

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ  
ИМ. А.А. ТРОФИМУКА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*

МЕЛЬНИК ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ОРГАНИЧЕСКАЯ ГЕОХИМИЯ ПОРОД ВЕНДА  
(СЕВЕРО-ВОСТОК СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ)**

1.6.11 – Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых  
месторождений

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель  
Парфенова Татьяна Михайловна  
канд. геол.-минерал. наук

Новосибирск

2023

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Глава 1. ИЗУЧЕННОСТЬ ВЕНДА СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ .....	14
1.1 Геолого-географическая характеристика.....	14
1.2 Литолого-стратиграфическая характеристика венда .....	22
1.3 Геохимия пород и органического вещества вендских отложений .....	39
1.4 Условия и обстановки осадконакопления в вендское время .....	47
1.5 Нефтегазоносность вендских и кембрийских отложений и геохимия нафтидов .....	54
Глава 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	63
Глава 3. ЛИТОЛОГО-СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД ВЕНДА СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО МАТЕРИАЛАМ ИЗ ОБНАЖЕНИЙ БАССЕЙНА р. ХОРБУСУОНКА И НИЗОВЬЕВ р. ЛЕНА.....	78
Глава 4. ГЕОХИМИЯ ПОРОД И ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ВЕНДСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ .....	91
4.1 Распределение органического углерода в породах и его изотопный состав .	91
4.2 Пиролитические характеристики органического вещества пород .....	98
4.3 Битуминологические характеристики пород.....	104
4.4 Состав и распределение алканов, стеранов, терпанов метано-нафтеновых фракций битумоидов и нафтидов.....	111
4.5 Состав нафтено-ароматических фракций битумоидов .....	130
Глава 5. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ И ОБСТАНОВКИ НАКОПЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ВЕНДСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ .....	145
Глава 6. ОЦЕНКА ПОРОД ВЕНДА КАК ИСТОЧНИКА УГЛЕВОДОРОДОВ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ.....	160
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	176
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	178
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА .....	214
СПИСОК ТАБЛИЦ.....	220

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.** Для устойчивого развития топливно-энергетического комплекса России необходимо наращивание ресурсной базы и открытие новых месторождений углеводородов (УВ). Оценка нефтегазоносности Арктического сектора Восточной Сибири и шельфа моря Лаптевых проводится еще с первой половины XX века [Гусев, 1950; Грамберг, 1958, 1968; Кабаньков, 1958; Грамберг и др., 1961, 1974; Натапов и др., 1968; Баженова и др., 1979, 1981; Бакин и др., 1981; Геология нефти..., 1981; Гольдберг, 1981; Конторович и др., 1981; Гребенюк и др., 1985; Каширцев, 1988 и др.]. В настоящее время эта территория остается объектом комплексного геологического, геофизического и геохимического изучения осадочного чехла для поиска промышленных скоплений нефти и газа [Ступакова и др., 2013, 2017; Баженова и др., 2014; Конторович и др., 2014, 2020, 2021; Полякова, Борукаев, 2017; Каширцев и др., 2019; Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2020, 2021; Найденов, 2021]. Региональный этап геологоразведочных работ включает поиск и изучение потенциально нефтематеринских пород и нефтидов [Успенский, 1957; Неручев, 1962; Вассоевич, 1967; Конторович и др., 1967; Конторович, 1976; Тиссо, Вельте, 1981; Конторович и др., 1994а, 1994б; Филипцов и др., 1999, 2014; Peters et al., 2005; Баженова и др., 2014].

В мире продолжает расти интерес к докембрийским источникам нефти и газа. Признанию их высокого потенциала способствовали открытия промышленных скоплений УВ в докембрийских и нижнепалеозойских отложениях Сибирской, Аравийской, Южно-Китайской платформ. Как показывает практика, исследование органической геохимии отложений неопротерозоя играет важную роль в оценке нефтегазоносности осадочных бассейнов России, Китая, Австралии, стран Северной и Южной Америки, Африки [Конторович и др., 1996, 2005; Тимошина, 2005; Peters et al., 2005; Grosjean et al., 2009; Craig et al., 2009, 2013; Kelly et al., 2011; Bhat et al., 2012; Баженова и др., 2014; Zeng et al., 2016; Shi et al., 2018; Соболев и др., 2019].

Вопрос о роли пород венда в качестве потенциально нефтематеринских на территории Сибирской платформы остается дискуссионным [Конторович и др., 1994а, 1994б; Филипцов и др., 1999, 2014; Дахнова и др., 2014; Баженова и др., 2014; Соболев и др., 2019]. Генетические связи между рассеянным органическим веществом (ОВ) потенциально нефтематеринских пород венда и нефтидами установлены в южных и восточных районах платформы [Каширцев, 2003, 2004; Каширцев и др., 2009а; Тимошина, 2005; Парфенова и др., 2010; Соболев и др., 2013, 2017; Баженова и др., 2011, 2014; Дахнова и др., 2014; Филипцов и др., 2014; Баженова, 2016; Иванова, 2016].

На северо-востоке Сибирской платформы в разрезе венда выделяется хатыспытская свита Оленекского поднятия и хараютэхская свита Хараулахского выступа. Породы этих отложений с 1950-х годов рассматриваются в качестве потенциально нефтематеринских [Грамберг, 1958; Виноградов, 1962; Натапов, 1962; Коробов, 1963; Крылов и др., 1971; Баженова и др., 1981]. Однако, границы распространения первично обогащенных и обедненных ОВ пород по латерали не определены. Особенности состава пород и компонентов ОВ, а также закономерности распределения углеводородов-биомаркеров метано-нафтеновых и нафтено-ароматических фракций битумоидов современными методами изучены недостаточно [Грамберг, 1958; Натапов, 1962; Баженова и др., 1981; Конторович и др., 1995; Каширцев, 2003, 2004; Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021].

**Объект исследования** – вендские отложения северо-востока Сибирской платформы: хатыспытская свита Оленекского поднятия Анабарской антеклизы и хараютэхская свита Хараулахского выступа северной части Предверхоянского краевого прогиба.

**Цель** – установить распределение в разрезе и природу органического вещества в породах венда, выявить факторы, контролирующие содержание и состав компонентов органического вещества, оценить породы хатыспытской и хараютэхской свит как возможный источник нефти и газа на северо-востоке Сибирской платформы.

**Научная задача** – с использованием комплекса физико-химических методов определить содержание органического вещества в породах хатыспытской и хараютэхской свит, состав его компонентов, условия формирования, тип и катагенез, оценить генерационный потенциал пород, выявить природу битумоидов и битумов.

**Этапы исследования:**

1. Изучение и обобщение опубликованных материалов о геологическом строении региона, в том числе результатов стратиграфических, литологических, геохимических исследований пород и ОВ вендских отложений северо-востока Сибирской платформы.

2. Сбор нового геологического материала в ходе экспедиционных работ на Оленекском поднятии, его анализ современными физико-химическими методами.

3. Анализ и обобщение результатов геохимического исследования пород и ОВ хатыспытской и хараютэхской свит.

4. Интерпретация результатов исследования геолого-геохимического материала: анализ содержания и распределения ОВ в породах; определение типа и зрелости ОВ; диагностика первичной миграции битумоидов; выявление особенностей состава и распределения насыщенных УВ и ароматических соединений битумоидов; реконструкция обстановок осадконакопления.

5. На основе полученных результатов исследования органической геохимии и обобщения опубликованных сведений по строению осадочного чехла оценить породы венда в качестве потенциально нефтематеринских, рассмотреть геохимические предпосылки нефтегазоносности венда и нижнего кембрия северо-востока Сибирской платформы.

**Научная новизна.** Впервые детально изучено распространение обедненных и обогащенных ОВ пород в разрезах венда северо-востока Сибирской платформы. Установлено, что хатыспытская свита неравномерно обогащена ОВ. Тонкоплитчатые и листоватые карбонатно-глинисто-кремнистые породы с аномально высоким содержанием ОВ (~10%) обнаружены в маломощном интервале в нижней части второй подсвиты. Породы с повышенным содержанием

ОВ ( $>0,2\%$ , до  $4,4\%$ ) распространены в верхней части второй подсвиты, в средней части третьей подсвиты и в четвертой подсвите. Обеднены ОВ ( $<0,2\%$ ), как правило, породы верхней части третьей подсвиты. Карбонатные и карбонатно-кремнистые породы средней подсвиты хараютэхской свиты обогащены рассеянным ОВ (обычно  $>0,4\%$ , до  $2,6\%$ ).

Впервые методом рентгено-флюоресцентного анализа определены содержания основных породообразующих оксидов в породах хатыспытской свиты. Проанализировано их распределение по разрезу. Выявлено, что для пород верхней части разреза хатыспытской свиты характерны высокие концентрации оксидов кремния и алюминия. Концентрации оксидов кальция и магния широко варьируют по всему разрезу свиты.

Дополнена характеристика состава и распределения насыщенных УВ битумоидов карбонатных, глинисто-кремнисто-карбонатных и карбонатно-кремнистых пород хатыспытской свиты в разной степени обогащенных ОВ. Для серии проб выявлены особенности состава и распределения УВ: близкие концентрации стеранов  $C_{27}$  и  $C_{29}$ ; присутствие 12- и 13-монометилалканов в следовых количествах; низкое содержание гаммацераана (в том числе в ОВ черных сланцев). Впервые получена количественная оценка содержания фенантронов, дибензотиофенов, моноароматических и триароматических стероидов нафтоароматических фракций битумоидов. Установлено, что условия в хатыспытском бассейне менялись от слабо восстановительных (возможно, субокислительных) до сильно восстановительных, в отдельные периоды накопления осадка возникала стратификация водного столба и аноксия (вероятно, сероводородное заражение) в придонных водах.

Атомно-молекулярные характеристики компонентов ОВ – изотопный состав органического углерода, составы и распределения насыщенных УВ и ароматических соединений битумоидов для хараютэхской свиты представлены впервые. Предполагается, что породы и ОВ средней подсвиты хараютэхской свиты формировались в слабо восстановительных условиях без стратификации

и сероводородного заражения. Источником ОВ пород венда служили эукариоты, прокариоты, археи.

Породы хатыспытской свиты, распространенные на склонах Оленекского поднятия, редко обладают высоким остаточным генерационным потенциалом (по классификации Б. Тиссо и Д. Вельте), чаще – средним и низким. Пиролитические, битуминологические характеристики пород, а также молекулярный состав метано-нафтеновых фракций битумоидов свидетельствуют, что катагенез ОВ хатыспытских отложений, соответствует началу главной зоны нефтеобразования (градация МК<sub>1</sub><sup>1</sup> по шкале А.Э. Конторовича). Породы средней подсвиты хараютэхской свиты полностью реализовали исходно высокий генерационный потенциал, катагенез ОВ этих отложений достигает градаций МК<sub>3</sub><sup>1</sup>–МК<sub>3</sub><sup>2</sup>.

Микроскопический анализ пород хатыспытской свиты в шлифах позволил зафиксировать рассеянные нафтиды в микротрещинах и кавернах. Впервые изучена их органическая геохимия. На основании особенностей молекулярного состава метано-нафтеновых фракций (высокие «нафтеновые горбы» на хроматограммах, присутствие деметилированных терпанов) установлено, что битумоиды этих пород биодеградированы в гипергенезе.

Установлено единство атомно-молекулярного состава в ряду автохтонные битумоиды → параавтохтонные битумоиды → параавтохтонные биодеградированные битумоиды хатыспытской свиты → битумы Восточно-Анабарского и Центрально-Оленекского скоплений в вендских и кембрийских отложениях.

По изотопному составу С<sub>орг</sub> и распределению насыщенных УВ-биомаркеров обоснована связь между ОВ средней подсвиты и битумами верхней подсвиты хараютэхской свиты.

**Фактический материал и методы исследования.** В основу работы легла коллекция из 106 образцов хатыспытской свиты из обнажений среднего течения р. Хорбусуонка, 21 образца средней подсвиты хараютэхской свиты и 4 образцов верхней подсвиты хараютэхской свиты из обнажения на устье ручья Бискеебит (низовье р. Лена).

Исследования пород и ОВ были проведены в лаборатории геохимии нефти и газа ИНГГ СО РАН. В основу диссертации легли результаты определения содержания в породе (131 образец) нерастворимого остатка и органического углерода на приборе АН-7529, пиролиза пород (79 проб) и нерастворимых остатков (63 пробы), битума (1 проба) на приборе Weatherford SR-Analyzer – POPI (Pyrolytic Oil Productivity Index), холодной экстракции битумоидов из дробленных пород (109 проб), хроматографии битумоидов (106 проб). Особое внимание уделено изучению насыщенных УВ и ароматических соединений битумоидов. Состав и распределение алкановых УВ были изучены методом газожидкостной хроматографии на приборе Agilent 7820 (106 фракций), полициклических насыщенных УВ (106 фракций), ароматических УВ и дибензотиофенов (102 фракции) – методом хромато-масс-спектрометрии на установке, состоящей из хроматографа Agilent 6890 и масс-спектрометра Agilent 5973N. Определение форм серы и железа в породах методами аналитической химии (43 образца), рентгено-флуоресцентный анализ пород на спектрометре Thermo Electron ARL-9900-XP (20 образцов), определение изотопного состава органического углерода на приборе Finnigan MAT-253 с линией пробоподготовки Conflo III и Flash ES-1112 (66 проб) проводили в ИГМ СО РАН.

При проведении исследований автор опирался на осадочно-миграционную теорию образования нефти, критерии диагностики потенциально нефтематеринских пород и оценки геохимических предпосылок нефтегазоносности, разработанные отечественными и зарубежными исследователями во второй половине XX века [Успенский, 1957; Неручев, 1962; Вассоевич, 1967; Конторович и др., 1967; Конторович, 1976; Тиссо, Вельте, 1981; Баженова и др., 1981; Хант, 1982; Peters, 1986; Лопатин, Емец, 1987; Меленевский, 1991; Peters, Moldowan, 1993].

**Личный вклад автора.** В 2018 году в ходе полевых работ соискателем были изучены разрезы хатыспытской свиты, отобрана новая коллекция пород, выполнено их макроскопическое описание. Проанализированы результаты геохимического исследования пород и органического вещества. В программном

обеспечении MSD Chemstation и AMDIS автором проведена идентификация насыщенных и ароматических углеводородов-биомаркеров, серосодержащих соединений путем сравнения масс-спектров и времен удерживания с библиотекой NIST04 и с опубликованными данными, изучены их составы и распределения. Построены геохимические профили изменения содержаний нерастворимого остатка, органического углерода, битумоидов, серы общей, основных породообразующих оксидов в разрезах венда. Реконструированы условия осадконакопления в вендских бассейнах. Для хатыспытской свиты выделены три геохимические фации и выполнено их сопоставление с этапами развития хатыспытского осадочного бассейна. Уточнена оценка катагенеза ОВ венда. В хатыспытской свите впервые по особенностям состава насыщенных УВ диагностированы биодegradированные рассеянные нафтидопроявления, их наличие подтверждено анализом пород в шлифах. Обобщены новые и архивные материалы лаборатории геохимии нефти и газа по изученности вендских отложений северо-востока Сибирской платформы (хатыспытская и хараютэхская свиты). Полученные результаты интерпретированы с учетом последних достижений в области геологии и органической геохимии.

#### **Защищаемые результаты:**

1. Разрез хатыспытской свиты представлен чередованием карбонатных, глинисто-кремнисто-карбонатных, карбонатно-кремнистых пород и силицитов, неравномерно обогащенных органическим веществом, с редкими маломощными прослоями глинисто-карбонатно-кремнистых пород, аномально обогащенных органическим веществом. Закономерности изменения молекулярного состава ее битумоидов отражают чередование обстановок осадконакопления. Во время формирования хатыспытских отложений условия среды менялись от слабо восстановительных (возможно, субокислительных) до сильно восстановительных, со стратификацией водного столба и сероводородным заражением придонных вод.

2. Породы хатыспытской свиты, обогащенные органическим веществом, являются нефтематеринскими, они генерировали нафтиды и были источником битумов в вендских и кембрийских отложениях на территории Анабарской

нефтегазоносной области. В карбонатных и карбонатно-кремнистых породах свиты (как правило, в ее верхней части) распространены рассеянные нефтидопроявления. Они генетически связаны с автохтонными битумоидами хатыспытской свиты.

3. Карбонатные и карбонатно-кремнистые породы средней подсвиты хараютэхской свиты венда обогащены органическим веществом. Его катагенез соответствует глубинной зоне газообразования. В разрезе на Чекуровской антиклинали породы подсвиты полностью реализовали исходно высокий генерационный потенциал. Битумы из верхней подсвиты хараютэхской свиты генетически связаны с остаточными битумоидами нефтематеринских пород средней подсвиты.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность результатов обеспечивается детальностью проработки фактического материала, методологическими подходами к исследованию, которые опираются на осадочно-миграционную теорию нефтидогенеза и учение о стадийности нефтегазообразования. Методы и используемое аналитическое оборудование являются современными и достаточными для решения поставленной научной задачи и достижения цели диссертационного исследования. Достоверность также обеспечивается большим количеством образцов, полнотой и равномерностью их отбора из разрезов, сходимостью результатов при проведении внутреннего контроля, воспроизводимостью результатов при анализе материала в разных лабораториях. Представленные в работе данные продемонстрированы в тексте, таблицах, рисунках. Интерпретация фактических материалов проводилась с учетом последних отечественных и зарубежных достижений в области геологии, геохимии нефти и газа, органической геохимии.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Выявленные закономерности изменения молекулярных составов метано-нафтеновых фракций битумоидов хатыспытской свиты позволили предложить критерии для выделения трех геохимических фаций. Показано, что условия в водной среде во время накопления хатыспытских отложений менялись от слабо восстановительных

(вероятно, субокислительных) до сильно восстановительных, со стратификацией водного столба и сероводородным заражением придонных вод. Полученные результаты дополняют представление об условиях формирования и распространении обогащенных и обедненных ОВ пород венда на Сибирской платформе, а также имеют фундаментальное значение для уточнения историко-геологической модели развития докембрийских осадочных бассейнов мира.

