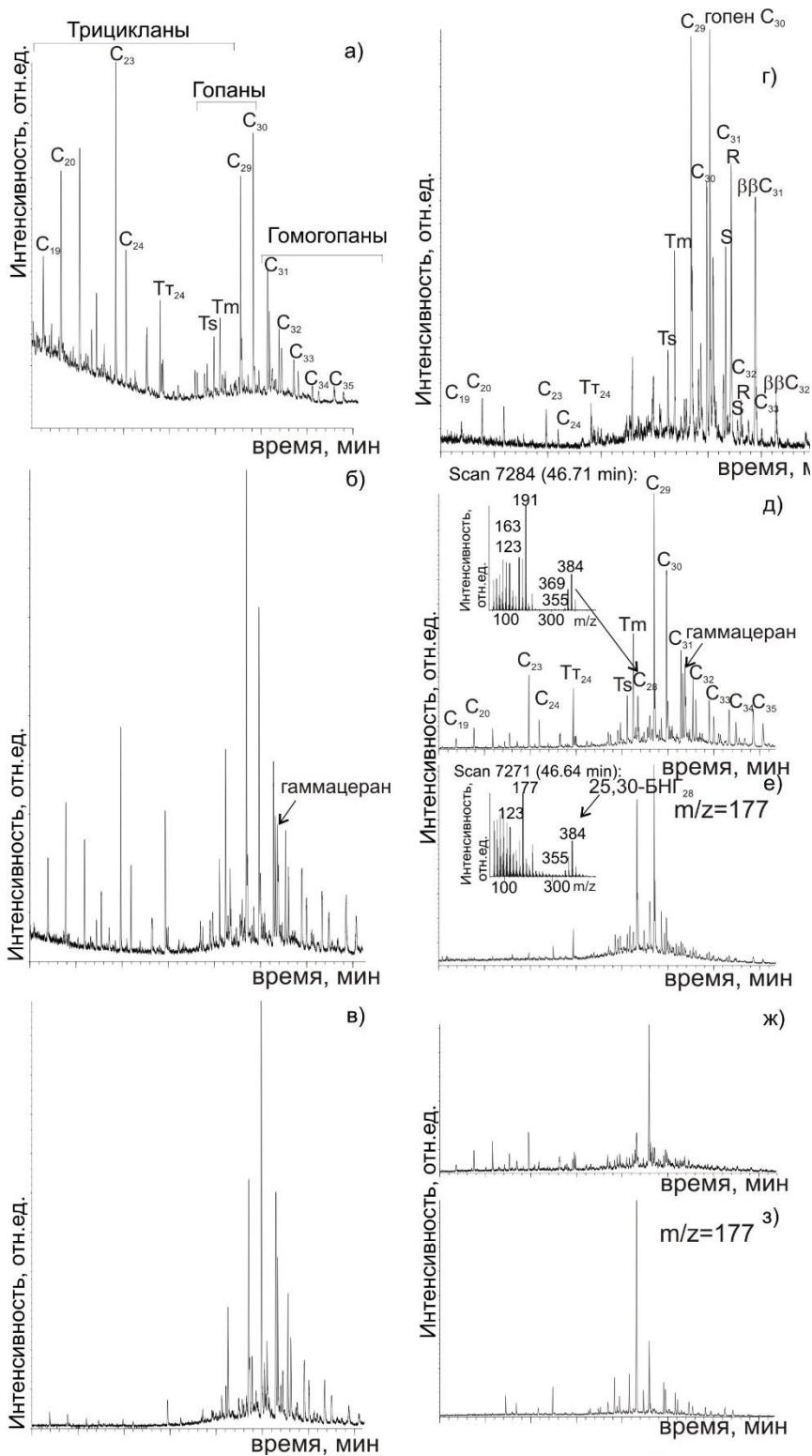


Рис. 9. Типовые масс-фрагментограммы терпанов ($m/z=191$) насыщенной фракции битумоидов из пермских отложений.

Органическое вещество: а, б - аквагенное, в-г - террагенное, д-з – биодеградированное;

$\beta\beta C_n$ – биогопаны, п- количество атомов углерода, $25,30\text{-БНГ}_{28}$ - бисноргопан C_{28} , Tt_{24} - тетрациклен C_{24} .