Сформирована база данных по содержанию органического углерода, генерационным свойствам пород, атомно-молекулярным составам битумоидов и битумов вендских отложений. Она является основой для моделирования генерации, миграции УВ и новой количественной оценки нефтегазоносности осадочных комплексов на северо-востоке Сибирской платформы.

**Апробация работы.** Результаты исследования докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях (г. Томск, 2018, 2020; г. Гетеборг, Швеция, 2019; г. Новосибирск, 2019; 2020, 2021, 2022; г. Монпелье, Франция, 2021; г. Прага, Чехия, 2021; г. Москва, 2021). Материалы настоящего исследования вошли в отчеты по проектам программы фундаментальных научных исследований «Органическая геохимия и история геологического развития доминантных нефтегазовых систем верхнего протерозоя и фанерозоя Сибири» (2019–2021), «Разработка методик оценки ресурсов, разведки и подсчета запасов залежей трудноизвлекаемой нефти в углеродистых карбонатно-глинисто-кремнистых, карбонатных и засоленных песчаных коллекторах» (2019–2021), «Органическая геохимия нефтепроизводящих пород и нафтидов, геохимические предпосылки нефтегазоносности протерозойских и фанерозойских осадочных бассейнов Сибири и Республики Саха (Якутия), включая Арктическую зону (2022)», «Цифровые геолого-геофизические и петрофизические модели осадочных комплексов с трудноизвлекаемыми запасами нефти в Западной и Восточной Сибири как резерв для прироста запасов и добычи» (2022), проектов РНФ «Филогенетические джунгли докембрия: утраченные планы строения эукариот в эволюции биосферы» (2017–2019), «В поисках Чеширского кота: появление и исчезновение первых в истории

биосферы эуметазой» (2020–2022), проекта РФФИ «Закономерности формирования обогащенных органическим веществом пород неопротерозойских отложений и их участие в нефтегазообразовании (северо-восток Сибирской платформы, арктическая зона России)» (2020–2022).

По теме диссертационного исследования индивидуально и в соавторстве было опубликовано 5 статей в рецензируемых журналах («Геология и геофизика», «Георесурсы», «Geobiology», «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири» – из них 5 – в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования основных результатов диссертации), 19 тезисов и статей в материалах конференций.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Объем работы включает 220 страниц, в том числе 67 рисунков, 9 таблиц. Список литературы содержит 282 наименования.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность к.г.-м.н. Т.М. Парфеновой за чуткое руководство, помощь и всестороннюю поддержку при выполнении научно-исследовательской деятельности. За предоставленную в 2017 году коллекцию хатыспытской свиты и за организацию полевых работ на Оленекском поднятии в 2018 году автор искренне благодарит Д.В. Гражданкина, В.И. Рогова, а также Н.В. Быкову, О. Жарасбаева, К.Е. Наговицина за помощь в ходе экспедиционных работ, изучении разрезов, отборе уникального материала. Большинство анализов выполнялось в лаборатории геохимии нефти и газа ИНГГ СО РАН. Автор признателен за проведенные аналитические работы и консультации Н.В. Аксеновой (определение содержания нерастворимого остатка и органического углерода в породах), В.Н. Меленевскому, К.В. Долженко (пиролиз), Н.В. Моисеевой, Е.Г. Гудяевой (экстракция битумоида), Н.П. Вертаковой, Н.П. Шевченко, А.А. Чукановой (хроматография), Е.А. Зубовой (газожидкостная хроматография), Е.Н. Ивановой (хромато-масс-спектрометрия), О.П. Изох, А.Н. Пыряеву (ЦКП МИИ СО РАН, исследование изотопного состава углерода). За обсуждение полученных результатов, научных идей, дискуссии, поддержку и ценные советы автор благодарит Д.В. Гражданкина, В.А. Каширцева,

А.Э. Конторовича, В.И. Рогова, Я.П. Дьюду, А.Дж. Кауфмана, И.М. Бобровского, Й. Брокса, коллективы лаборатории геохимии нефти и газа, лаборатории палеонтологии и стратиграфии докембрия, лаборатории проблем геологии, разведки и разработки месторождений трудноизвлекаемой нефти ИНГГ СО РАН.

# Глава 1. ИЗУЧЕННОСТЬ ВЕНДА СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

## 1.1 Геолого-географическая характеристика

Отложения позднего неопротерозоя (венда, эдиакария) повсеместно распространены по площади Сибирской платформы, за исключением Алданского и Анабарского щитов, а также некоторых участков локальных поднятий, где эти отложения размыты [Хоментовский, 1976; Шпунт и др., 1979, 1981; Вендская система..., 1985; Мельников и др., 2005]. На северо-востоке Сибирской платформы они развиты в пределах Оленекского структурно-фациального региона (включает Хорбусуонский и Лено-Анабарский районы) и Куонамской зоны Анабарского района Анабаро-Алданского структурно-фациального региона Лено-Тунгусской и Лено-Вилуйской нефтегазоносных провинций (НГП) (Рисунок 1.1.1) [Мельников и др., 2005; Карта нефтегазоносности..., 2021].

На Оленекском поднятии вендские отложения обнажаются вдоль р. Оленек и ее притоков. На этой территории (хорбусуонский структурно-фациальный район) они представлены хорбусуонской серией, которая включает маастахскую, хатыспытскую, туркутскую свиты. Хатыспытская изучена в обнажениях на р. Хорбусуонка и ее притоках, на р. Керсюке [Журавлев, Сороков, 1954; Битерман, Горшкова, 1962; Якшин, Воданюк, 1986; Якшин, 1987; Мельников и др., 2005; Nagovitsin et al., 2015]. В пределах Лено-Анабарского фациального района вендские отложения на дневной поверхности описаны на Уджинском поднятии. Здесь к венду отнесены томторская и вышележащая туркутская свиты. Томторская залегает на различных горизонтах свит рифея [Мельников и др., 2005]. В разрезах на восточном склоне Анабарского массива вендским отложениям отвечает старореченская свита [Мельников и др., 2005]. В северной части Предверхоаянского прогиба вендские отложения обнажаются вдоль р. Лена на склонах Чекуровской и Булкурской антиклиналей Хараулахского выступа и представлены хараютэхской свитой (см. рисунок 1.1.1) [Виноградов, 1962; Шпунт и др., 1979, 1982; Бахтуров, 1987].

Во второй половине XX века на территории Лено-Анабарского прогиба было пробурено несколько глубоких скважин, которые вскрыли неопротерозойские отложения: Бурская-3410, Хастахская-930, Чакчыкская-1, Усть-Оленекская-2370, Дьяппальская-1, Говоровская-1 (см. рисунки 1.1.1, 1.1.2) [Геологический..., 1988; Граусман, 1995а, 1995б; Nagovitsin et al., 2015]. Корреляция разрезов отложений в обнажениях на Оленекском поднятии и в скважинах Лено-Анабарского прогиба долгое время оставалась дискуссионной. Согласно последним данным, в скважинах Бурская-3410 и Чакчыкская-1 вскрывается стратиграфический аналог хатыспытской свиты – «глинисто-доломитовая толща», которая по строению и литологическому составу отличается от хатыспытской свиты Оленекского поднятия. Она представлена чередованием темно-серых доломитизированных известняков и зеленовато-серых аргиллитов (Рисунок 1.1.3). В скважине Хастахская-930 туркутская свита перекрывает хастахскую свиту рифея [Nagovitsin et al., 2015; Вараксина, Шаваров, 2020]. В скважине Дьяппальская-1 хараютэхская свита вскрывается в полном объеме. В скважине Говоровская-1 кембрийские отложения залегают на рифейских, вендские отложения отсутствуют. В скважине Усть-Оленекская-2370 древнейшие отложения представлены кысылаяхской толщей, которая является возрастным аналогом средней-верхней части кессюсинской серии. Возрастные аналоги хатыспытской и хараютэхской свит не вскрыты [Геологический..., 1988; Комплексный анализ..., 2010; Кочнев и др., 2015; Лежнин и др., 2021; Найденов и др., 2021].

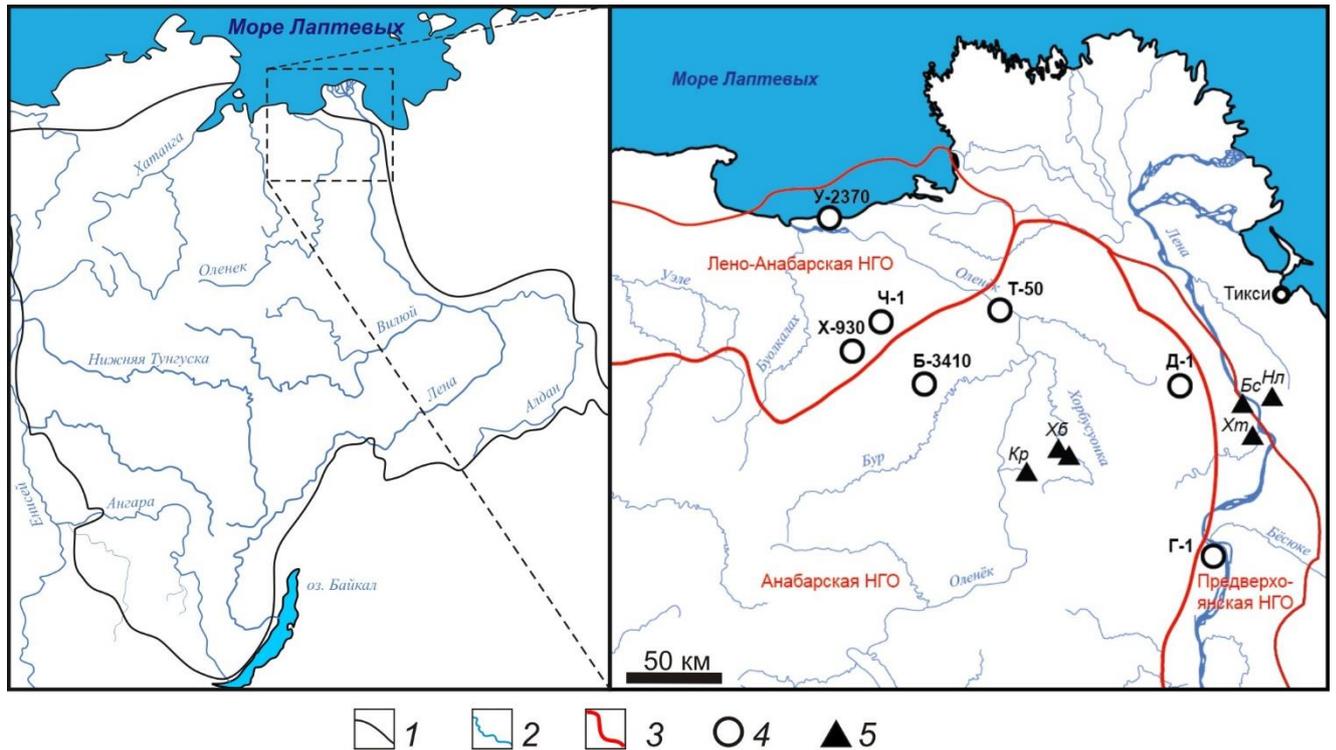


Рисунок 1.1.1 – Схема изученности вендских отложений на северо-востоке Сибирской платформы.

Условные обозначения: 1 – границы Сибирской платформы; 2 – гидрография; 3 – границы нефтегазоносных областей. 4 – скважины: У-2370 – Усть-Оленекская-2370; Х-930 – Хастахская-930; Ч-1 – Чарчыкская-1; Б-3410 – Бурская-3410; Д-1 – Дьяппальская-1; Т-50 – Тюмятинская-50; Г-1 – Говоровская-1. 5 – выходы изучаемых вендских отложений на дневную поверхность: Кр – р. Керсюке; Хб – р. Хорбусуонка; Бс – р. Бискеебит; Хт – р. Хатыстых; Нл – р. Нэлэгер

Северная окраина Сибирской платформы изучена методами сейсмозвездки. Первый этап этих исследований в районе Лено-Анабарского междуречья пришелся на 1960–1990-е годы, современный этап начался в XXI веке. Изученность региона остается низкой, плотность сейсмических профилей МОГТ-2D в Лено-Анабарской и Анабаро-Хатангской НГО составляет  $0,09 \text{ км/км}^2$  (см. рисунок 1.1.2). Модель строения осадочного чехла Лено-Анабарского прогиба и прилегающих территорий совершенствуется, до сих пор оставаясь дискуссионной [Конторович и др., 2013, 2014, 2020, 2021; Конторович, Конторович, 2021; Губин, Конторович, 2021; Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021; Шапорина и др., 2021].

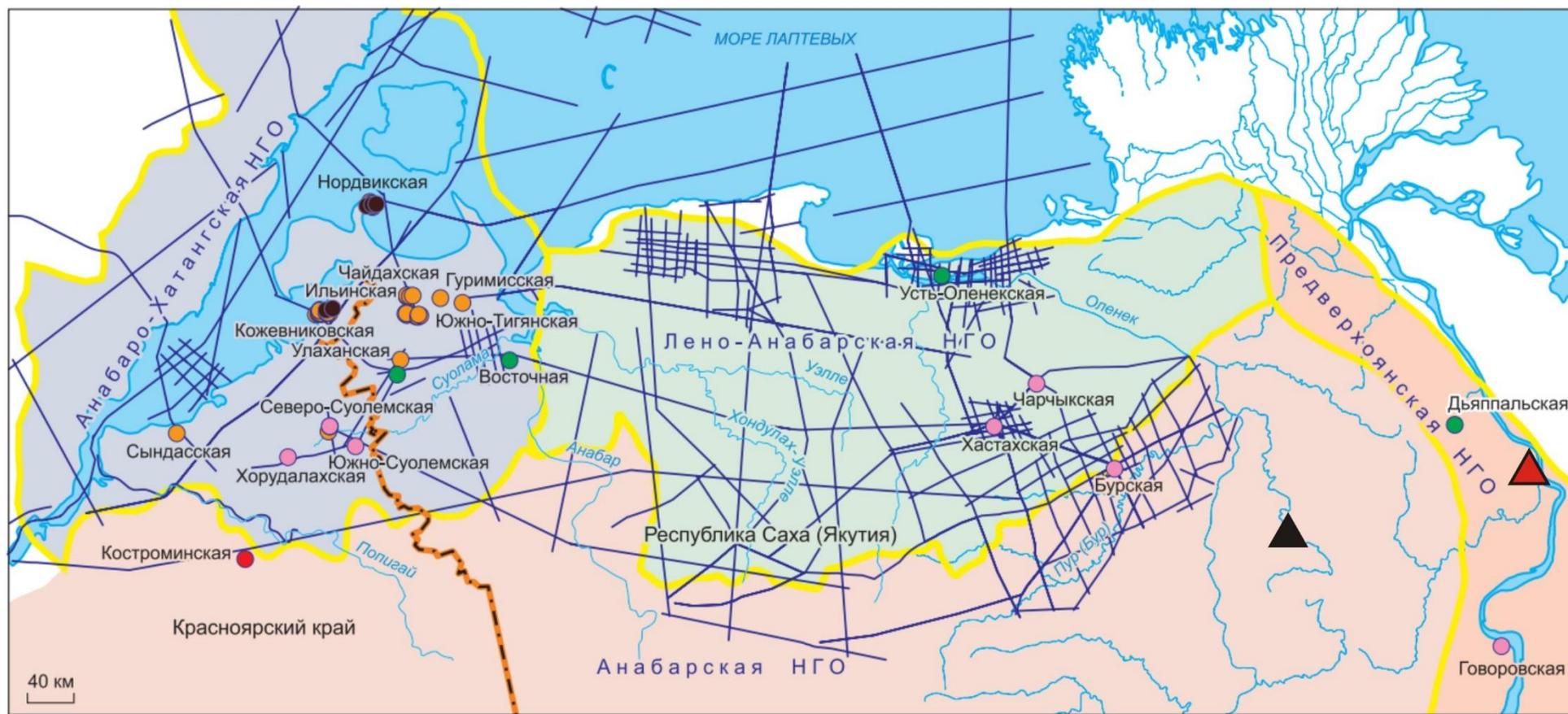


Рисунок 1.1.2 – Схема геолого-геофизической изученности севера Сибирской платформы (по: [Конторович и др., 2021], с дополнениями).  
 Условные обозначения: 1 – площади; 2 – береговая линия; 3 – административные границы; 4 – границы НГО, 5 – сейсмические профили МОГТ. Глубокие скважины: 6 – вскрывшие фундамент; 7 – забой в рифее; 8 – забой в кембрии; 9 – забой в девоне-карбоне; 10 – забой в перми; 11 – разрезы хатыспытской свиты в бассейне р. Хорбусуонка; 12 –разрез хараютэхской свиты в устье ручья Бискеебит

Система	Отдел	Индекс	Лито­логия	Краткая характеристика			
				Север	Юг		
Кембрийская	Верхний	Є <sub>3</sub>		Кыстаракская свита Доломиты серые, иногда слабоглинистые	250 м	Лапарская свита Доломиты известковистые, светло-серые, светло-коричневые, тонко-мелкозернистые, плотные	160 м
				Касыляхская толща Верхняя пачка – доломиты серые, пористо-кавернозные; нижняя пачка – песчаники, в основании переслаивание алевролитов и аргиллитов	130 м		
	Средн.	Є <sub>2</sub>		Еркекетская свита Чередование доломитов глинистых, доломитов, мергелей, известняков. Известняки красно-бурые, глинистые	230 м	Доломитовая толща Доломиты, с прослоями доломитов глинистых, известковистых	280 м
	Нижний	Є <sub>1</sub>		Кессюсинская свита Чередование песчаников, аргиллитов, алевролитов и гравелитов	130 м		
	Вендская	V-φ		V		Туркутская свита Доломиты серые, тонкомелкозернистые, плотные. В отдельных участках глинистые, трещиноватые с редкими зернами пирита	160 м
Маастакская свита Аргиллиты алевритистые и доломитистые, с прослойками доломитов. Отмечаются мелкие трещины, заполненные ангидритом и кальцитом			60 м				
Рифейская		R <sub>3</sub>		Таймыльрская свита Доломиты серые, трещиноватые. Отмечается послойное окремнение и включения пирита, в трещинах – ангидрит	385 м	Хастакская свита Аргиллиты и алевролиты тонкослоистые, со слюдами на поверхностях наслоения, со слоями песчаников. Песчаники с прослоями слюдястых алевролитов	385 м
				Куландинская свита Верхняя подсвита – доломиты слабоглинистые, частично окремненные, иногда с мелкими кавернами	172 м		
	Нижняя подсвита – переслаивание аргиллитов, глинистых доломитов и песчаников			118 м			
	Тукуландская свита Верхняя подсвита – доломиты частично окремненные, кавернозные, трещиноватые, с редкими включениями ангидрита			113 м			
				Нижняя подсвита – аргиллиты часто алевритистые, с тонкими слоями песчаников	235 м		



Рисунок 1.1.3 – Опорный разрез верхнепротерозойско-нижнепалеозойских отложений Лено-Анабарской НГО [Конторович и др., 2021].

Условные обозначения: 1 – размывы; 2 – известняки; 3 – доломиты; 4 – аргиллиты; 5 – алевролиты; 6 – песчаники; 7 – ангидриты; 8 – гравелиты

По современным представлениям, по направлению к западу и югу от Оленекского поднятия мощность вендских отложений сокращается (Рисунок 1.1.4, Рисунок 1.1.5) [Конторович, Конторович, 2021].

Дискуссионным остается вопрос о распространении пород хатыспытской свиты. По первым оценкам Л.М. Натапова, площадь распространения ее пород составляет около 3000 км<sup>2</sup> [Натапов, 1962].

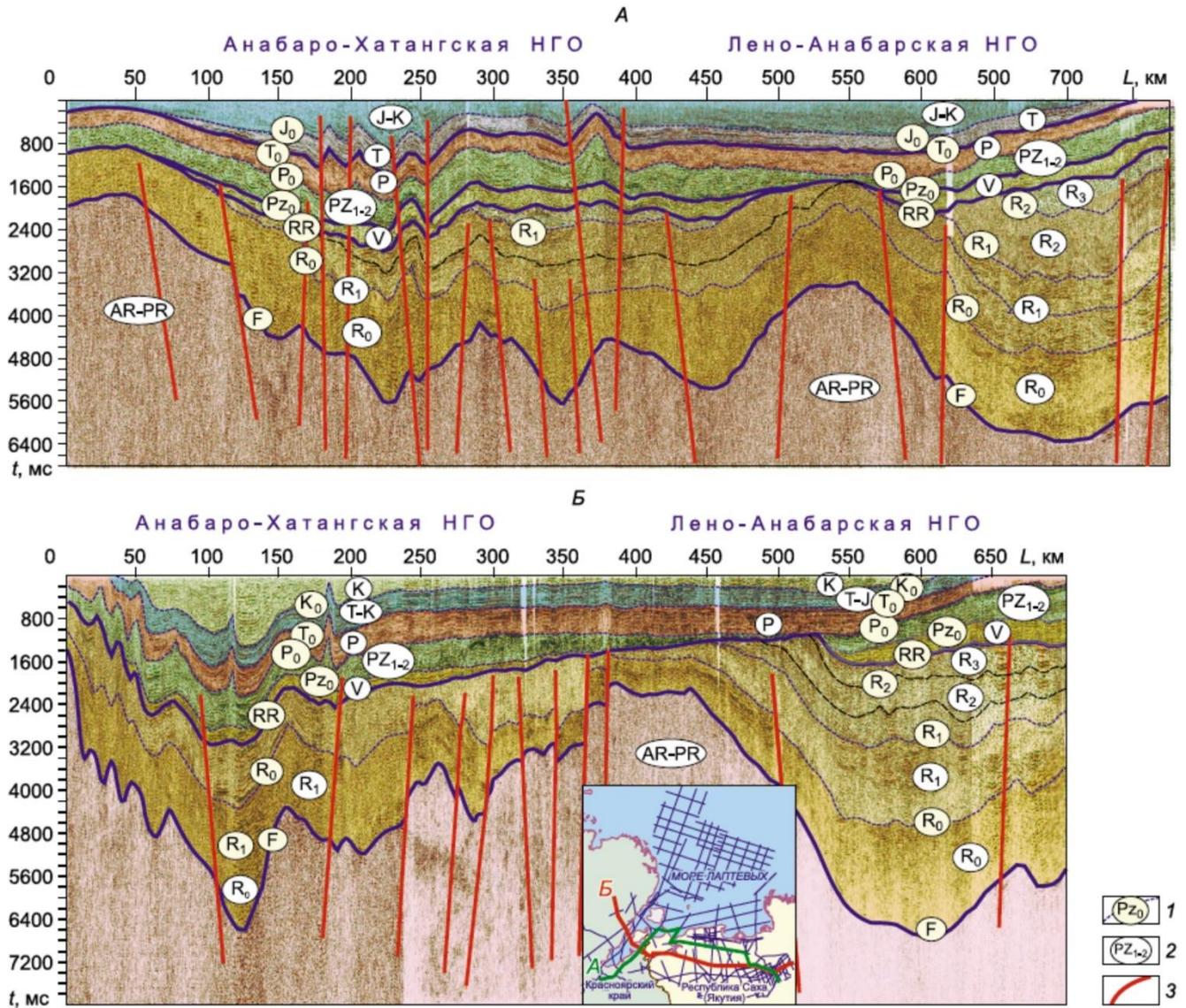


Рисунок 1.1.4 – Сейсмогеологический разрез по композитным профилям Reg1 (А), Reg\_2 АХС-Л-А (Б) [Конторович и др., 2021].

Условные обозначения. 1 – отражающие горизонты: K<sub>0</sub> – подошва мела; T<sub>0</sub> – подошва триаса; P<sub>0</sub> – подошва перми/граница регионального эрозионного среза; Pz<sub>0</sub> – подошва палеозоя/кровля венда; RR – кровля рифея; R<sub>1</sub>–R<sub>4</sub> – внутри рифея; R<sub>0</sub>/F – подошва платформенного рифея/кровля архея; 2 – возраст; 3 – разрывные нарушения

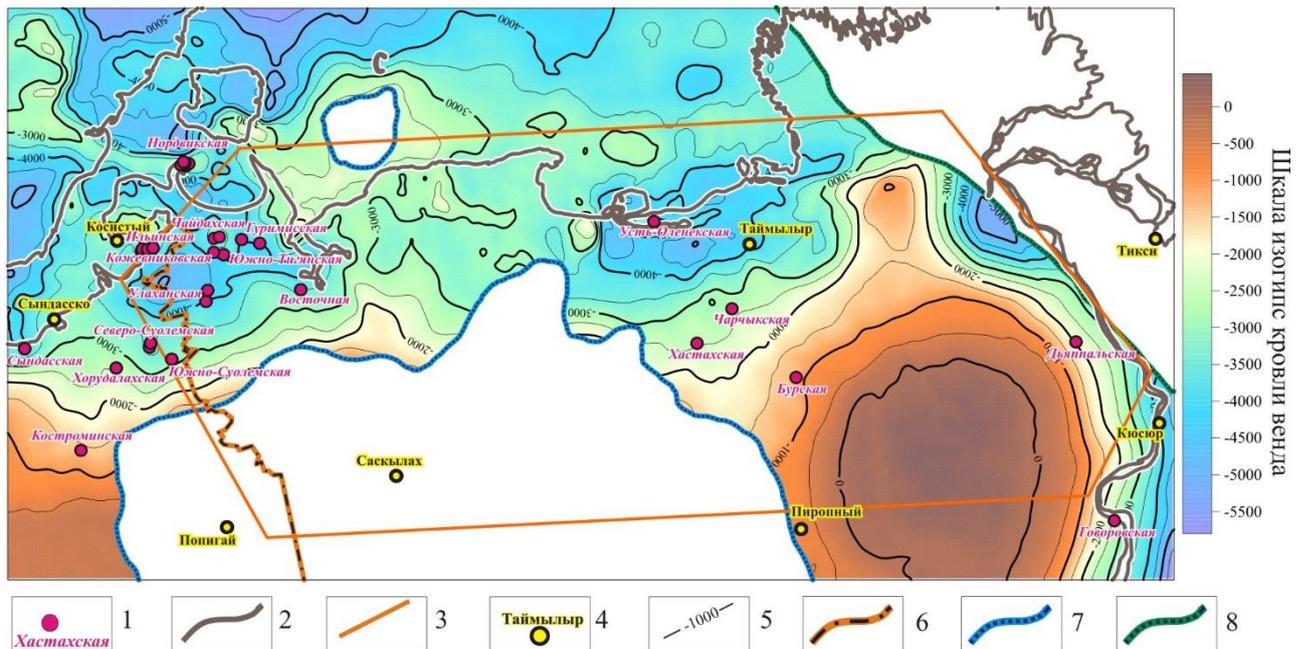


Рисунок 1.1.5 – Структурная карта по кровле венда (по материалам ИНГГ СО РАН).

Условные обозначения: 1 – глубокие скважины, площади; 2 – береговая линия; 3 – Хатанга-Ленская (Усть-Оленекская) зона; 4 – населенные пункты; 5 – изогипсы; 6 – административная граница; 7 – зона отсутствия отложений; 8 – Верхоянская складчатая область

На основе анализа текстурно-структурных особенностей пород хатыспытской свиты и микрофациального состава отложений В.И. Роговым была предпринята попытка реконструировать конфигурацию бассейна, в котором накапливалась хатыспытская свита. Предполагается, что она формировалась в пределах рифтового бассейна (относительно изолированного), вытянутом в северо-северо-западном направлении, при этом ширина бассейна составляла всего около 100 км [Рогов, 2018, 2022]. Ранее существовавшая модель отражала фациальное замещение известняков хатыспытской свиты на доломиты туркутской свиты к западу и востоку от Оленекского поднятия [Якшин, Воданюк, 1986; Якшин, 1987].

С другой стороны, на основе атомно-молекулярной корреляции битумоидов пород хатыспытской свиты из разрезов на р. Хорбусуонка и битумов Восточно-Анабарского скопления (междуречье Малой Куонамки и Большой Куонамки) высказано предположение о том, что область распространения хатыспытской свиты прослеживается далеко на запад от Оленекского поднятия, как минимум –

за осевую часть Суханского осадочного бассейна [Каширцев, 2003; Каширцев и др., 2019].

Согласно тектоническому районированию хатыспытская свита распространена в пределах северного склона Оленекского свода восточного крыла Анабарской антеклизы Анабарской нефтегазоносной области Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции и, по представлениям В.А. Каширцева с коллегами, в пределах Суханской впадины (Рисунок 1.1.6) [Тектоническая схема..., 2002; Каширцев, 2003, 2004; Каширцев и др., 2019; Карта нефтегазоносности..., 2021; Конторович и др., 2021].

Хараютэхская свита развита в пределах Хараулахского выступа Предверхоянского прогиба [Виноградов, 1962; Коробов, 1963; Крылов и др., 1971; Шпунт и др., 1979, 1982]. Согласно нефтегазоносному районированию, область распространения свиты охватывает территории Лено-Анабарской и Анабарской нефтегазоносных областей Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции, а также северной части Лено-Вилюйской нефтегазоносной провинции [Карта нефтегазоносности..., 2021].

В административном плане территория исследования локализована в пределах Булунского района республики Саха (Якутия) Дальневосточного федерального округа.

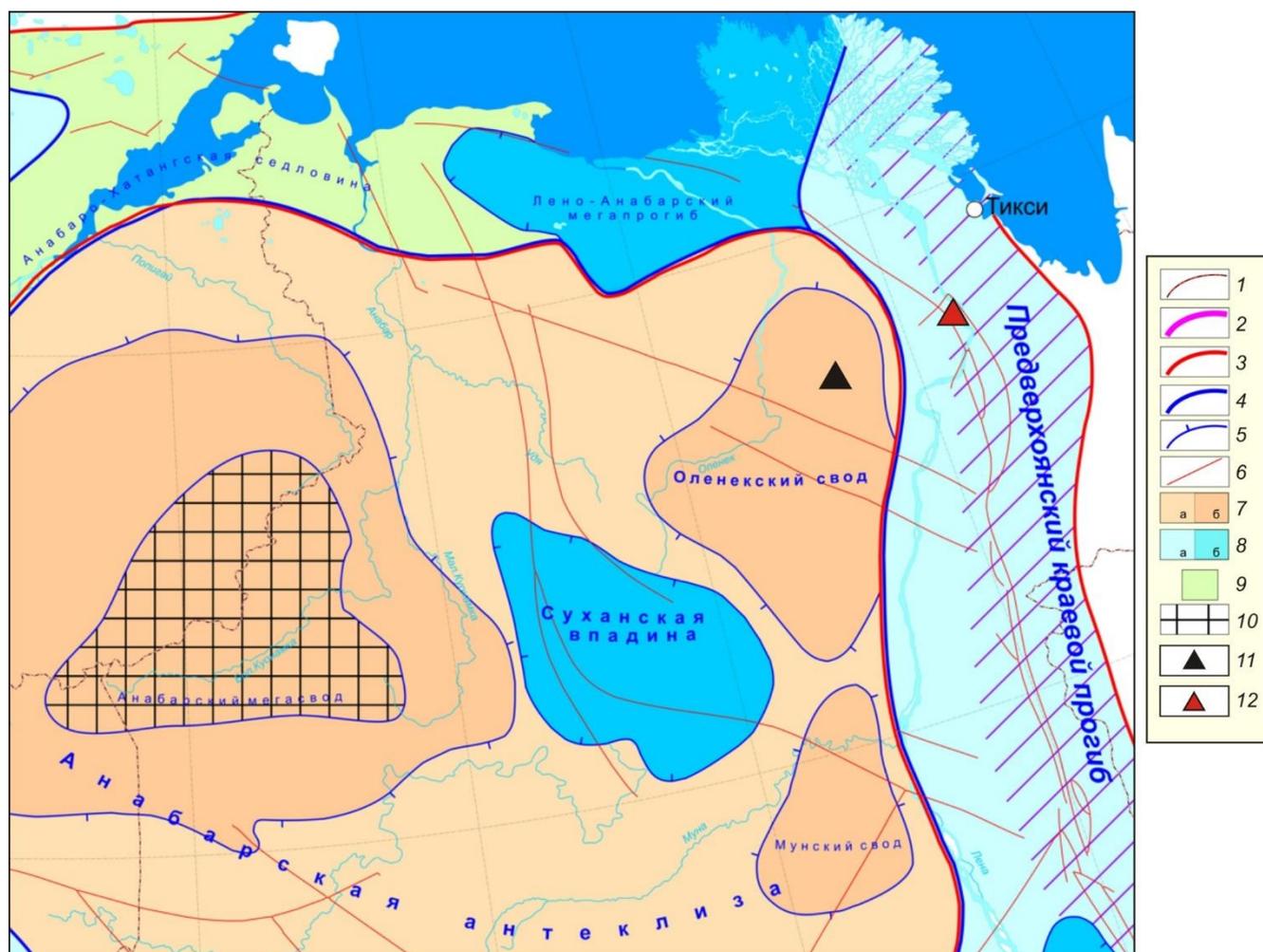


Рисунок 1.1.6 – Фрагмент тектонической схемы Сибирской платформы (по: [Тектоническая схема..., 2002], с дополнениями).

Условные обозначения. Границы: 1 – административные; 2 – Сибирской платформы;

3 – нефтегазоносных провинций; 4 – надпорядковых тектонических структур;

5 – тектонических структур I порядка; 6 – основные дизъюнктивные нарушения;

7 – положительные пликативные структуры (а – надпорядковые, б – I порядка);

8 – отрицательные пликативные структуры (а, б – то же); 9 – моноклинали и седловины;

10 – выходы кристаллического фундамента на поверхность; 11 – изученные разрезы

хатыспытской свиты; 12 – изученный разрез хараютэхской свиты.

## 1.2 Литолого-стратиграфическая характеристика венда

Первые крупномасштабные работы по изучению геологии протерозойских и нижнепалеозойских отложений северо-востока Сибирской платформы выполнялись силами сотрудников Научно-исследовательского Института Геологии Арктики (НИИГА) и Всесоюзного Аэрогеологического Треста (ВАГТ) в период с 1930-х по 1960-е гг. Экспедиции проводились под руководством А.И. Гусева (1939 г.), В.А. Первунинского и К.К. Демюкидова (1943–1944 гг.),

В.С. Журавлева и Д.С. Сорокова (1950 г.), А.А. Красильщикова и В.И. Виноградова (1953–1954 гг.), И.М. Битермана, Б.Н. Леонова, Л.М. Натапова, Н.М. Коробова и многих других. Результаты этих работ были опубликованы в многочисленных статьях и монографиях [Гусев, 1950; Журавлев, Сороков, 1954; Кабаньков, 1956; Демокидов, 1956; Битерман, Горшкова, 1962; Виноградов, 1962; Натапов, 1962; Леонов и др., 1965; Комар, 1966].

Венд, в составе которого сегодня выделяются хатыспытская и хараютэхская свиты, на схемах впервые появился после Межведомственного совещания по стратиграфии отложений верхнего докембрия Сибири и Дальнего Востока в 1962 г. Однако в схемы Всесоюзного совещания по унификации стратиграфических схем Сибири (1965 г.) он не вошел и был окончательно обозначен на унифицированных схемах Средней Сибири лишь в 1981 г. трудами Б.С. Соколова, В.В. Хоментовского, Б.М. Келлера, В.В. Меннера, А.Л. Яншина, М.А. Семихатова и многих других [Хоментовский, 1976; Решения..., 1983; Вендская система..., 1985]. Для внесения венда в единую стратиграфическую шкалу необходимо было найти его аналоги на территории Сибирской платформы. Таковым являлся юдомский комплекс. Первоначально (1962 г.) в основе его выделения в качестве общесибирского биостратиграфического подразделения лежал юдомский комплекс фитолитов на юго-востоке и севере Восточной Сибири. Позже (1967 г.), с учетом радиологических и историко-геологических данных, он был распространен на всю территорию платформы. Представления об объеме и строении венда на Сибирской платформе были в значительной степени уточнены благодаря работам Б.С. Соколова, В.В. Хоментовского, М.С. Якшина, В.А. Комар, З.А. Журавлевой, В.А. Лучининой, Е.П. Бутакова и других по изучению геологии, стратиграфии и палеонтологии северных районов платформы [Комар, 1966; Журавлева, 1964; Хоментовский, 1976; Вендская система..., 1985; Лучинина и др., 1997].