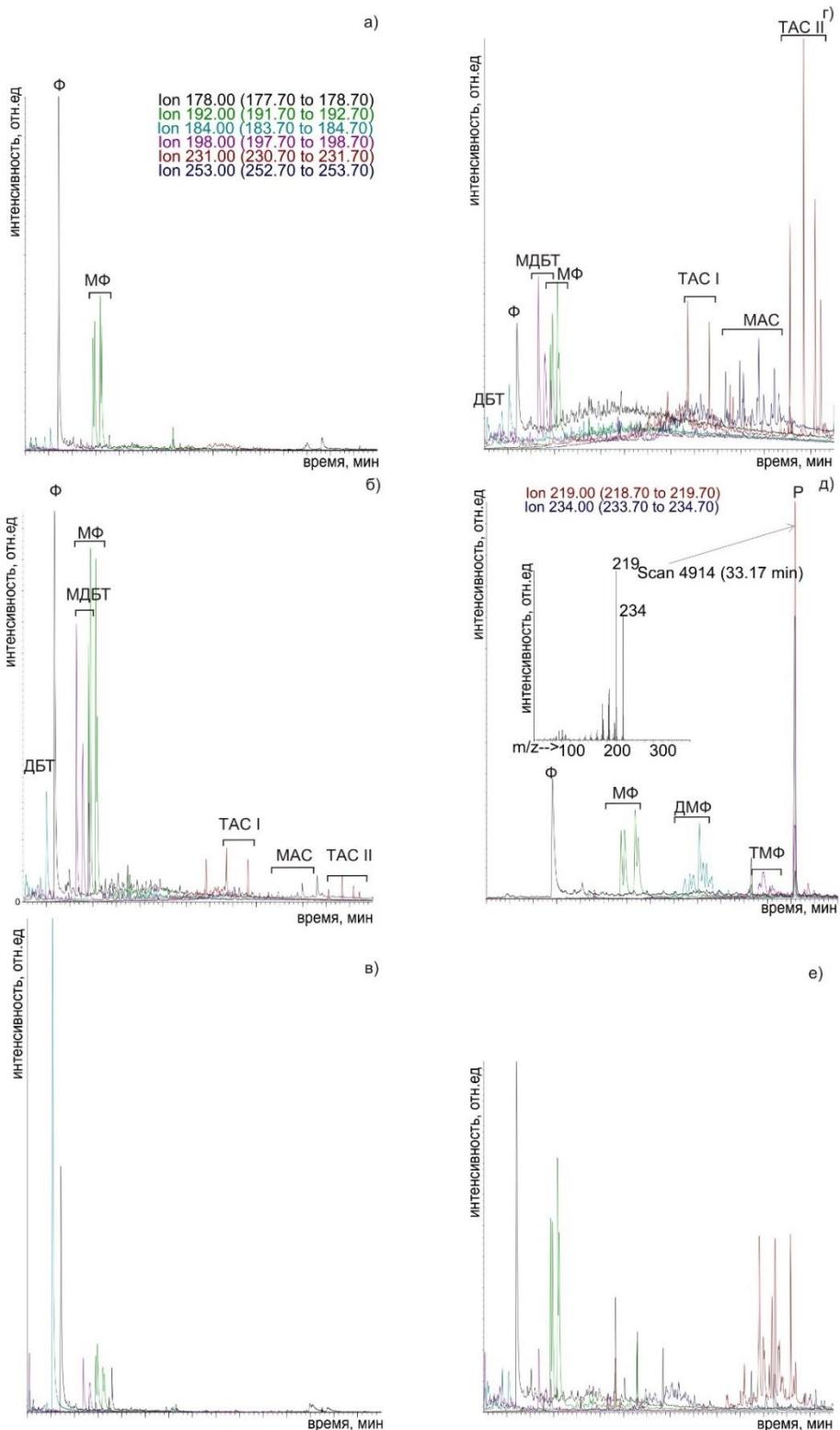


Рис. 10. Типовые масс-фрагментограммы фенантренов ($m/z=178, 192, 206, 219, 220, 234$), дибензотиофенов ($m/z=184, 198$),mono- и триароматических стероидов ($m/z=253, 231$ ароматической фракции битумоидов из пермских отложений.