Исследования, направленные на детализирование представлений о разрезах хорбусуонской серии и венда в целом, составе отложений, фациальной изменчивости и мощностей свит Оленекского поднятия, активно проводились

в 1980-х гг. такими исследователями, как М.С. Якшин, С.А. Воданюк, Г.А. Карлова [Карлова, Воданюк, 1985; Якшин, Воданюк 1986; Воданюк, 1987; Якшин, 1987]. Изучением геологии хараютэхской свиты начиная с 1950-х гг. занимались М.Н. Коробов, Б.Р. Шпунт, С.И. Грошин, З.А. Журавлева, В.А. Виноградов, И.Г. Шаповалова В.В. Миссаржевский, С.Ф. Бахтуров и другие [Виноградов, 1961, 1962; Коробов, 1963; Журавлева, 1964; Крылов и др., 1971; Шпунт и др., 1979, 1982; Бахтуров, 1987]. В настоящее время разрезы верхнего протерозоя и нижнего палеозоя северо-восточной окраины Сибирской платформы считаются одними из самых представительных в Евразии и обращают на себя пристальное внимание палеонтологов, стратиграфов, седиментологов, литологов, геохимиков и являются объектом комплексных междисциплинарных исследований [Конторович и др., 1995; Knoll, 1995; Pelechaty et al., 1995a, 1995b; Grazhdankin et al., 2008; Парфенова и др., 2010; Rogov et al., 2012; Рогов и др., 2015; Nagovitsin et al., 2015; Хабаров, Изох, 2014; Cui et al., 2016; Duda et al., 2016, 2020; Vykova et al., 2017, 2020; Кочнев и др., 2021, 2023; и др.].

*Хатыспытская свита* и подстилающая ее маастахская были выделены В.С. Журавлевым и Д.С. Сороковым в 1954 г в нижнем отделе кембрия Оленекского поднятия [Журавлев, Сороков, 1954; Демюкидов, 1956]. При сопоставлении этих разрезов с «древнепалеозойскими» отложениями Русской платформы В.Я. Кабаньков (1956) указал на их отличия в литологии, но подобие в палеонтологической характеристике. Он пришел к выводу, что отложения северо-востока Сибирской платформы, ранее считавшиеся нижнекембрийскими, должны быть выделены в самостоятельную стратиграфическую единицу. В 1952 г., предположение о приуроченности этих отложений к протерозою высказал Н.С. Шатский. К началу 1950-х годов среди исследователей не было единого мнения о положении этих отложений в стратиграфической шкале и названии этого стратиграфического подразделения. Внести ясность относительно положения этих отложений в стратиграфии северо-востока Сибирской платформы позволили работы 50–60-х годов XX века А.А. Красильщикова, В.А. Виноградова, И.М. Битермана, Б.Н. Леонова, Л.М. Натапова и других.

Породы маастахской, хатыспытской и туркутской свит (последняя выделена А.И. Гусевым [Гусев, 1950]) были объединены в одну серию геологами НИИГА в составе синийского комплекса Оленекского поднятия [Виноградов и др., 1961], позже названную хорбусуонской сотрудниками ВАГТ [Битерман, Горшкова, 1962]. Большой объем работ В.А. Комар по изучению докембрийских строматолитов позволил сопоставить хорбусуонскую серию с юдомским (вендским) комплексом [Комар, 1966; Вендская система..., 1985]. В настоящее время маастахская свита представляет нижний отдел венда, а хатыспытская и туркутская свиты – верхний отдел венда Оленекского поднятия [Мельников и др., 2005]. Нижняя граница туркутской свиты совпадает с основанием немакит-далдынского яруса [Рогов и др., 2015].

Дальнейшие исследования, направленные на детализирование представлений о разрезах хорбусуонской серии и венда в целом, составе отложений, фациальной изменчивости и мощностей свит Оленекского поднятия, активно проводились в 1980-х гг. такими исследователями, как М.С. Якшин, С.А. Воданюк, Г.А. Карлова [Карлова, Воданюк, 1985; Якшин, Воданюк 1986; Воданюк, 1987; Якшин, 1987]. Ими было установлено, что породы хорбусуонской серии залегают с размывом на различных горизонтах дебенгдинской и хайпахской свит верхнего рифея. Хатыспытская свита залегает на маастахской с размывом. Выше по разрезу породы хатыспытской свиты согласно перекрываются породами туркутской (Рисунок 1.2.1) [Журавлев, Сороков, 1954; Якшин, Воданюк, 1986].

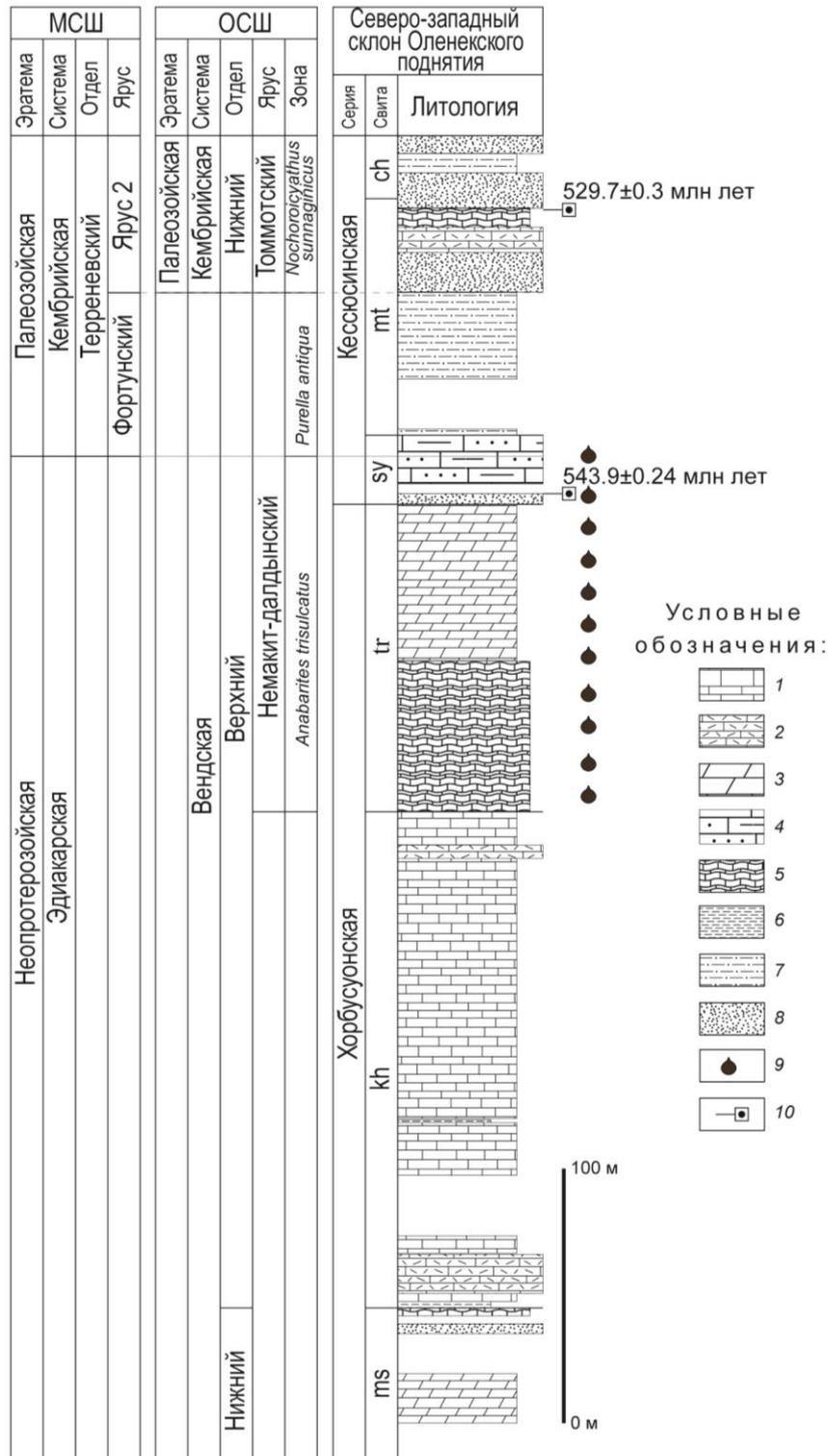


Рисунок 1.2.1 – Литолого-стратиграфическая характеристика сводного разреза верхнепротерозойских и палеозойских отложений северо-западного склона Оленекского поднятия (по: [Pelechaty et al., 1996; Рогов и др., 2015; Nagovitsin et al., 2015; Marusin, Grazhdankin, 2018; Grazhdankin et al., 2020]).

Условные обозначения: 1 – известняки; 2 – известняки интракластовые; 3 – доломиты; 4 – чередование известняков песчанистых и аргиллитистых; 5 – микробиялитовые доломиты; 6 – аргиллиты; 7 – алевролиты; 8 – песчаники; 9 – уровни пород с битумами [Каширцев и др., 2019]; 10 – U-Pb датирование циркона из туфобрекчий, прорывающих хорбусуонскую серию [Bowring et al., 1993]. Свиты: ms – маастакская; kh – хатыспытская; tr – туркутская; sy – сыаргалахская; mt – маттайская; ch – чускунская

Выше по разрезу на туркутских доломитах с размывом залегают породы кессюсинской серии [Рогов и др., 2015; Nagovitsin et al., 2015; Кочнев и др., 2020; Рогов, 2022] (ранее свиты [Воданюк, 1987; Мельников и др., 2005]) венд-кембрийского возраста (см. рисунок 1.2.1). Выше надстраиваются палеозойские отложения.

Вопрос о делении хатыспытской свиты на подсвиты долгое время оставался открытым ввиду сложного строения и «мозаичного» характера обнаженности ее разреза [Мельников и др., 2005]. Последние работы по систематическому изучению разрезов неопротерозоя и раннего палеозоя северо-востока Сибирской платформы, проводимые сотрудниками лаборатории палеонтологии и стратиграфии докембрия ИНГГ СО РАН, позволили впервые разделить хатыспытскую свиты на четыре подсвиты [Nagovitsin et al., 2015; Рогов, 2018, 2022; Гражданкин, Рогов, 2020]. Также по их результатам пачка *«переслаивающихся песчаников кварцевых серых и серо-зеленых (слои 0,3–0,8 м) и вишневых алевролитов и аргиллитов (слои 0,4–0,7 м)»* и *«2-метровый пласт серых песчаников»* [Якшин, Воданюк, 1986, разрез 66 в устье ручья Хатыспыт, с. 25], ранее считавшихся базальным горизонтом хатыспытской свиты, отнесены к верхам маастахской свиты [Nagovitsin et al., 2015]. Такое решение обусловлено тем, что эта пачка развита в разрезах ручьев Улахан-Уэттах и Балаганах (долина р. Кютингде), где остальная часть хатыспытской свиты отсутствует [Шпунт и др., 1979; Nagovitsin et al., 2015].

В основании первой подсвиты хатыспытской свиты залегает пласт аргиллитов серых, рассланцованных (мощность 3,3 м). Дальнейший ее разрез состоит из прослоев (от 3–9 см до 25–40 см) и пачек (от 1,1–3,7 до 7 м) интракластовых доломитизированных известняков, чередующихся с прослоями грубослоистых известняков (0,8–1,8 м) и интервалами тонкослоистых известняков (от 0,2–0,6 до 1,2 м). Интракластовые известняки встречаются в виде каналов мощностью до 7 м, протяженных по латерали на десятки и сотни метров и характеризующимися различными структурами деформации мягких тел. Мощность первой подсвиты составляет 25 м. Вторая подсвита хатыспытской свиты представлена интервалами (от 2–14 см до 1,2–2,4 м) переслаивания известняков и

*глинисто-известковых сланцев* (термин использован в работе [Якшин, Воданюк, 1986]), чередующихся с прослоями (от 3–8 до 16–23 см) и пачками (0,5–3,8 м) тонкослоистых известняков, слойками (8–25 см) грубослоистых известняков, пропластками (8–95 см) интракластовых известняков. Мощность подсветы составляет 50 м. Третья подсвета хатыспытской свиты мощностью 100 м построена из прослоев и пачек (от 15–20 см до 2,5–3,6 м) тонкослоистых известняков, чередующихся с грубослоистыми известняками (от 0,3–0,5 до 2,2–2,6 м) и маломощными интервалами тонкого переслаивания известняков и глинисто-известковых сланцев (3–20 см). Четвертая подсвета хатыспытской свиты представлена интракластовыми доломитизированными известняками (0,35–1,2 м), тонкослоистых известняков (0,1–1,37 м) и интервалов чередования тонких слоев известняков и глинисто-известковых сланцев. Ее максимальная измеренная мощность составляет 17 м. Общая мощность хатыспытской свиты по последним оценкам составляет около 190 м [Nagovitsin et al., 2015; Рогов, 2018, 2022; Гражданкин, Рогов, 2020].

Первой подсвете соответствует часть разреза, описанная М.С. Якшиным и В.А. Воданюком в обнажении на устье ручья Хатыспыт:

*«Мощность, м*

*2. Аргиллиты серые, рассланцованные . . . . . 3,3*

*...На терригенных породах у устья р. Хатыспыт залегает пласт 3 комковатых доломитов, брекчиевидных . . . . . 3,5»*

и в обнажении между ручьями Малый Маастах и Хаялах:

*«3. Известняки черные, тонкоплитчатые и полосчато-слоистые (плитки 0,5–2,0 см, иногда 1–5 мм), отдельные прослои до 20–30 м (вероятно, 20–30 см – прим. автора) и единичные до 1,5–4 м массивных известняков. В кровле пачки отпечатки бесскелетных Metazoa – *Nimbia*, *Beltanelloides* . . . . . 29»*

[Якшин, Воданюк, 1986, с. 25].

Детальное описание участка разреза, примерно соответствующего второй подсвете, выполнено в обнажении между ручьями Малый Маастах и Хаялах (№ 58 по: [Якшин, Воданюк, 1986]; № 0601 по: [Nagovitsin et al., 2015]):

«Мощность, м

4. Доломиты светлые до белых, тонкослоисто-полосчатые (первые мм и меньше), тонкоплитчатые до листоватых, в средней части пачки прослой (5 м) темно-серых доломитов. По поверхности напластования характерны глинистые примазки . . . . . 17

5. Известняки черные (антропоконитовые), тонкоплитчатые, в 7 м от подошвы прослой (1,5 м) доломитов светло-серых, тонкоплитчатых.

6. Внизу (4 м) сланцы известковистые, листовые черные с прослоями (0,5–3 см) черных известняков, на поверхностях напластования следы илоедов, отпечатки бесскелетных Metazoa – *Hiemalora*, *Ediacaria?*, выше – известняки, черные и темно-серые, глинистые, сверху редкие, тонкие (по 3–7 мм) прослой желто-серых доломитов, в кровле также листоватые известково-глинистые сланцы (3 м) . . . . . 37»

[Якшин, Воданюк, 1986, с. 25].

Выше по разрезу, в объеме, примерно соответствующем третьей подсвите, залегают:

«Мощность, м

7. Известняки зернистые, темные, коричневые тонкоплитчатые (3–10 мм), прослой среднеплитчатых, прослой (до 2 м) сланцев листовых, известково-глинистых и мергелей . . . . . 30,5

8. Переслаивание известняков коричневых тонкоплитчатых (слои до 1,5 м) и известняков средне-, толстоплитчатых, иногда массивного облика, прослой серых глинистых известняков . . . . . 17

9. Известняки глинистые, плитчатые, коричневые и мергели тонкоплитчатые, светлые, коричневато-серые . . . . . 37

10. Выше, на плоской вершине, россыпь плиток (толщиной 0,3–1,5 см) доломитов желтых, глинистых, с тонкими (менее 1 мм) прослойками известняков . . . . . до 5

Выше разрез надстраивается по левому борту долины р. Хорбусуонка и р. Анабыл... Здесь на коричневых известняках... с единичными прослоями доломитов (по 20–70 см) залегают:

2. Доломиты средне-, тонкоплитчатые, местами известковистые с резко подчиненными прослоями известняков темно-серых . . . . . 8,5

3. Переслаивание белых и желтых доломитов, серых и темно-серых известняков; все породы тонкоплитчатые. Обнаружены отпечатки бесскелетных Metazoa – Paliella, Kullingia, Hiemalora, Nimbia . . . . . 10

4. Доломиты и известняки коричневые, кристаллические, тонкоплитчатые . . . . . 15,3»

[Якшин, Воданюк, 1986, с. 26].

Четвертой подсвите соответствует следующее описание разреза:

«Мощность, м

5. Доломиты коричневые, кристаллические, плитчатые, с прослоями массивных. Обнаружены... Metazoa – Nemiana, Nimbia . . . . . 12»

[Якшин, Воданюк, 1986, с. 26].

Известняки в разрезе хатыспытской свиты плотные, тонкоплитчатые и сланцеватые, слоистые и микрослоистые. Их цвет, как правило, темно-серый, нередко черный, обусловленный, по-видимому, битуминозностью [Журавлев, Сороков, 1954; Якшин, Воданюк, 1986, Воданюк, 1987, Мельников и др., 2005]. Анализ текстуры под микроскопом показал, что сланцеватость известняков обусловлена чередованием слоев с криптокристаллической и мелкозернистой структурой, а также прослоек обломочного кварца [Журавлев, Сороков, 1954]. Из породобразующих компонентов в известняках нередко отмечается глинистая составляющая. Единично в разрезе встречаются мергели [Якшин, Воданюк, 1986]. Все известняки хатыспытской свиты имеют резкий запах сероводорода и явные признаки битуминозности, такие как гнезда битума до 20–30 см [Якшин, Воданюк, 1986].

Доломиты в хатыспытской свите распространены не так широко, как известняки. Чаще всего они имеют цвет светлых тонов – белый, светло-серый,

желтоватый, желтый, но иногда темно-серый (в нижней части разреза) и коричневый (в верхней). Отдельность имеет характер от плитчатой до тонкоплитчатой вплоть до листоватой. Как правило, доломиты отмечаются в виде прослоев, чередующихся с известняками. Часто они приурочены к зонам разломов и распространения интрузивных тел основного состава [Якшин, Воданюк, 1986, Воданюк, 1987, Мельников и др., 2005].

Данные об абсолютном возрасте пород хорбусуонской серии были получены в конце XX века при анализе циркона U-Pb методом, изъятых из перекрывающих туркутскую свиту стратиформных брекчий (см. рисунок 1.2.1). Установленный возраст составляет  $543,9 \pm 0,3$  млн лет [Bowring et al., 1993]. Позже были проведены хемотратиграфические реконструкции, по которым возраст хатыспытской свиты и нижней части туркутской свиты был определен в интервале 550–544 млн лет [Pelechaty et al., 1996].

*Хараютэхская свита* была выделена С.И. Грошиным в 1956 году в составе кембрия на восточном склоне хребта Туора-Сис. Позже им был признан синийский возраст этих отложений [Виноградов, 1962]. Первоначальное наименование свиты «*хара-юеттэхская*», данное по названию ручья Хара-Юеттэх, в бассейне которого она выделена [Виноградов, 1962], впоследствии упростилось до «*хараюэтэхская*» (или «*хараюэтэхская*») [Коробов, 1963; Журавлева, 1964; Проблемы образования..., 1979; Шпунт и др., 1979, 1982; Хабаров, Изох, 2014]. В диссертации используется название «*хараютэхская*», приведенное в стратиграфическом словаре Р.О. Галабалой [Стратиграфический словарь..., 1994].

В начале 1960-х годов З.А. Журавлевой на основе определений микрофитолигов хараютэхская свита была отнесена к юдомскому (вендскому) комплексу [Журавлева, 1964; Шпунт и др., 1982]. В последующем новые исследования ассоциаций микрофитолигов в отложениях вендского возраста Сибирской платформы подтвердили этот вывод [Комар, 1966; Якшин, 1978].

Хараютэхская свита с размывом залегает на сизэачанской свите рифея и с размывом перекрывается палеозойскими отложениями – тюсерской (тэсэрской) свитой нижнего кембрия [Виноградов, 1962; Коробов, 1963; Журавлева, 1964;

Крылов и др., 1971; Шпунт и др., 1979, 1982]. Стратотип выделен на левом берегу р. Лена, в 4 км ниже поселка Чекуровка, недалеко от устья ручья Бискээбит [Шпунт и др., 1982].

В начале 1960-х гг. было показано, что хараютэхская свита имеет гетерогенное строение и по своему породному облику схожа с хорбусуонской серией Оленекского поднятия [Виноградов и др., 1962]. М.Н. Коробовым было предложено трехчленное строение хараютэхской свиты [Коробов, 1963]. Впоследствии границы между подсвитами были уточнены Б.Р. Шпунтом с коллегами, ими же дано подробное описание разреза, которое приведено ниже (Рисунок 1.2.2) [Шпунт и др., 1979].

Нижняя подсвита хараютэхской свиты в основании имеет существенно терригенный состав пород, выше следуют отложения нормального трансгрессивного цикла:

*«1. Пачка грубозернистых гравийных полевошпатово-кварцевых песчаников светло-серого, серо-зеленого и бордового цвета. Песчаники содержат линзовидные прослой (2–10 см мощности) гравелитов с единичными мелкими уплощенными гальками. Слоистость пород перекрестная, пучковидная, пологоволнистая с индексами волновой ряби 5:70 см. Мощность пачки 20 м.*

*2. Окремнелые доломиты желто-серые, светлые, с желтой выветрелой поверхностью, с тонкой горизонтальной и пологоволнистой слоистостью, толсто- и среднеплитчатые. В кровле пачки проходит прослой (0,4 м) доломитовой брекчии... .. Кровля пачки размыта. Видимая мощность пачки 26 м.*

*Видимая мощность подсвиты 46 м» [Шпунт и др., 1979, с. 35].*

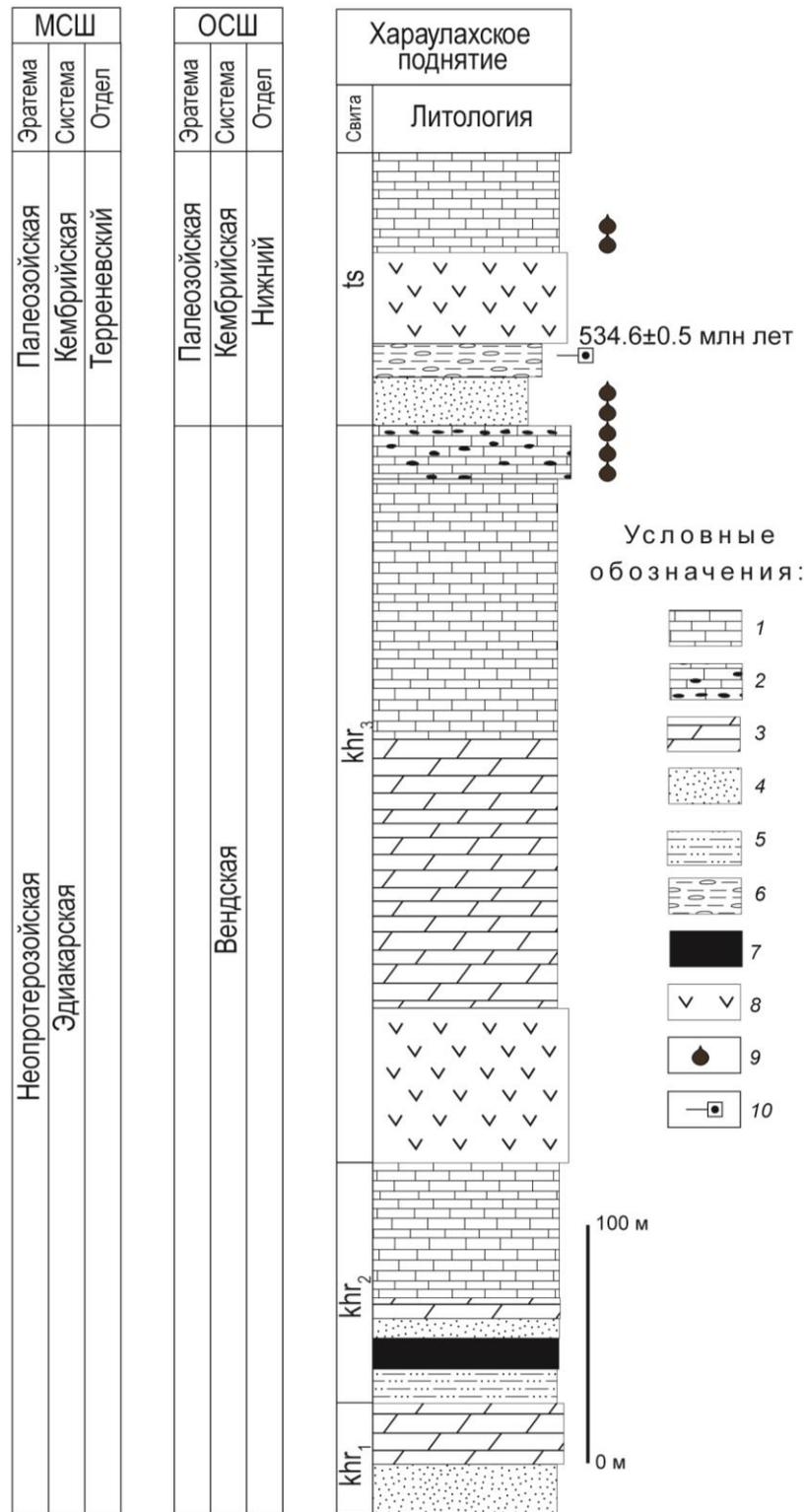


Рисунок 1.2.2 – Литолого-стратиграфическая схема разреза верхнепротерозойских и палеозойских отложений Хараулахского поднятия (по: [Коробов, 1963; Крылов и др., 1971; Шпунт и др., 1979, 1982]).

Условные обозначения: 1 – известняки; 2 – известняки онколитовые, кавернозные, битумонасыщенные; 3 – доломиты; 4 – песчаники; 5 – чередование аргиллитов и песчаников; 6 – конгломераты с галькой кварцевых порфиров; 7 – туфоалевролиты, туфоаргиллиты; 8 – долериты; 9 – интервалы пород с битумами [Гольдберг, 1981; Каширцев, 1988]; 10 – U-Pb датирование циркона из гальки кварцевых порфиров в конгломератах [Pelechaty et al., 1996; Покровский и др., 2016]. Свиты: khr – хараютэхская; ts – тюсерская

Средняя подсвета хараютэхской свиты надстраивается на нижележащих доломитах, подвергшихся размыву:

«3. В основании пачки залегают пятнистые зелено-бордовые алевролиты мощность около 3–4 м. Выше их сменяют сначала мелкозернистые, а затем грубозернистые гравийные песчаники полевошпат-кварцевого состава зеленовато-серого и бордового цвета, с тонкой горизонтальной и пологоволнистой слоеватостью. В песчаниках содержатся маломощные (до 10 см) линзовидные прослой гравелитов и плоскогалечных конгломератов с гематитовым цементом. Мощность этих пород около 15–20 м. Песчаники перекрываются покровом трахибазальтов мощностью около 7 м. Трахибазальты... ..сменяются сначала темно-серыми туфоподобными породами афанитового облика, а затем тонкослоистыми пестроцветными туфопесчаниками, туфоалевропесчаниками, туфоалевролитами. Мощность туфогенных пород 9–10 м.

Разрез пачки завершает прослой (4 м) песчаников желто-серых, средне-крупно-зернистых, с тонкой пологоволнистой и горизонтальной слоеватостью, толсто-, среднеплитчатых, с волнистыми поверхностями напластования... ..Мощность пачки около 40 м.

4. Массивные доломиты серые, розовые и желтые, с палево-желтой выветрелой поверхностью, слабоглинистые, комковатые, с брекчированными прослоями... ..Мощность 7 м.

5. Темные блестящие известняки. В основании пачки – массивный (0,5-0,7 м) темно-серый прослой, выше – известняки тонкоплитчатые, черные битуминозные, горизонтально-слоистые. Многочисленные трещины, ориентированные в основном поперек напластования пород, заполнены молочно-белым кальцитом. Мощность 40 м.

6. Чередование пачек массивных (по 0,7) и плитчатых (по 0,4-0,5 м) известняков. Известняки скрытослоистые, в массивных разностях есть линзы с микрофитолитами... ..Мощность 14 м.

*Суммарная мощность средней подсвиты хараютэхской свиты 100 м» [Шпунт и др., 1979, с. 35].*

Между средней и верхней подсвитами залегает межпластовый сил диабазов мощностью 65 м. Выше надстраиваются:

*«7. Кавернозные массивные доломиты, серые с палево-желтой выветрелой поверхностью, образующие просло-отдельности мощностью 3–5 м и более с редкими обособлениями кремней... ..Мощность слоя 113 м.*

*8. Известняки серые, пологоволнисто-слоистые, в основании плитчатые, выше сменяющиеся массивными, узловатыми и брекчированными. В 11 м от подошвы проходит 2-метровый пласт массивного желтовато-серого доломита. По всей толще рассеяны стяжения черных кремней... ..Мощность слоя 110 м.*

*9. Известняки пепельно-серого цвета, полосчатые, обломочные и микрофитолитовые, массивные, с гнездами, заполненными антраксолитом... ..Кровля пачки размыта. Видимая мощность 23 м» [Шпунт и др., 1979, с. 36].*

Мощность всей хараютэхской свиты в обнажениях на р. Лена и в скважине Дьяппальская-1 составляет около 460 м [Шпунт и др., 1979, 1982; Геологический..., 1988].

По некоторым данным, верхняя часть хараютэхской свиты, вскрываемая в пределах Булкурской антиклинали (около ручьев Улахан-Альдархай и Тюсер), сложена «черными листовыми доломитами» [Миссаржевский, 1989].

Детальное описание разреза средней подсвиты хараютэхской свиты в правом борту р. Нелегер в 10–12 км от ее устья (правый приток р. Лена, напротив поселка Чекуровка) выполнено С.Ф. Бахтуровым (1987):

*«1. Доломиты серые, иногда полосчатые, разноплитчатые и массивные, прослолки пологоволнистые, часто с глыбовой отдельностью, слабо пахнут битумом, мелкозернистые, с редкими онколитами округлой и неправильной формы, отдельные кристаллы доломита в породе замещены кварцем шестоватого строения. В верхней половине пачки залегает пласт мощностью 7,0 м крупнозернистого темно-серого кварцевого песчаника... ..Мощность 21,5–22,0 м.*

2. Аргиллиты черные, сланцеватые, прослоями разрушенные, ровно- и пологоволнисто-слоистые, обогащенные органическим веществом, переслаиваются с известняками тонко- и крупнокристаллическими, темно-серыми, черными и коричневатыми, разноплитчатыми, иногда мелкооскольчатými, тонкополостчатыми. Мощность прослоев аргиллитов изменяется от 0,05 до 1,9 м, в них иногда отмечаются гнездообразные образования (высотой до 0,4 м и длиной 0,2–0,3 м), выполненные вторичным кварцем, заместившим кристаллы кальцита... Мощность 11,1 м.

3. Аргиллиты черные, тонколистоватые, иногда полуразрушенные, обогащены органическим веществом, с тонкими редкими прослойками черных и темно-серых битуминозных известняков (мощностью 1–5 см – 0,4 м)... Мощность 15,7 м.

4. Аргиллиты черные, тонколистоватые, обогащенные органическим веществом, равномерно переслаиваются с темно-серыми и черными битуминозными известняками, часто с блестками, темно- и крупнокристаллическими, изредка микрокомковатыми. В известняках иногда отмечаются редкие зерна обломочного кварца алевритовой размерности... Мощность 11,1 м.

5. Известняки серые, темно-серые и черные, прослоями полосчатые, разнокристаллические, разноплитчатые и массивные, изредка с глыбовой отдельностью, образует либо слои мощностью до 3,3 м, либо линзовидные тела (длиной до 1,5–2, мощностью до 0,4 м), залегающие в черных аргиллитах; последние встречаются в пачке в подчиненном количестве... Мощность 9,4 м.

6. Доломиты серые и темно-серые, волнисто-слоистые иногда полосчатые, разнокристаллические, битуминозные, изредка брекчированные, с гнездами пирита, переслаиваются с черными тонколистоватыми аргиллитами и тонко-среднеплитчатыми темно-серыми и коричневато-серыми кристаллическими известняками с блестками, имеющие, как и аргиллиты, подчиненное значение... Мощность 10,9 м.»

Мощность разреза средней подсвиты хараютэхской свиты в долине ручья Нелегер составляет 80,2 м [Бахтуров, 1987].

Абсолютные датировки пород хараютэхской свиты отсутствуют. Датирование цирконов из галек конгломератов нижней подсвиты тюсерской свиты показало, что его возраст составляет  $534,6 \pm 0,4$  млн лет [Pelechaty et al., 1996] (см. рисунок 1.2.2).

На основе фациального сходства и изотопных характеристик углерода карбонатов предполагается, что хорбусуонская серия и хараютэхская свита являются стратиграфическими аналогами [Крылов и др., 1971; Шпунт и др., 1982; Бахтуров, 1987; Knoll et al., 1995; Pelechaty et al., 1996].

***Магматизм на северо-востоке Сибирской платформы в вендское и раннекембрийское время.*** На Оленекском поднятии и в северной части Предверхооянского краевого прогиба в разрезе осадочного чехла широко распространены интрузивные и вулканогенно-осадочные образования, которые описываются еще с 1950-х годов [Журавлев, Сороков, 1954; Виноградов, 1962; Коробов, 1963; Крылов и др., 1971; Шпунт и др., 1979, 1982; Якшин, Воданюк, 1986; Pelechaty et al., 1996]. На Оленекском поднятии выделяется тас-юряхский вулканический комплекс, объединяющий трубки взрыва, туфобрекчии, силлы, дайки и покровы базальтов в разрезе венда и кембрия [Рогов и др., 2015; Chaуka et al., 2020].

При выделении хатыспытской свиты В.С. Журавлев и Д.С. Сороков отмечали в ее разрезе секущие дайки диабазов и «*обилие пластовых залежей диабазов*» [Журавлев, Сороков, 1954]. Позже, Р.Б. Шпунтом с коллегами был проведен детальный анализ распространения, природы и состава вулканогенных и вулканогенно-осадочных образований в разрезе венда Оленекского и Хараулахского поднятий [Шпунт и др., 1979, 1982].

В хатыспытской свите в разрезе на устье ручья Анабыл ими был описан туфолавовый базальтовый покров мощностью 5 м и протяженностью 3 км в северном направлении. Покров залегает на мраморизованных известняках, мощность мраморизованной приконтактной зоны составляет 0,2–0,3 м.

В кровле базальты сменяются тонкослоистыми тефроидами и туфоалевролитами. Верхний контакт с вмещающими битуминозными известняками «холодный» [Шпунт и др., 1979].