Ф – фенантрен, МФ – метилфенантрены, ДМФ - диметилфенантрены, ТМФ - trimetil-fenantrenes, Р – ретен (1, 7, 8 ТМФ), ДБТ – дibenзотиофең, МДБТ – метилдibenзотиофеңы, МАС – monoароматические стероиды состава C₂₇-C₃₀; ТАС I – триароматические стероиды состава C₂₀ - C₂₁, ТАС II – триароматические стероиды состава C₂₆-C₂₈.

Органическое вещество: а, д, е – террагенное, б, в, г- аквагенное.

Для преимущественно аквагенного органического вещества нижнекожевниковской (скв. Гуримисская-1, Хорудалахская-1, большинства образцов скв. Северо-Суолемская-1, единичных скв. Южно-Тигянская-1, скв. Нордвикская-41) и тустахской (скв. Восточная-1 (2217-2237,5м), скв. Гуримисская-1, скв. Северо-Суолемская-1, скв. Южно-Суолемская-10, скв. Южно-Тигянская-1 (2768,33-3008,96м), скв. Нордвикская-41, 42) свит характерны следующие показатели: одномодальное распределение н-алканов, значения отношений н-C₂₇/н-C₁₇≤1,0, Pr/Ph<1,5, стеранов C₂₉/C₂₇<1,2, гомогопанов C₃₅/C₃₄ ≥1,0, хейлантанов 2*ΣC₁₉₋₂₀/ΣC_i (i = 23, 24, 25, 26) ≤ 1,15, концентрации трициклических соединений достигают 60% от суммы терпанов, идентификация гаммацерана, содержания дibenзотиофеңов≥20% от суммы ароматических соединений, отношение Ф/ДБТ≤3,0 (рис. 4а, б, 5, 6а, 7, 8, 9а, 10б, в, г).

Для преимущественно террагенного генотипа ОВ нижнепермских отложений (скв. Восточная-1 (2312,55-2608,75м), скв. Южно-Тигянская-1 (3013,65-3302,96м), Рыбинская-1, единичных образцов из скв. Нордвикская-41, 42), в которых, как правило, отмечается углистость, рассеянный углефицированный растительный детрит, широкий максимум распределения нормальных алканов и следующие значения показателей: н-C₂₇/н-C₁₇>1,0, Pr/Ph>1,5, стеранов C₂₉/C₂₇>1,2, гомогопанов C₃₅/C₃₄ <1,0, хейлантанов 2*ΣC₁₉₋₂₀/ΣC_i (i = 23, 24, 25, 26) >1,2, концентрации трициклических соединений <20,0 % от суммы терпанов, содержания дibenзотиофеңов<20% от суммы ароматических соединений, отношение Ф/ДБТ>3,0, а также идентификация ретена, концентрация которого превышает соединения фенантренового ряда (рис. 4в, 5, 6б, в, 7, 8, 9б, 10а, д, е).

Помимо битумоидов различного генотипа, среди нижнепермских битумоидов встречаются битумоиды биодеградированные, т.е. на хроматограммах видны нафтены, по [Петров, 1984] - нафтеновый «горб» и циклические УВ стеранового и терпанового рядов. Идентификация 25,30-биснор17α(Н)гопана C₂₈ в высоких концентрациях при m/z=177 является еще одним доказательством биодеградации (рис. 4д-е, 9д-е). Такие битумоиды зафиксированы в разрезах скв. Нордвикская-41, 42 (на глубинах 456,65, 467,55, 710,55, 752,05м и 592,5-593,3, 603,4 м соответственно) и скв. Южно-Тигянская -1 (1526,8, 1551,44, 1553,2, 1555,27м). На хроматограммах скв. Южно-Тигянской кроме вышеперечисленных соединений также идентифицируются изопреноиды и концентрация нормальных алканов сопоставима с терпановыми УВ, что свидетельствует о меньшей степени биодеградации (рис. 4д-е, 9д-е).

Среднепермские отложения. Для автохтонных битумоидов из нижнепермских отложений хромато-масс-спектрометрический анализ проведен для образцов из скв. Рыбинская-1 (Анабаро-Хатангская НГО) и скв. Волочанская-1 (Енисей-Хатангская НГО).

Для битумоида из скв. Рыбинская-1 характерно двумодальное распределение нормальных алканов с максимумами на н-C₁₇ и н-C₂₃ (12,05 % и 8,16 % на сумму нормальных алканов) и доминированием нечетных УВ над четными в области C₂₅-C₂₉ (рис. 4в). Отношение четных УВ к нечетным (CPI) = 1,3. В составе стеранов доминируют углеводороды C₂₉ (64,9 %), значения отношения стеранов C₂₉/C₂₇ равно 4 (рис. 6б, 7, 8). В составе терпанов в максимальной концентрации находятся гопаны (66,9% от суммы терпанов), содержание трициклических соединений - 15,2% (рис. 9в). Среди гопанов и моретанов в максимальной концентрации находится УВ C₃₀ (26,2% и 37,1% соответственно). В составе трициклических соединений доминирование высокомолекулярных УВ C₂₈-C₃₁ (38,9%). Трициклический индекс (ТЦИ) в этом образце равен 1,6 (рис. 8).

В волочанских битумоидах кривая распределения нормальных алканов одномодальная с максимумом на УВ C₁₇ (10,9-21,1% на сумму нормальных алканов) – рис. 4а. Соотношение н-алканов C₂₇/C₁₇ в битумоидах меньше 0,3. Значения CPI находятся в интервале значений 1,1-1,2. Отношение пристана к фитану не превышает 1,3. Из зависимости Pr/h-C₁₇ от Ph/h-C₁₈ (диаграмма Коннана-Кассоу) видно, что битумоиды находятся близко к границе аквагенного и смешанного ОВ (рис. 5). В составе стеранов доминируют углеводороды C₂₇ (35,6%), отношение C₂₉/C₂₇ < 1.0 (рис. 6а, 7, 8). Среди терпанов преобладают гопаны (54,6-74,4 % от суммы терпанов), концентрации трицикланов достигают 20,7-40,5 % (рис. 9в). Среди гопанов и моретанов в максимальной концентрации находится УВ C₃₀ (22,8-25,6% и 34,6-54,2% соответственно). В составе трицикланов преобладают углеводороды со средней длиной цепи C₂₃-C₂₆ (31,6-42,9%). ТЦИ изменяется от 0,8 до 1,2.

В ароматической фракции битумоидов как из Рыбинской, так и Волочанской скважин, среди идентифицируемых соединений до 92,5-94,1% приходится на фенантрены, моно- и триароматические стероиды не определены (рис. 10а). Значения отношения фенантрены к дибензотиофенам изменяется от 12 до 16.

Таким образом, для изученных среднепермских битумоидов биомаркерные параметры (отношения: h-C₂₇/h-C₁₇≤0,3, Pr/Ph=1,1-1,4, стеранов C₂₉/C₂₇=0,9-4,0, хейлантанов ТЦИ=2*ΣC₁₉₋₂₀/ΣC_i (i = 23, 24, 25, 26), повышенные концентрации трицикланов =16,4-40,5% от суммы терпанов, Ф/ДБТ=12-16%) свидетельствуют об аквагенно-террагенном ОВ, при большей доле аквагенной составляющей в волочанских битумоидах.

Верхнепермские отложения. Углеводородный состав битумоидов из отложений мисайлапской свиты верхнепермского возраста определен для образцов из скв. Рыбинская-1 и Волочанская-1.

Как и для экстрактов из среднепермских пород для мисайлапских битумодов из скв. Рыбинская-1 в распределении нормальных алканов характерен широкий максимум h-C₁₇-h-C₂₇ (8-12 % на сумму нормальных алканов) с преобладанием C₁₇ в низкомолекулярной области и нечетных УВ C₂₃, C₂₅, C₂₇ в высокомолекулярной области (рис. 4г). Кривая распределения нормальных алканов волочанских битумоидов одномодальная с максимумом на УВ C₁₇ (13,37% на сумму нормальных алканов) – рис. 4а. Соотношение н. алканов C₂₇/C₁₇ в битумоидах варьирует от 0,3 в волочанском до 0,7-1,2 в рыбинских битумоидах. Коэффициент CPI изменяется от 1,1 в волочанском битумоиде до 1,3-2,4 в рыбинских. Отношение пристана к фитану в битумоидах меньше 1,3. Из зависимости Pr/h-C₁₇ от Ph/h-C₁₈ (диаграмма Коннана-Кассоу) видно, что битумоиды находятся на границе 2 областей смешанного и аквагенного ОВ (рис. 5).