Выше в разрезе хатыспытской свиты описываются туфобрекчии. Одно из тел описано в устье ручья Анабыл. Оно представляет собой небольшой карман шириной около метра и высотой около двух метров. Кровля этого тела перекрывается тонкоплитчатыми битуминозными известняками. Ксенолиты в туфобрекчиях представлены битуминозными мраморизованными известняками, пепловыми туфами, базальтами [Шпунт и др., 1979, 1982]. Хатыспытская и туркутская свиты, а также базальные песчаники сыаргалахской свиты кессюсинской серии прорываются туфобрекчиями, слагающими трубки взрыва, они описаны на реках Хорбусуонка, Керсюке [Шпунт и др., 1982; Рогов и др., 2015].

Извержение базальтовых потоков происходило, вероятнее всего, под водой [Шпунт и др., 1979, 1982; Chaika et al., 2020]. На основе текстурного, геохимического и минералогического сходства было выдвинуто предположение, что базальтовые потоки и долеритовые включения в трубках взрыва на Оленекском поднятии связаны с единым магматическим событием [Chaika et al., 2020].

Помимо базальтовых покровов и туфобрекчий в разрезе хатыспытской свиты и средней подсвиты хараютэхской свиты отмечены прослой туфов, туфопесчаников, туфоалевролитов различного состава и степени измененности в гипергенезе [Шпунт и др., 1979, 1982; Рогов, 2018].

На Хараулахском поднятии средняя и верхняя подсвиты хараютэхской свиты разделены мощным (65 м) силлом трахидолеритов поздневендского-раннекембрийского возраста [Шпунт и др., 1982]. Базальная пачка тюсерской свиты включает лавовый покров трахибазальтового состава (см. рисунок 1.2.2). В устье ручья Бискеебит он составлен двумя телами мощностью 5 и 48 м, разделенными песчаниками и конгломератами. В долине ручья (в 1 км от устья) фиксируется пять потоков мощностью 1–5 м, также разделенные песчаниками и конгломератами. При этом, не наблюдается активных термальных контактов с вмещающими терригенными породами [Шпунт и др., 1979, 1982].

Анализ текстурных особенностей и вещественного состава вулканогенных пород показал, что на Оленекском поднятии и севере Предверхооянского прогиба проявлялся эксплозивный магматизм щелочного (трахитового) состава. В позднем венде происходили подводные излияния трахибазальтовых лав, затем следовали извержения щелочных ультракалиевых вулканических пеплов [Шпунт и др., 1979, 1982]. Щелочной магматизм при этом, по мнению Р.Б. Шпунта, мог быть связан с условиями проявления континентального рифтообразования [Шпунт и др., 1979].

### **1.3 Геохимия пород и органического вещества вендских отложений**

В 1950–1980-х годах в рамках регионального этапа нефтегазопроисследовательских работ на Сибирской платформе специалисты НИИГА, СНИИГГиМС, ВНИГРИ, ВАГТ, ИГ (Якутский филиал) и других научных и научно-производственных организаций занимались исследованием геохимии ОВ нефтематеринских отложений докембрия и раннего палеозоя. Методика исследований включала определение содержания в породах органического углерода, хлороформенного битумоида; выделение керогена из дебитуминизированных проб; определение элементного состава битумоида и керогена, группового состава битумоида; изучение синбитумоидов и керогенов методом ИК-спектроскопии; определение форм железа и серы в породах [Граммберг, 1958; Натапов, 1962; Натапов и др., 1968; Баженова и др., 1981; Геология нефти..., 1981; Конторович и др., 1981; Соболев, 1983; Изосимова и др., 1985].

В 1962 году в одной из первых работ по геохимии ОВ хатыспытской свиты Л.М. Натаповым впервые опубликовано содержание органического углерода в породах, выходы и групповой состав битумоидов; свита оценивается в качестве одного из основных потенциально нефтематеринских горизонтов на северо-востоке Сибирской платформы [Натапов, 1962].

Позже, как результат крупного обобщения результатов аналитического исследования ОВ, были опубликованы схематические карты распределения органического углерода и катагенеза ОВ в нефтегазоматеринских горизонтах

домезозойских отложений Сибирской платформы, карты и количественные оценки масштабов генерации и эмиграции нефти и газа в верхнепротерозойских отложениях Сибирской платформы [Баженова и др., 1981; Геология нефти..., 1981; Конторович и др., 1981]. Согласно им, на северо-востоке Сибирской платформы средневзвешенные концентрации  $C_{орг}$  составляют от 0,1–0,2% до 0,3–0,5%, повышаясь до 10–15% в отдельных горизонтах. Катагенез ОВ хатыспытской свиты соответствует градации  $МК_1^1$ , палеоглубина максимального погружения – 2050 м. Согласно карте масштабов генерации и эмиграции нефти в верхнепротерозойских отложениях ( $V-C_1$ ), на северо-востоке их масштабы оцениваются менее, чем в 50 тыс. т/км<sup>2</sup> нефти и 50 млн м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup> газа [Баженова и др., 1981; Геология нефти..., 1981; Конторович и др., 1981].

Дальнейшее изучение геохимии ОВ хатыспытской свиты с 1990-х годов проводилось с использованием газожидкостной хроматографии и хромато-масс-спектрометрии для анализа углеводородов-биомаркеров [Конторович и др., 1995; Каширцев, 2003, 2004]. Новый этап изучения ОВ, его атомно-молекулярного состава, включая исследование ароматических углеводородов и сернистых соединений начался в XXI веке [Kontorovich et al., 2009; Парфенова и др., 2010; Parfenova et al., 2011; Duda et al., 2016; Каширцев и др., 2018, 2019]. Эти исследования подтвердили, что породы хатыспытской свиты обогащены рассеяным ОВ ( $C_{орг}$  обычно на уровне 0,2–0,3%, до 4,2%), его катагенез соответствует градации  $МК_1^1$  (по шкале А.Э. Конторовича (1976)). Впервые на основе состава насыщенных углеводородов было показано, что окислительно-восстановительные условия в хатыспытском бассейне не были постоянными. Гаммацераи, присутствующий в повышенных концентрациях (>3%), по мнению авторов, указывает на повышенную соленость вод морского бассейна. Дана характеристика состава и распределения фенантроновых УВ нафто-ароматических фракций битумоидов. На основе изотопных характеристик углерода и состава насыщенных углеводородов-биомаркеров обоснована генетическая связь ОВ хатыспытской свиты и битумов Центрально-Оленекского и Восточно-Куонамского скоплений (см. раздел 1.5) [Конторович и др., 1995;

Каширцев, 2003, 2004; Парфенова и др., 2010; Duda et al., 2016; Каширцев и др., 2018, 2019].

В последние годы специалистами научно-исследовательских и научно-производственных организаций (ИНГГ СО РАН, ВНИГНИ, ВНИГРИ, СНИИГГиМС, МГУ, Лукойл-Инжиниринг, Росгео и других) проводятся исследования ОВ нефтематеринских пород для обоснования геохимических критериев нефтегазоносности Лено-Анабарского прогиба и сопредельных территорий [Бакай и др., 2016; Каширцев и др., 2018, 2019; Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2020, 2021; Найденов, 2021]. В опубликованных материалах приводятся генерационные характеристики пород хатыспытской и хараютэхской свит, сведения по содержанию в породах ОВ и его зрелости. На основе анализа пород и ОВ вендских отложений из скважин и естественных обнажений были построены прогнозные схематические карты содержания в породах  $C_{орг}$  и  $b_{хл}$ , катагенеза ОВ, интенсивности эмиграции битумоидов и генерации газообразных УВ на севере Сибирской платформы [Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021]. Согласно этим данным, средневзвешенные концентрации  $C_{орг}$  в вендских нефтегазоматеринских горизонтах составляют 0,25%, максимальные – прогнозируются на юго-востоке Лено-Анабарского прогиба (0,2–0,5%). Интенсивность эмиграции битумоидов и генерации газов оцениваются в 100–200 тыс. т/км<sup>2</sup> и 100–200 м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup> соответственно [Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021].

Еще в 1960–1980-х годах специалистами ВНИГРИ были рассчитаны масштабы генерации и эмиграции нефти и газа из пород хатыспытской свиты. Их величины были оценены менее чем в 50 тыс. т/км<sup>2</sup> для нефти и <50 млн м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup> для газа [Баженова и др., 1981]. Позже эти оценки были существенно уточнены: согласно им, масштабы эмиграции нефти из пород хатыспытской свиты и хараютэхской свиты составляют 0,04–0,08 млн т/км<sup>2</sup> и 0,01–0,03 млрд м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>, а общее количество генерированных УВ (при площади очага нефтеобразования в 80 тыс. км<sup>2</sup>, восточная граница контура очага проведена по р. Лена) составляет 5,5 млрд т нефти и 1,9 трлн м<sup>3</sup> газа [Баженова и др., 2014].

Специалистами СНИИГГиМС и Лукойл-Инжиниринг проводилась работа по оценке геохимических критериев нефтегазоносности рифей-палеозойских отложений Лено-Анабарского прогиба [Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021]. Согласно выполненным расчетам объемно-генетическим методом, масштабы эмиграции битумоидов из вендских нефтематеринских пород составляют 120–230 тыс. т/км<sup>2</sup> в Лено-Анабарской НГО и 100–500 тыс. т/км<sup>2</sup> в Предверхоянской НГО, а генерации газа – 50–250 и  $\geq 300$  млн м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup> в двух НГО соответственно [Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021].

Известно, что хатыспытская свита на отдельных уровнях содержит многочисленные отпечатки эдиакарских макроорганизмов [Sokolov, Fedonkin, 1984; Grazhdankin et al., 2008; Vykova et al., 2017]. Поэтому интерес к изучению ее рассеянного органического вещества (в особенности углеводородов-биомаркеров) обусловлен необходимостью не только региональных геохимических исследований, но и проведением палеобиологических, палеоэкологических реконструкций [Duda et al., 2016, 2019, 2020; Melnik et al., 2019].

При участии автора в 2017 году в ИНГГ СО РАН начат новый этап геохимического исследования ОВ вендских отложений северо-востока Сибирской платформы [Парфенова, Мельник, 2019; Melnik et al., 2019; Мельник и др., 2020, 2023; Duda et al., 2020; Melnik, Parfenova, 2021; Parfenova et al., 2021; Мельник, 2022].

Первые крупные исследования геохимии минерального вещества пород докембрийских и раннепалеозойских отложений северо-востока Сибирской платформы проводились с 1960–1970-х годов [Крылов и др., 1971; Шпунт и др., 1979, 1982]. Методами аналитической химии определялось содержание в карбонатных и терригенных породах (в % мас.) нерастворимого остатка и основных породообразующих оксидов (FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, CO<sub>2</sub>) [Крылов и др., 1971; Шпунт и др., 1979].

В 1990-х годах такими исследователями, как Э. Нолл, Ал. Дж. Кауфман, Ш. Пелечатый и другими, изучались разрезы хорбусуонской серии и хараютэхской свиты [Knoll et al., 1995, Pelechaty et al., 1996a, 1996b]. Анализировалось

содержание в породах железа, марганца, стронция, магния, кальция. Исследовались изотопные характеристики углерода (карбонатного и органического), кислорода, стронция.

Современные изотопно-геохимические исследования пород хатыспытской свиты проводятся с целью оценки окислительно-восстановительных условий в бассейне, реконструкции обстановок обитания эдиакарской макрофауны, хемотратиграфических корреляций с разрезами неопротерозоя Сибири, Евразии, Африки, Америки [Kaufman et al., 2013; Вишневская и др., 2013; Cui et al., 2016; Кочнев и др., 2020; Izokh et al., 2021; Cherry et al., 2022].

***Возрастные и фациальные аналоги вендских отложений северо-востока Сибирской платформы на территории Евразии.*** В геологической истории Земли возникали условия для формирования обогащенных ОВ отложений. В вендский период такие осадочные последовательности накапливались в осадочных бассейнах на территории Евразии, Австралии, Северной и Южной Америки, Африки [Жарков, Бахтуров, 1989; Peters, Moldowan, 1993; Конторович и др., 1996; 1999; Баженова, Арефьев, 1998; Тимошина, 2004, 2005; Grosjean et al., 2009; Craig et al., 2013; Deplomdor et al., 2018].

Рассматривая отложения вендского возраста на Сибирской платформе, следует отметить следующее. В 1986 году Межведомственным стратиграфическим комитетом были приняты стратиграфические схемы вендских отложений внутренних районов Сибирской платформы. Согласно им, в разрезе венда выделяются региональные горизонты, прослеживаемые почти по всей Сибирской платформе – непский, тирский и даниловский [Решения..., 1989; Мельников и др., 2005].

Потенциально нефтегазоматеринские породы встречены на отдельных уровнях непского горизонта, который представлен непской свитой на юго-востоке центральной части Сибирской платформы, в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы. Возрастными аналогами непской свиты являются: курсовская свита Непско-Ботуобинской антеклизы, сералахская свита Березовской впадины и северо-западного склона Алданской антеклизы; нижняя подсвита чорской свиты

Ангаро-Ленской ступени Иркутского осадочного бассейна на юге Сибирской платформы; ванаварская свита в Байкитском осадочном бассейне на западе Сибирской платформы; хатыспытская свита Оленекского поднятия на северо-востоке Сибирской платформы [Конторович и др., 1994а, 1994б; Мельников и др., 2005; Баженова и др., 2014; Иванова, 2016]. Суммарная площадь распространения потенциально нефтегазоматеринских пород непского горизонта по данным специалистов ВНИГРИ составляет 1414 тыс. км<sup>2</sup> [Баженова и др., 2014].

Тирский горизонт представлен тирской свитой Ангаро-Ленской ступени Иркутского осадочного бассейна, оскобинской свитой Байкитской антеклизы и Катангской седловины на западе Сибирской платформы, бюкской свитой Непско-Боубинской антеклизы [Мельников и др., 2005; Баженова и др., 2014]. Площадь распространения этого горизонта составляет 2052,2 тыс. км<sup>2</sup> [Баженова и др., 2014].

В составе даниловского горизонта потенциально нефтегазоматеринские породы отмечаются в катангской свите (и ее аналоге в Байкало-Патомском регионе – успунской свите), вышележащей собинской свите (и ее аналоге в Байкало-Патомском регионе – кудулахской свите), широко распространенных в южных, западных и центральных районах Сибирской платформы, а также тинновской свите Патомского нагорья на юго-западе Сибирской платформы [Мельников и др., 2005; Тимошина, 2005]. Площадь распространения даниловского горизонта составляет 1681,4 тыс. км<sup>2</sup> [Баженова и др., 2014].

На юге Сибирской платформы вендские отложения представлены марнинской свитой венда, которая в нижней части сложена чередованием диамиктитов, тиллитов, валунных брекчий, а в верхней – доломитами и озерными черными аргиллитами, алевролитами с линзами песчаников. Геохимия ОВ аргиллитов свиты изучена на двух образцах [Каширцев и др., 2009б].

Свиты в разрезе венда Сибирской платформы, рассматриваемые в качестве потенциально нефтематеринских, имеют сложное строение и чаще всего представлены чередованием интервалов терригенных и карбонатных пород – темноцветных аргиллитов, а также глинистых известняков и доломитов,

обогащенных рассеянным ОВ [Мельников и др., 2005; Тимошина, 2005; Баженова и др., 1981, 2014; Геология нефти..., 1981; Конторович и др., 1994а, 1994б].

На юго-востоке Западной Сибири (Предъенисейская нефтегазоносная субпровинция) скважинами вскрыт мощный (более 1000 м) разрез венда. На востоке этой территории (скв. Аверинская-150) он представлен сульфатно-карбонатными породами, на западе (скв. Восток-3) – карбонатными, нередко биогермными породами [Конторович и др., 2006; Филиппов, 2018]. Изучение органической геохимии 32 образцов керна из скважины Восток-3 (пойгинская, котоджинская и райгинская свиты) показало, породы обогащены рассеянным органическим веществом, а битумоиды имеют сингенетичную природу [Конторович и др., 2011].

Основные потенциально нефтегазоматеринские горизонты на Восточно-Европейской платформе имеют палеозойский возраст. Тем не менее в центральной и северной частях платформы, на территории Средне-Русского и Мезенского потенциально нефтегазоносных бассейнов описаны нефте- и газопроявления в докембрийских горизонтах. Предполагаются, что их источником были породы рифея и венда. Вендскому потенциально нефтегазоматеринскому горизонту соответствует редкинская свита Средне-Русского бассейна и ее аналог – усть-пинезская свита Мезенского бассейна [Баженова, 2016]. Редкинская свита с несогласием залегает на породах нижнего венда и сложена терригенными породами – чередованием песчаников сероцветных, зелено-серых, черных с аргиллитами и алевролитами бурыми и черными, обогащенными органическим веществом. Редкинская свита перекрывается породами котлинской свиты (горизонта) венда [Постникова и др., 1998]. Усть-пинезская свита залегает на породах рифея или кристаллического фундамента и также имеет существенно терригенный состав.

На Аравийской платформе в качестве потенциально нефтегазоматеринских рассматриваются свиты Бох, Масира Бэй, Шурам группы Нафан супергруппы Хакф позднего неопротерозоя-кембрия Солеродного Бассейна Южного Омана,

а именно – отдельные уровни пород, обогащенных органическим веществом [Grosjean et al., 2009; Craig et al., 2013].

Свита Масира Бэй залегает на свите Абу Махара неопротерозоя. Возраст ее нижней границы определен на уровне 635 млн лет. Свита представлена чередованием пачек аргиллитов, песчаников, в верхней ее части залегает мощный прослой известняков, который перекрывается пачкой аргиллитов. Мощность свиты составляет около 140 м. Выше по разрезу надстраивается свита Хафай, имеющая карбонатный состав (известняки в нижней части, доломиты в верхней части). В ее разрезе нет пород, которые могли бы рассматриваться в качестве потенциально нефтематеринских. Выше с несогласием залегает свита Шурам. Ее нижняя часть (около 110 м) имеет существенно терригенный состав и представлена пластом песчаников в основании и аргиллитами выше. Верхняя часть (около 170 м) составлена чередованием пластов аргиллитов, песчаников с пачками доломитов и известняков. Свита Бох мощностью около 180 м венчает группу Нафан и несогласно перекрывается свитой Бирба группы Ара. Она состоит преимущественно из доломитов, отмечаются редкие прослои аргиллитов [Grosjean et al., 2009; Craig et al., 2013].

В Китае на платформе Янзцы в разрезе неопротерозойских отложений в качестве нефтегазоматеринских рассматриваются свиты Доушаньто нижнего синия (возраст подошвы <635 млн лет) и вышележащей свиты Денин верхнего синия (возраст кровли 542 млн лет), развитых в Сычуаньском бассейне [Craig et al., 2013; Shi et al., 2018], а также свита Лантиан [Zeng et al., 2016].

Нижняя часть формации Доушаньто составлена чередованием черных алевроаргиллитов со сланцеватыми известняками, выше залегают две мощные пачки доломитов и известняков. Разрез свиты завершает десятиметровый пласт черных известковых сланцев с белыми карбонатными конкрециями. Потенциально нефтематеринскими породами в ее разрезе считаются черные известковые сланцы в кровле свиты. Выше по разрезу залегает свита Денин, в ее составе выделено четыре подсвиты. Первая составлена доломитами, вторая – водорослевыми доломитами, третья – аргиллитами, четвертая – доломитами массивными

и водорослевыми. Суммарная мощность потенциально нефтематеринских пород в разрезе Денин (общая мощность свиты порядка 400 м) составляет около 100 м. Они представлены темно-серыми и голубовато-серыми аргиллитами [Craig et al., 2013; Shi et al., 2018]. В формации Лантиан распространены алевролиты, в средней ее части (вторая подсвита, занимающая большую часть разреза) залегают черные сланцы с редкими маломощными прослоями доломитов и известняков. Выше надстраивается третья подсвита, состоящая только из известняков. Завершают разрез черные сланцы четвертой подсвиты [Zeng et al., 2016].

Анализ опубликованных материалов показывает, что органическая геохимия потенциально нефтегазоматеринских пород в разрезе венда (эдиакария, синия) на Сибирской и других платформах активно изучается начиная с середины XX века. Результаты исследований показывают, что породы отложений позднего неопротерозоя, обогащенные ОВ, генерировали углеводороды и являются одними из источников промышленных скоплений нефти и газа на территории Сибири, Аравии, Китая и других районов [Баженова и др., 1981, 2014; Баженова и др., 1994; Конторович и др., 1996; Тимошина, 2004, 2005; Grosjean et al., 2009; Craig et al., 2009, 2013; Дахнова и др., 2014; Иванова, 2015; Zeng et al., 2016; Duda et al., 2014; 2016; Shi et al., 2018 и многие другие].

#### **1.4 Условия и обстановки осадконакопления в вендское время**

Первые представления о развитии морского бассейна на северо-востоке Сибирской платформы в вендское время были изложены в середине XX века на основе литологии отложений Оленекского поднятия. По мнению В.С. Журавлева и Д.С. Сорокова, маастахские, хатыспытские и туркутские отложения Оленекского поднятия характеризуют единый седиментационный цикл. Авторы полагают, что их осадки накапливались в обширном засолявшемся бассейне, так как породы этих отложений представлены в основном доломитами. В 1950-е годы точно не было установлено, имеют ли они хемогенный генезис, или же образовались в результате диагенетической доломитизации известковистых

осадков [Журавлев, Сороков, 1954]. По мнению К.К. Демокидова, породы хорбусуонской серии (в частности, хатыспытской свиты) накапливались в условиях неглубокого, теплого эпиконтинентального бассейна, в котором отлагались преимущественно карбонатные породы [Демокидов, 1956].

Палеотектонические реконструкции показывают, что северо-восточная окраина Сибирской платформы в вендское время представляла собой пассивную континентальную окраину [Хаин, 2001; Никишин и др., 2010]. В позднем венде–раннем кембрии на этой территории шли процессы рифтообразования, сопровождавшиеся щелочным магматизмом и образованием системы грабенообразных структур [Шпунт и др., 1982; Метелкин и др., 2012; Kiselev et al., 2016; Chaika et al., 2020]. Это согласуется с моделью формирования хатыспытской свиты в интракратонном рифтовом бассейне [Гражданкин, Рогов, 2020; Рогов, 2022].

Палеомагнитные исследования показывают, что Сибирская платформа на рубеже венда и кембрия могла находиться в тропической или субтропической зоне Южного полушария [Метелкин и др., 2012]. Палеомагнитное изучение вулканогенных образований тас-юряхского магматического комплекса на территории Оленекского поднятия позволили Д.В. Метелкину с коллегами предположить, что положение этой структуры соответствовало  $\sim 30^\circ$  южной широты [Метелкин и др., 2022].

В 1960–1980-х годах под руководством А.Э. Конторовича проводились работы по анализу закономерностей накопления ОВ в позднекембрийских и кембрийских осадочных комплексах Сибирской платформы [Геохимия..., 1972; Конторович и др., 1981]. А.Э. Конторовичем и А.И. Ларичевым было выполнено обобщение данных по содержанию ОВ в вендских отложениях, построены литолого-фациальные и палеогеографические схемы Сибирской платформы. Согласно этим схемам, на северо-восточной окраине платформы было развито мелкое внутреннее Западно-Якутское море. В его западной части была повышенная соленость вод, шло накопление доломитовых илов, в восточной части (Оленекское

поднятия, низовье р. Лена) – шло накопление известковых и глинистых илов в условиях нормальной солености вод [Конторович и др., 1981].

Накопленный объем стратиграфических исследований протерозойских и раннепалеозойских отложений Сибирской платформы позволил исследователям составить схему структурно-фациального районирования венда [Решения Четвертого..., 1989; Мельников и др., 2005]. Согласно ей, в позднем венде на юго-западе Сибирской платформы начал формироваться солеродный бассейн, а на северо-востоке платформы развивалась область открытого морского бассейна. В солеродном бассейне формировались доломитовые осадки, ангидриты, гипсы, соли. Осадки открытого моря характеризовались преимущественно известковым составом. Хатыспытская свита и средняя подсвита хараютэхской свиты накапливались в открытом морском бассейне с нормальным карбонатным осадконакоплением. Венд северо-востока платформы объединен в Лено-Анабарский и Хорбусуонской районы Оленекского структурно-фациального региона [Шенфиль, 1991; Pelechaty et al., 1996; Мельников и др., 2005].

Крупное комплексное литологическое, седиментологическое и хемо-стратиграфическое исследование хорбусуонской серии Оленекского поднятия проводилось в 1990-х годах [Knoll et al., 1995; Pelechaty et al., 1996a, 1996b]. Согласно этим работам, хатыспытская свита представляет собой крупную трансгрессивную последовательность. Смена песчаников маастахской свиты на черные известняки хатыспытской свиты, обогащенные органическим веществом, может указывать на формирование осадков хатыспытской свиты в условиях стратификации водной толщи, которая способствовала развитию аноксии в бассейне. Туркутская свита накапливалась при обмелении бассейна, обстановки осадконакопления менялись от глубоководных до мелководных, прибрежных, на что указывает последовательная смена тонкослоистых доломитов и известняков на грубослоистые, а затем и обломочные и оолитовые доломиты [Knoll et al., 1995; Pelechaty et al., 1996a, 1996b].

По результатам микрофациального анализа карбонатных пород хатыспытской свиты В.И. Роговым выделено несколько микрофаций

и микрофациальных типов [Рогов, 2018, 2022]. Их интерпретация с привлечением данных по текстурно-структурным особенностям пород позволила ему реконструировать условия осадконакопления в хатыспытском морском бассейне. Первая подсвита хатыспытской свиты (деление по [Nagovitsin et al., 2015]) характеризует обстановки средней части внешнего рампа (по терминологии В. Ар (1973) рамп – крупное карбонатное тело, расположенное на пологих склонах в удалении от суши, один из видов карбонатной платформы). Вторая подсвита характеризует дистальные обстановки внешнего рампа. Третья и четвертая подсвиты накапливались в пределах среднего и дистальных обстановок внутреннего рампа [Рогов, 2018, 2022].

По последним данным, в истории развития хатыспытского осадочного бассейна выделяется три стадии. Первая охватывает первую и вторую подсвиты хатыспытской свиты и представляет собой трансгрессивный латеральный фациальный ряд, ограниченный поверхностью максимальной регрессии снизу и поверхностью максимального морского затопления сверху. Вторая стадия знаменует регрессивный латеральный фациальный ряд и отвечает третьей подсвите, третья – трансгрессивный фациальный ряд и отвечает четвертой подсвите хатыспытской свиты [Гражданкин, Рогов, 2020; Рогов, 2022].

В юго-западных, восточных и южных разрезах хатыспытской свиты (относительно разрезов на среднем течении р. Хорбусуонка) преобладают грубослоистые известняки и доломиты, что указывает на их формирование в проксимальных частях рампа. Вместе с этим палеонтологические исследования показывают, что многочисленные отпечатки стеблевидных организмов во всем разрезе хатыспытской свиты имеют северо-западное простирание. Это позволило исследователям предположить наличие направленных палеотечений, проградацию осадочной системы и снос обломочного материала в северо-западном направлении [Гражданкин, Рогов, 2020].

Вышележащая туркутская свита как осадочная система формировалась в условиях высокого стояния уровня моря. Предполагается, что она имеет более широкое площадное распространение, чем хатыспытская свита, и соответствует

стадии обширного затопления северо-западной окраины Оленекского поднятия [Рогов, Карлова, 2020; Рогов, 2022].

Исследования геохимии органического вещества пород хатыспытской свиты также позволили сделать ряд предположений об условиях ее накопления [Конторович и др., 1995; Каширцев, 2003, 2004; Kontorovich et al., 2009; Парфенова и др., 2010; Каширцев и др., 2019; Duda et al., 2020]. По наблюдаемым типам распределения гопановых углеводородов был сделан вывод о чередовании окислительно-восстановительных обстановок в хатыспытском бассейне. На основании повышенных концентраций гаммацераана в некоторых образцах (>3% на сумму терпанов) было высказано предположение об аномальной солености вод в морском бассейне.

В работе [Cui et al., 2016] приведены результаты хемотратиграфических исследований интервала разреза хатыспытской свиты мощностью 130 м. Известно, что отношение  $Ce/Ce^* = [Ce]PAAS / ([Pr]2PAAS / [Nd]PAAS)$ , где Ce, Pr и Nd – редкоземельные элементы, а PAAS – постархейский австралийский глинистый сланец, тесно связано с окислительно-восстановительными условиями в морской воде. Для хатыспытской свиты по всему разрезу характерны повышенные значения  $Ce/Ce^*$ , в среднем составляющие  $0,84 \pm 0,06$ . Они могут свидетельствовать об аноксичных условиях. Как считают авторы, это предположение подтверждается текстурными признаками известняков, обогащенностью органическим веществом (среднее  $C_{org} = 0,28\%$ ) и данными по изотопии органического углерода ( $\delta^{13}C_{org}$  варьирует от -41,0 до -24,1‰) [Cui et al., 2016]. Изотопный состав серы пирита и сульфатов в ассоциации с карбонатами (значения  $\delta^{34}S_{pyr} < 0\%$  относительно стандарта CDT,  $\Delta\delta^{34}S > 30\%$ ), а также повышенное содержание карбонат-ассоциированной серы (до 2000 ppm) позволили сделать вывод о распространении сильных эвксинных условий при накоплении нижней части изученного разреза (45 м) и неэвксинных – при накоплении верхней (85 м) [Cui et al., 2016].

По мнению авторов [Cherry et al., 2022], весь разрез хатыспытской свиты накапливался в условиях развития эвксинии (сероводородного заражения вод бассейна). Это предположение основано на результатах изотопного-

геохимического исследования пород с целью реконструкции условий обитания эдиакарской макробиоты. Исследование показало, что значения отношения  $Se/Se^*$  для хатыспытской свиты  $>0,9$ . Авторы связывают это с развитием аноксии – бескислородных условий. Значения  $\delta^{238}U <0,15\%$ , что, по мнению авторов, указывает на глобальное распространение эксинных условий в позднем эдиакарии-раннем кембрии [Cherry et al., 2022].

Анализ кернового материала из скважин Лено-Анабарского прогиба (см. рисунок 1.1.1) позволил И.В. Вараксиной и Р.Д. Шаварову реконструировать обстановки седиментации, существовавшие на этой территории в вендское время [Вараксина, Шаваров, 2020]. Алевро-песчанистые отложения маастахской свиты отражают прибрежно-морские обстановки, установившиеся в результате наступления моря в районе современного положения Лено-Анабарского прогиба. Отсутствие маастахской свиты в центральных разрезах Лено-Анабарской нефтегазоносной области, по мнению авторов, указывает на крупный региональный внутривендский перерыв в осадконакоплении. Накопление осадков вышележащей карбонатно-глинистой толщи (возрастной аналог хатыспытской свиты) происходило в обстановках, относительно удаленных от береговой линии и приближенных к области глубокого шельфа, наличие которой предполагается на северо-востоке Лено-Анабарского прогиба. На это указывает преобладание в этой толще глинистых известняков и характерные осадочные текстуры (какие именно, в работе авторов не обсуждается) [Вараксина, Шаваров, 2020]. В туркутской свите запечатлено обмеление карбонатного шельфа. На это указывает накопление биоморфных и микритово-зернистых доломитов, характерных для литоральной зоны. Затем произошло кратковременное осушение южной окраины бассейна. В раннекексюсинское время восстановились относительно глубоководные обстановки дистального шельфа (оппокунская свита кексюсинской серии). Дальнейшее накопление осадков происходило с существенным поступлением терригенного материала в бассейн (прибрежное мелководье при активном влиянии приливно-отливных течений) [Вараксина, Шаваров, 2020].

В 1990-х годах выполнялось седиментологическое и литологическое изучение вендских отложений на Оленекском поднятии и Хараулахском выступе [Knoll et al., 1995; Pelechaty et al., 1996a; 1996b]. Фациальный анализ пород хараютэхской свиты показал, что ее нижняя часть, как и маастахская свита хорбусуонской серии, накапливалась в условиях мелководья, знаменуя начало крупного трансгрессивного цикла. Последующее накопление осадков (средняя и верхняя подсвиты хараютэхской свиты) происходило в чередующихся глубоководных и мелководных обстановках [Pelechaty et al., 1996a, 1996b].

***Вендский уровень северо-востока Сибирской платформы как уникальный объект для изучения эдиакарской макробиоты.*** Около 540 млн лет назад в начале кембрийского периода произошло одно из главных событий в эволюции биосферы Земли, известное как «кембрийский взрыв». Это понятие объединяет серию принципиально важных изменений в биологии и экологии живых существ, а также отвечает резкому увеличению количества остатков организмов в геологической летописи. Причины и природа этого события остаются фундаментальной проблемой геологических наук. Важным для решения этой проблемы является изучение отложений периода, предшествующего началу фанерозоя – венда (эдиакария). В этот промежуток времени появились первые многоклеточные организмы – представители эдиакарской биоты или вендобионты. Предметом активных дискуссий остаются их систематическое положение, условия обитания, тип питания и взаимоотношения внутри экосистемы [Соколов, 1962, 1976; Sokolov, Fedonkin, 1984; Grazhdankin, Seilacher, 2002, 2005; Kelly, 2009; Retallack, 2013; Grazhdankin, 2014; Duda et al., 2014, 2016, 2020; Cui et al., 2016; Vykova et al., 2017; 2020; Bobrovsky et al., 2018, 2022; Pehr et al., 2018; Fang et al., 2019; Cherry et al., 2022].

Большинство скоплений остатков эдиакарской биоты приурочено к отложениям, представленными силикокластическими и вулканогенно-осадочными породами. Такого рода местонахождения известны на острове Ньюфаундленд в Канаде, Эдиакарских холмах в Австралии, в Южной Намибии, в Англии, на побережье Белого моря и на среднем Урале в России, и многих других

[Sokolov, Fedonkin, 1984; Grazhdankin, Seilacher, 2002, 2005; Grazhdankin, 2004, 2014; Weber et al., 2007]. На сегодняшний день в мире известны несколько объектов, где ассоциации отпечатков эдиакарской биоты присутствуют в карбонатных породах – это хатыспытская свита Оленекского поднятия и пачка Шибантан формации Денин синия (неопротерозоя) Южного Китая [Sokolov, Fedonkin, 1984; Grazhdankin et al., 2008; Weber et al., 2007; Duda et al., 2014, 2016].

Геохимическое исследование образца из пачки Шибантан в Южном Китае показало, что содержание ОБ в породах повышенное, концентрация  $C_{\text{орг}}$  составляет 0,6 %. Однако ОБ сильно преобразовано в катагенезе, на что указывают значения  $T_{\text{max}} > 500$  °С,  $HI = 125$  мг УВ/г  $C_{\text{орг}}$ . Стерановые и терпановые углеводороды почти полностью разрушены, их количество не позволяет качественно интерпретировать особенности их состава и распределения [Duda et al., 2014].

В этом отношении хатыспытская свита является одним из уникальных объектов. В ней не только присутствуют многочисленные отпечатки эдиакарской макробиоты, но и захоронено рассеянное ОБ, слабо преобразованное в катагенезе [Sokolov, Fedonkin, 1984; Конторович и др., 1995; Каширцев, 2003; Grazhdankin et al., 2008; Парфенова и др., 2010; Вукова et al., 2017, 2020; Каширцев и др., 2018, 2019; Мельник и др., 2019, 2020; Рогов, 2022]. Высокая сохранность углеводородов-биомаркеров позволяет реконструировать условия осадконакопления в хатыспытском море и состав исходных микробиосообществ, а также искать связь окислительно-восстановительных обстановок с развитием макробиоты [Конторович и др., 1995; Каширцев, 2003; Парфенова и др., 2010; Melnik et al., 2019; Duda et al., 2016, 2019, 2020].