В составе стеранов доминируют углеводороды C₂₉ (35,4-72,1% от суммы стеранов соответственно) - рис. 6б, 7. Значения отношения стеранов C₂₉ к C₂₇ изменяются от 1,1 в волочанских битумоидах до 1,5-6,4 в рыбинских (рис. 8).

В составе терпанов в максимальной концентрации находятся гопаны (45,2-68,6 % от суммы терпанов) – рис. 9в. Содержание трицикланов в мисайлапских битумоидах варьирует от 14,6 до 44,2% от суммы терпанов в рыбинских и равно 23% в волочанском. Среди гопанов и моретанов в максимальной концентрации находится УВ C₃₀ (26,9-32,2% и 33,8-55,6% соответственно). Для битумоидов из скв. Рыбинская-1 (1045,5м) и Волочанская-1 отмечается доминирование УВ со средней длиной цепи C₂₃-C₂₆, а для Рыбинской -1 (1046,9м) высокомолекулярных C₂₈-C₃₁ (35,2-40,3% и 39,5% соответственно). Трициклановый индекс изменяется от 0,8-1,0 в битумоидах с доминированием трицикланов C₂₃-C₂₆ до 1,5 в рыбинском (1046,9м) – рис. 8.

В составе ароматической фракции среди идентифицируемых соединений до 91,8 приходится на фенантрены (рис. 10а). Значения отношения фенантрены к дибензотиофенам изменяется от 3,9-6,5 в рыбинских до 11,2 в волочанском битумоидах. Содержание триароматических стероидов относительно моноароматических в рыбинских битумоидах с глубиной уменьшается (ТАС/MAC=0,2-1,3). Моно- и триароматические стероиды в волочанском битумоиде не определены.

Таким образом, для изученных верхнепермских битумоидов биомаркерные параметры (отношения: $\text{h-C}_{27}/\text{h-C}_{17} \leq 1,2$, $\text{Pr/Ph} = 1,2-1,5$, стеранов $C_{29}/C_{27} = 1,1-6,4$, хейлантанов $2*\Sigma C_{19-20}/\Sigma C_i$ ($i = 23, 24, 25, 26$) = 0,8-1,5, повышенные концентрации трициклических терпеноидов = 15-44% от суммы терпанов, $\Phi/\Delta T = 3,9-11,2$, $\text{TAC/MAC} = 0,2-1,3$) свидетельствуют об аквагенно-террагенном ОВ.

Зрелость ОВ

Преобразованность органического вещества пермских отложений определена по комплексу геохимических показателей: пиролитических (значения температуры максимального выхода (T_{max}) пика S_2), биомаркерных (соотношение трисноргопанов Ts/Tm , отношения изомеров стеранов C_{29} (20S/20R, 20S/20S+20R, $\alpha\alpha 20S/\alpha\alpha 20R$), ТАСИ, MPI, 4МДБТ/1МДБТ и т.д.), углепетрографических (определения значений отражательной способности витринита А.Н. Фомина [Фомин, 2024]).

Нижнепермские отложения. Значения пиролитического показателя T_{max} в нижнепермских образцах изменяются от 440 °C в нижнекожевниковской свите и 448 °C в тустахской свите до ≥ 600 °C, что соответствует стадиям катагенеза от МК₁² – МК₂ до АК, что согласуется с данными по отражательной способности витринита [Фомин, 2024 и др.]. По пиролитическим и углепетрографическим определениям нижнепермские отложения не вышли из главной зоны нефтеобразования на Нордвикской и Южно-Суолемской площадях [Фомин, 2024 и др.]. По молекулярным показателям (значения соотношений концентраций трисноргопанов (C_{27}) Ts/Tm , а также 20S/20R, 20S/20S+20R, $\alpha\alpha 20S/\alpha\alpha 20R$ в этилхолестанах (C_{29})) и ароматической (ТАСИ, MPI) фракций меньше или равно единице, а также 4МДБТ/1МДБТ ≤ 22) преобразованность ОВ в нижнепермских отложениях ниже, чем по пиролитическим и углепетрографическим определениям, и соответствует концу главной зоны нефтеобразования – началу глубинной зоны газообразования (рис. 4а-в, 7, 9а-в, 10) [Фомин, 2024 и др.].

В среднепермских образцах значения T_{max} изменяются от 438 °C до 540 °C, что соответствует стадиям катагенеза от МК₁² до АК и согласуется с определениями отражательной способности витринита [Фомин, 2024 и др.]. По биомаркерным параметрам (значительное отличие от P_1 в показателе 4МДБТ/1МДБТ ≤ 6) зрелость органического вещества соответствует стадии катагенеза не выше МК₁², что значительно ниже, особенно в скв. Волочанская-1, чем по пиролитическим и углепетрографическим определениям и соответствует главной фазе нефтеобразования (рис. 4а-в, 7, 9а-в, 10) [Фомин, 2024 и др.].

В верхнепермских отложениях органическое вещество находится на стадии катагенеза от МК₁¹ до МК₁³ по пиролитическим и углепетрографическим данным (T_{max} от 432 °C до 450 °C, [Фомин, 2024]), и стадии МК₁¹-МК₁² – по биомаркерным показателям (коэффициент CPI = 1,1-2,4, повышенные значения биостеранов, биогопаны, гопен, $Ts/Tm = 0,2-0,4$, 4МДБТ/1МДБТ = 2-4) (рис. 4г, 9г, 10е). В битумоидах Рыбинской площади идентифицированы также биогопаны и гопен (рис. 9г), характерные для незрелого органического вещества, что, по-видимому, объясняется окислительно-восстановительными условиями его формирования в диагенезе [Moldowan et al., 1986].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ особенностей состава и строения органического вещества карбон-пермских отложений Анабаро-Хатангской НГО и сопредельной территории показал, что породы в изученном разрезе, в целом, характеризуются невысоким содержанием и низким качеством органического вещества ($C_{org} < 1\%$ породу, $\text{HI} < 100 \text{ mgUV/gC}_{org}$), пониженной степенью его битуминозности (в 96% образцов $\beta < 5\%$). Исключение составляют терригенные породы нижнекожевниковской и тустахской свит раннепермского возраста, в которых в большинстве образцов нефтегенерационный потенциал по содержанию C_{org} (1,0-2,5%) варьирует от умеренного до богатого при бедном водородном индексе ($\text{HI} \leq 150 \text{ mgUV/gC}_{org}$). По-видимому, такие значения обусловлены тем, что на сегодняшний день породы уже реализовали свой нефтегенерационный потенциал.

Зрелость органического вещества в изученном разрезе по комплексу геохимических параметров (пиролитических, углепетрографических, биомаркерных), изменяется от градации МК₁¹-МК₁³ (верхняя пермь) до МК₁²-АК (нижняя пермь).

Нафтиды (битумоиды), содержащиеся в породах карбон-пермских отложений, по своему групповому составу в совокупности со степенью битуминозности пород и значениям пиролитических показателей S₁ и S₂, дифференцированы на аллохтонные (миграционные), параавтохтонные (перемещенные в пределах одной толщи) и автохтонные (сингенетичные). Первые характерны для пород каменноугольного возраста (скв. Рыбинская-1, Южно-Суолемская) и единичных нижнепермских образцов (скв. Северо-Суолемская-1 (1501,5м), Гуримисская-1 (1136,5м), Южно-Тигянская (1530,2м)); вторые – для пород раннепермского возраста. Автохтонные битумоиды распространены по всему разрезу (кроме карбона).

Анализ молекулярного состава автохтонных и параавтохтонных битумоидов показал, что органическое вещество пермских отложений полигенно по всему разрезу: и в нижне-, и в средне-, и в верхнепермских отложениях интервалы с преимущественно аквагенным органическим веществом перемежаются с породами, содержащими смешанное и/или преимущественно континентальное (в нижнепермских отложениях) органическое вещество.

В разрезах раннепермского возраста (скв. Южно-Тигянская, Нордвикская) встречаются битумоиды со следами биодеградации: при низких концентрациях нормальных алканов на хроматограммах видны нафтены («нафтеновый горб»), хорошо идентифицируемые циклические УВ гопанового ряда, при m/z=177 высокие концентрации 25,30-бисноргопана C₂₈. Степень биодеградации южно-тигянских битумоидов ниже нордвикских. Еще одна особенность этих битумоидов заключается в том, что в единичных образцах нижнекожевниковой свиты в повышенных концентрациях, также как в нефтях Нордвикского и Южно-Тигянского месторождений, идентифицируется гаммацеран – маркер солоноватоводных условий формирования, что, по-видимому, объясняется незначительными миграционными процессами из девонских отложений.

Таким образом, особенности состава органического вещества пермских отложений Анабаро-Хатангской НГО доказывают, что оно может быть одним из основных источников нафтидов на изучаемой территории, что и предполагалось исследователями [Грамберг, 1958; Калинко, 1958; Степаненко, 1981, 1983, 1986; Пронкин и др., 2013; Соболев и др., 2019; Фомин, 2024; Ларичев и др., 2024; Конторович и др., 2024 и др.].

Перспективы дальнейшей разработки темы. В отдельной статье будут рассмотрены результаты изучения органического вещества из отобранных в нижнекожевниковой свите нефтенасыщенных песчаников скв. Южно-Тигянская-1 (1542,35-1543,46м, 1556,64-1586,7м и 1593,78-1595,55м) и алевролитов скв. Северо-Суолемская-4 (1348,2м), а из нижнепермских разрезов песчаников и алевролитов с характерным запахом углеводородов скв. Гуримисская-1, Нордвикская-41, 42 и аллохтонных битумоидов, что позволит более достоверно оценить перспективность пермских отложений Анабаро-Хатангской НГО.

ФИНАНСИРОВАНИЕ И БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта FWZZ-2026-0043 тема проекта ГЗ 26-29 «Геолого-геохимические модели разноранговых объектов осадочных бассейнов протерозоя и фанерозоя Сибири, включая арктические регионы, как основа для создания приоритетной ресурсной базы и эффективной переработки углеводородного сырья».

ЛИТЕРАТУРА

- Афанасенков А.П., Бордюг А.В., Никишин А.М., Танинская Н.В., Шиманский В.В., Бордунов В.В. (2018). Уточнение палеогеографии севера Сибирской платформы с учетом новых данных // Геология нефти и газа, № 2, с. 5–23, DOI: 10.31087/0016-7894-2018-2-5-23.

- Грамберг И.С. (1958).** Геохимические исследования как один из методов поисков генетических признаков нефтематеринских толщ (на примере Арктических районов СССР) / Нефтегазоносность севера Сибири. Труды НИИГА, Ленинград: Гостоптехиздат, т.92, с. 171–182.
- Девятов В.П., Савченко В.И. (2012).** Новые данные к переоценке ресурсов углеводородов Анабаро-Хатангской нефтегазоносной области // Геология нефти и газа, №1, с. 55–61.
- Калинко М.К. (1958).** Перспективы нефтегазоносности севера Средней Сибири// Нефтегазоносность севера Сибири. Труды НИИГА, Ленинград: Гостоптехиздат, т. 92, с. 183–214.
- Калинко М.К. (1959).** История геологического развития и перспективы нефтегазоносности Хатангской впадины. Ленинград: Гостоптехиздат, 1959, 360с.
- Каширцев В.А., Ким Н.С., Фурсенко Е.А., Дзюба О.С., Фомин А.Н., Чалая О.Н. (2013).** Генезис нефтей и нефтепроявлений Анабаро-Хатангской седловины (арктический сектор Сибирской платформы) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, № 1, с. 54–63.
- Каширцев В.А., Конторович А.Э., Филип Р.П., Чалая О.Н., Зуева И.Н., Меметова Н.П. (1999).** Биомаркеры в нефтях восточных районов Сибирской платформы как индикаторы условий формирования нефтепроизводивших отложений // Геология и геофизика, т.40, №11, с. 1700–1710.
- Конторович А.Э., Меленевский В.Н., Иванова Е.Н., Фомин А.Н. (2004).** Фенантрены, ароматические стераны и дibenзотиофены в юрских отложениях Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна и их значение для органической геохимии // Геология и геофизика, т. 45, № 7, с. 873–883.
- Конторович А.Э., Меленевский В.Н., Фомичев А.С., Шведенков Г.Ю. (1986).** Пиролиз как метод изучения нефтегазогенерационного потенциала материнских пород// Геология нефти и газа, № 12, с. 36–41.
- Конторович В.А., Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Калинин А.Ю., Калинина Л.М., Костырева Е.А., Мельник Д.С., Моисеев С.А., Парфенова Т.М., Сафонов П.И., Соловьев М.В., Фомин А.Н., Фурсенко Е.А. (2024).** Геологическое строение, нефтегазоносность, ресурсы углеводородов и направления геологоразведочных работ на северо-восточной континентальной окраине Сибирской платформы (Анабаро-Хатанская и Лено-Анабарская НГО) // Геология и геофизика, т.65, №6, с.823–849, DOI: 10.15372/GIG2023184
- Костырева Е.А. (2005).** Геохимия и генезис палеозойских нефтей юго-востока Западной Сибири. Новосибирск: СО РАН, филиал «Гео», 183с.
- Костырева Е.А., Конторович А.Э., Сотнич И.С. (2025).** Битумоиды в кембрии Предъединесейского суббассейна: обстановки формирования, критерии выделения // Геология и геофизика, т.66, №4, с.490–500, DOI: 10.15372/GIG2025165
- Кринин В.А. (2011).** О генезисе нафтидов на севере Сибирской платформы // Горные ведомости, №12, с.24–31.
- Ларичев А.И., Бостриков О.И., Хабаров А.Н. (2024).** Условия нефтегазообразования, формирования и разрушения скоплений УВ в пермских отложениях северо-западной части Анабаро-Хатангской НГО // Геология и геофизика, т. 65, №8, с. 1115–1129, DOI: 10.15372/GIG2024101
- Лопатин Н.В., Емец Т.П., Симоненкова О.И., Галушкин Ю.И. (1997).** Об источнике нефтей, обнаруженных в коре выветривания и кровле палеозойского фундамента на площадях Среднего Приобья // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений, №7, с. 5–22.
- Мазитов М.Р., Качкин А.А., Скачек К.Г., Ларичев А.И., Бостриков О.И., Хабаров А.Н., Семенова З.А. (2017).** Геолого-геохимические критерии нефтегазоносности Анабаро-Хатангской седловины // Нефтегазовая геология. Теория и практика, т.12, №4, 22 с. http://www.ngtp.ru/tub/1/43_2017.pdf
- Недра Арктики (1946).** Главный редактор акад. Обручев В.А. Ленинград: Главсевморпуть, т.1, 241 с.
- Петров Ал.А. (1984).** Углеводороды нефти. М.:Наука, 263с.
- Пронкин А.П., Савченко В.И., Шумский Б.В. (2013).** Перспективы нефтегазоносности Хатангского района // Offshore (Russia), сентябрь, с. 18–22.
- Соболев П.Н., Лежнин Д.С., Панарин И.А., Гаврилова Е.Н., Пименова А.М. (2019).** Геохимические критерии нефтегазоносности рифей-палеозойских отложений Лено-Анабарского регионального прогиба и сопредельных территорий // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, №8(332), с. 62–74, DOI: 10.30713/2413-5011-2019-8(332)-62-74
- Степаненко Г.Ф. (1983).** Закономерности распределения органического вещества в пермских отложениях Анабаро-Хатангского междуречья / Геохимические и гидрологические предпосылки поисков нефти и газа в Сибири, редакторы Гуарри Ф.Г., Конторович А.Э. Новосибирск: СНИИГГиМС, с. 54–60.

- Степаненко Г.Ф. (1981).** Геохимические особенности нафтидов полуострова Урюнг-Тумус (Нордвик) / Органическая геохимия мезозойских и палеозойских отложений Сибири, отв. редакторы Конторович А.Э., Фомичев А.С. Новосибирск: СНИИГГиМС, вып.288, с.171–178.
- Степаненко Г.Ф. (1986).** Геохимическая характеристика органического вещества и нафтидов осадочного чехла Анабаро-Хатангской седловины (в связи с газонефтеноносностью) / Геохимические критерии формирования зон нефтегазонакопления в платформенных областях Сибири, редакторы Ларичев А.И., Полякова И.Д. Новосибирск: СНИИГГиМС, с. 52-58.
- Фомин А.Н. (2024).** Катагенез органического вещества и перспективы нефтегазоносности протерозойских и фанерозойских отложений Анабаро-Хатангской седловины // Геология и геофизика, т.65, №11, с. 1600–1608, DOI: 10.15372/GIG2024136
- Moldowan J.M., Sundararaman P., Schoell M. (1986).** Sensitivity of biomarker properties to depositional environment and/or source input in the Lower Toarcian of SW-Germany // Organic Geochemistry, vol.10, №4-6, p. 915–926, DOI: 10.1016/S0146-6380(86)80029-8