## **1.5 Нефтегазоносность вендских и кембрийских отложений и геохимия нефтидов**

На северо-востоке Сибирской платформы еще с 1930-х годов систематически фиксируются прямые признаки нефтегазоносности – многочисленные битумопроявления, реже – нефтепроявления как на поверхности, так и в скважинах

[Гусев и др., 1950; Грамберг, 1961; Сороков, 1961; Копылова, 1962; Данюшевская и др., 1969; Баженова и др., 1979, 1981; Иванов, 1979; Геология нефти..., 1981]. На этой территории известны скопления и месторождения природных битумов, в том числе одно из крупнейших в России и во всем мире битумных месторождений – Оленекское. На Тюмятинской площади в скважине К-6 в породах пермского возраста был зафиксирован капельножидкий битум, а в скважине Р-50 (на глубине 730–740 м), также в породах перми – капельножидкая нефть и газопроявление, при опробовании скважины в интервалах глубин 840–890 м выделялся газ дебитом 50 м<sup>3</sup>/сут [Гусев и др., 1950; Баженова и др., 1979; Гольдберг, 1979; 1981; Иванов, 1979; Клубов, 1983; Геологический..., 1988; Каширцев, 1988, 2003; Каширцев и др., 2010; 2019; Поляков и др., 2011; Kashirtsev, Hein, 2013; Полякова, Борукаев, 2017]. На территории Анабарской НГО Лено-Тунгусской НГП и Предверхоаянской НГО Лено-Вилуйской НГП на сегодняшний день месторождений нефти или газа не открыто [Карта нефтегазоносности..., 2021].

Битумы северо-востока Сибирской платформы локализованы в широком стратиграфическом диапазоне – верхнем протерозое, нижнем и верхнем палеозое, в меньшей степени – в мезозое [Иванов, 1979; Клубов, 1983; Каширцев, 1988; Каширцев и др., 2010; Kashirtsev, Hein, 2013]. На этой территории выделяется несколько скоплений (месторождений, полей, зон битумопроявления) разной степени изученности. Наиболее крупные и известные из них это *Восточно-Анабарское (Куонамское), Медвежье, Центрально-Оленекское, Рассохинское, Силигир-Мархинское, Верхнемунское, Суханское* скопления и *Оленекское* месторождение (Рисунок 1.4.1) [Иванов, 1979; Гольдберг, 1981; Клубов, 1983; Каширцев, 1988].

Вопросу геохимии нафтидов в осадочном чехле северо-востока Сибирской платформы (Анабарская антеклиза и осложняющие ее восточное крыло структуры, Лено-Анабарский прогиб, северная часть Предверхоаянского краевого прогиба) посвящены исследования, проводимые К.К. Макаровым, М.К. Калинин, Т.Н. Копыловой, И.С. Гольдбергом, А.И. Данюшевской, Т.К. Баженовой, Б.А. Клубовым, И.Д. Поляковой, А.Э. Конторовичем, В.А. Каширцевым,

А.Ф. Сафроновым, Т.М. Парфеновой и многими другими [Копылова, 1962; Данюшевская и др., 1969; Иванов, 1979; Геология нефти..., 1981; Баженова и др., 1979, 1981; Гольдберг, 1981; Клубов, 1983; Полякова, Стасова, 1983; Каширцев, 1984; 1988, 2003, 2004; Каширцев и др., 1993; 2010; 2018; 2019; Сафронов и др., 2002; Парфенова и др., 2005, 2014]. В период 1950–1980-х годов исследовались общее содержание битумов в породе, групповой и элементный составы битумов, а также отношения между фракциями насыщенных и ароматических углеводородов битумов, металлопорфириновые комплексы, изотопный состав углерода. Начиная с 1980-х годов, с развитием аналитической базы, внимание исследователей было сосредоточено и на составе индивидуальных компонентов насыщенных и нафтено-ароматических фракций битумов. Подобные исследования проводятся и в XXI веке [Сафронов и др., 2002; Парфенова и др., 2005, 2014, 2018; Каширцев, 2003, 2004; Каширцев и др., 2010; 2018; 2019].

По результатам изучения геохимии битумов Оленекского поднятия В.Я. Кабаньковым, А.И. Данюшевской, Т.Н. Копыловой, Д.С. Сороковым, В.Л. Ивановым, И.С. Гольдбергом, В.А. Каширцевым было выделено две генетические группы битумов [Копылова, 1962; Каширцев и др., 1975; Иванов, 1979; Гольдберг, 1981; Клубов, 1983; Каширцев, 1988; Каширцев и др., 1997]. Первая сосредоточена в отложениях венда и кембрия, а вторая – перми. Предполагается, что источником для первой группы битумов служили потенциально нефтематеринские породы протерозойских отложений, а для второй – пермских (алевролиты и аргиллиты), обогащенные рассеянным органическим веществом [Иванов, 1979; Гольдберг, 1981; Клубов, 1983; Каширцев, 1988; Каширцев и др., 1997]. Далее в работе рассматриваются только битумы в вендских и кембрийских отложениях.

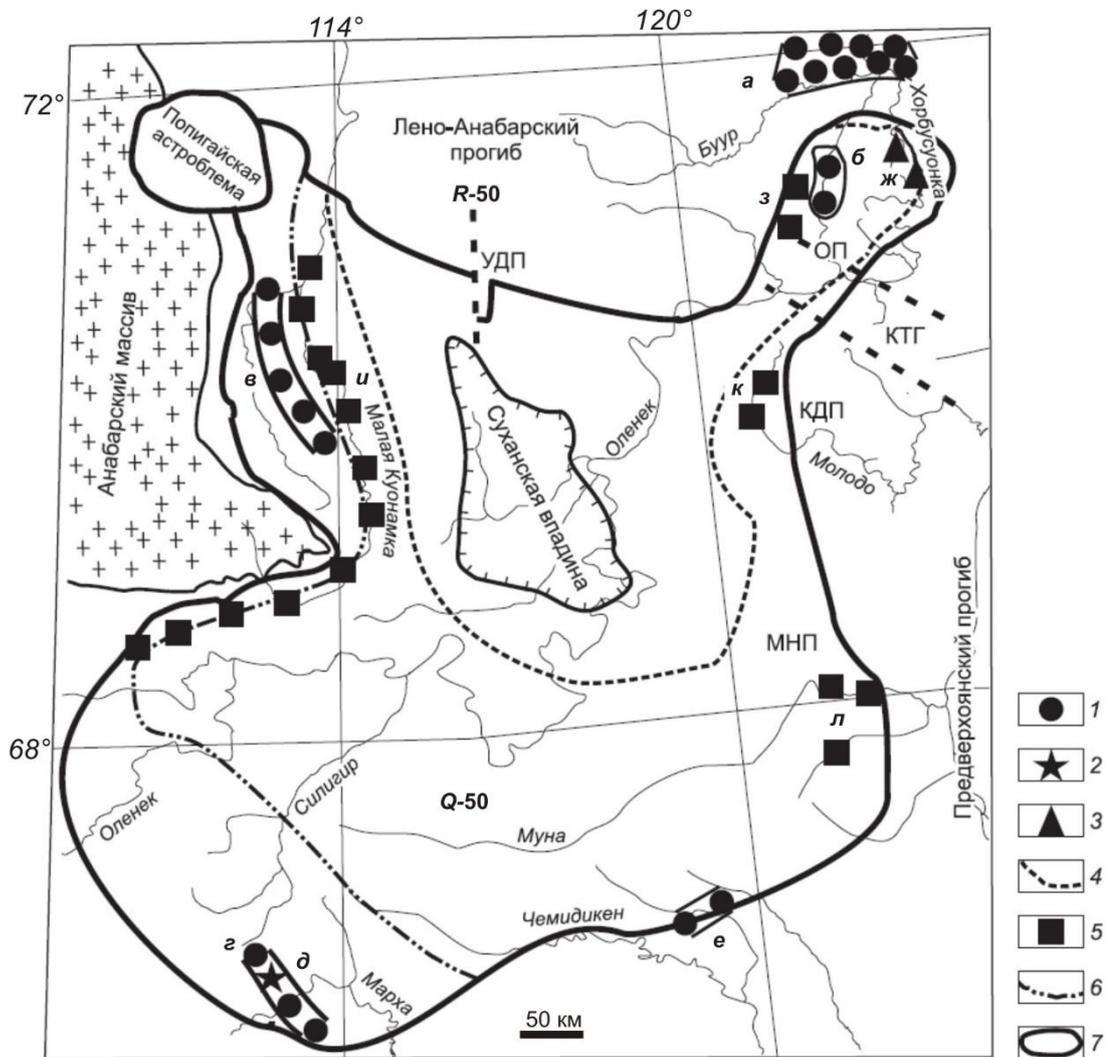


Рисунок 1.4.1 – Схема Суханского осадочного бассейна (по: [Каширцев и др., 2019]).

Условные обозначения: 1 – скопления природных битумов на поверхности; 2 – нефтепроявления в кимберлитовых трубках; 3 – разрезы хатыспытской свиты венда; 4 – границы распространения хатыспытской свиты; 5 – разрезы куонамской свиты кембрия; 6 – границы куонамской свиты; 7 – границы Суханского бассейна. Месторождения (скопления) природных битумов: *а* – Оленекское; *б* – Центрально-Оленекское; *в* – Восточно-Анабарское; *г* – Силигир-Мархинское; *д* – трубка Удачная; *е* – Верхнемунское. Обнажения разрезов нефтематеринских пород: *ж* – хатыспытская свита (венд), р. Хорбусуонка; *з* – куонамская свита (нижний-средний кембрий), притоки р. Оленек; *и* – куонамская свита, восточный и южный склоны Анабарского массива; *к* – куонамская свита, р. Молодо; *л* – куонамская свита, реки Муна, Кюленке. ОП – Оленекское поднятие, КТГ – Кютюнгдинский грабен, КДП – Куойско-Далдынское поднятие, МНП – Мунское поднятие, УДП – Уджинское поднятие

Битумы Восточно-Анабарского (Куонамского) скопления сосредоточены в породах верхней части старореченской свиты венда и манькайской свиты венда и нижнего кембрия, залегающей на старореченской свите с размывом [Гольдберг, 1981; Клубов, 1983; Каширцев, 1988; Мельников и др., 2005; Каширцев и др., 2019]. В венде толщина битумоносного горизонта варьирует от 2–3 до 15–20 м.

Пористость оолитовых и строматолитовых доломитовых известняков старореченской свиты достигает 9–13%, проницаемость – 6–30 мД, а содержание битумов в их пустотном пространстве (коллектор трещинно-порово-кавернозный) составляет обычно 0,7–1,0%, реже 2,2%. Битум черный, вязкий, относится к классам асфальтов и асфальтитов [Гольдберг, 1981; Клубов, 1983; Каширцев, 1988]. В разрезе чабурского горизонта отмечается несколько интервалов интенсивного битумонасыщения. Первый, по данным С.Ф. Духанина и Э.Н. Эрлиха, представлен базальным слоем переслаивающихся среднезернистых песчаников, гравелитов и мелкогалечных конгломератов, неравномерно насыщенных черным асфальтом (2,0–2,2 вес. %), а его мощность достигает 5 м [Гольдберг, 1981; Клубов, 1983]. По данным Д.С. Яшина и В.А. Каширцева мощность битумонасыщенной части этого интервала обычно составляет 0,3–2,0 м при концентрациях битума 0,6–1,7%, а в северной части скопления она возрастает до 4–5 м при содержании битума до 1,8% [Каширцев, 1988]. Второй интервал битумонасыщения отвечает третьей пачке чабурского горизонта. Она представлена глинистыми и песчанистыми разностями известняков и доломитов. Серые доломитистые известняки неравномерно пропитаны битумом типа асфальта [Клубов, 1983]. Содержание битума в них низкое – до 1,24% [Гольдберг, 1981], а по данным В.А. Каширцева – лишь до 0,4% [Каширцев, 1988]. Третий интервал битумонасыщения отмечается в кровле чабурского горизонта, его мощность достигает 12 м, битум содержится в песчаниках и карбонатных породах в концентрациях до 3,5%. Пористость песчаников и карбонатных пород составляет 11–21 и 3–5% соответственно, проницаемость – 25–1300 и 1–3 мД [Гольдберг, 1981].

Строение осадочного чехла на этой территории подразумевает пологое погружение (в среднем угол падения равен  $1^\circ$ ) вендских и кембрийских отложений на восток. При ограничении глубины погружения битумосодержащих пород в 50 м, ширина Восточно-Анабарского скопления оценивается в 2,5–6,5 км [Клубов, 1983], а при ограничении в 500 м – в 30 км [Гольдберг, 1981]. В последнем случае площадь распространения битумоносных пород будет составлять примерно

6000 км<sup>2</sup>, а масса битумов только в песчаных пластах – не менее 2,0–2,3 млрд т [Гольдберг, 1981].

По данным А.И. Данюшевской, в среднем битумы Восточно-Анабарского скопления характеризуются следующим групповым составом: на сумму углеводородов приходится 13–36%, смол – 21–48%, на асфальтены – 18–48% [Данюшевская и др., 1969]. В работах Д.С. Яшина, Б.А. Клубова и В.А. Каширцева групповой состав битумов приведен отдельно по кембрийским терригенным и карбонатным (чабурский горизонт) и по вендским карбонатным отложениям (старореченская свита) [Клубов, 1983; Каширцев, 1988]. В метано-нафтеновых фракциях битумов Восточно-Анабарского скопления были зарегистрированы нормальные и изопреноидные алканы, трицикланы, тетрацикланы, гопаны и стераны. Характерной особенностью битумов Восточно-Анабарского скопления является отсутствие среди алканов гомологов 12- и 13-монометилалканов в высоких концентрациях; высокие концентрации гаммацераана [Каширцев, 2003, 2004]. Среди стеранов максимальные концентрации наблюдаются для гомолога C<sub>29</sub>. В ряду гопанов C<sub>27</sub>–C<sub>35</sub>, как правило, доминирует гопан C<sub>30</sub> или адиантан C<sub>29</sub> [Каширцев, 1988; Каширцев и др., 2019]. Изотопный состав углерода битумов Восточно-Анабарского скопления легкий, значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$  в образце песчаника и конгломерата из нижнего кембрия составляют -34,1 и -34,4‰ соответственно [Каширцев, 1988]. Порфириновых комплексов в битумах на этой территории не обнаружено [Каширцев, 1988, 2003, 2004].

На Оленекском поднятии, по р. Оленек в приустьевой части р. Керсюке, было выделено Центрально-Оленекское битумное поле. Здесь битумы концентрируются в кавернах доломитов туркутской свиты и в поровом пространстве песчаников, гравелитов и конгломератов низов кессюсинской серии [Каширцев, 1988; Каширцев и др., 2010] (см. рисунок 1.2.1). В кровле туркутской свиты залегает горизонт кавернозных онколитовых доломитов мощностью 3-4 м. Каверны заполнены черным блестящим пороховидным битумом. Иногда он образует жильные скопления в трещинах и ассоциации с кальцитом. Содержание битума в борздовых пробах пород туркутской свиты начинается от тысячных и десятых

долей процента, а в отдельных штуфных пробах достигает 10% [Каширцев, 1988]. В кессюсинской серии битумом насыщены участки базальной терригенной пачки, текстуры битумонасыщения массивные, полосчатые, реже пятнистые. Мощность зон сплошного битумонасыщения варьируется от 0,3 до 4 м, содержание битума оценивается в 0,3–1,5%, реже достигает 2% [Каширцев, 1988].

Величина ресурсов битумов Центрально-Оленекского скопления оценивается в 150–200 млн т, а площадь распространения венд-нижнекембрийских битумонасыщенных пород – в 200 км<sup>2</sup> [Каширцев и др., 2010; 2019].

Распределение стеранов с преобладанием этилхолестана и высокие концентрации гаммацераана среди терпанов зафиксированы как в битумах Восточно-Анабарского и Центрально-Оленекского скоплений, так и в автохтонных битумоидах пород хатыспытской свиты, что указывает на их родство. Таким образом, хатыспытская свита рассматривается как один из источников битумов северо-востока Сибирской платформы, встреченных в карбонатных и терригенных породах верхнего венда и нижнего кембрия [Каширцев, 1988; 2003; 2004; Парфенова и др., 2010; Старосельцев и др., 2013; Каширцев и др., 2019; Соболев и др., 2019].

В Чарчыкской и Хастахской скважинах Лено-Анабарского прогиба (см. рисунок 1.1.1) встречены битумопроявления в вендских и кембрийских отложениях, где в породах отмечаются трещины, заполненные кальцитом и вязким битумом [Каширцев, 2003]. При испытании этих скважин из разных горизонтов венда и кембрия были получены притоки пластовых вод с растворенным газом дебитом до 659 м<sup>3</sup>/сут. [Каширцев, 2003]. В керне из скважины Бурская-3410 (интервал 2482–2487,6 м), представленном трещиноватыми известняками кессюсинской серии, был обнаружен нефтеподобный битум с содержанием УВ в 72,4% [Лежнин и др., 2021]. Анализ шлифов пород вендских отложений из керна скважин Чырчыкская-1, Хастахская-930 и Бурская-3410 показал наличие многочисленных стиллолитовых швов, каверн и трещин, заполненных битуминозным веществом, при этом наиболее интенсивное битумонасыщение наблюдается в туркутской свите [Вараксина, Шаваров, 2020]. В шлифах пород

кыстарахской толщи из скв. Усть-Оленекская-2370 обнаруживаются микротрещины, заполненные «глинисто-органическим веществом» [Граусман, 1995б, с. 138].

На севере Предверхоаянского краевого прогиба также распространены скопления и многочисленные проявления природных битумов в отложениях от верхнего протерозоя до верхнего палеозоя [Гольдберг, 1981; Клубов, 1983; Каширцев, 1988]. Впервые битумы в синийских отложениях хребта Туора-Сис (в настоящее время – верхнепротерозойских) были описаны В.И. Виноградовым [Виноградов, 1961]. И.С. Гольдбергом в 1970-х гг. было выделено Чекуровское скопление битумов на Хараулахском выступе, к которому были отнесены битумы в трещинах, кавернах верхнепротерозойских карбонатных пород и пустотном пространстве нижнепалеозойских терригенных пород, залегающих среди интрузий, а также в пермских песчаниках [Гольдберг, 1981]. Информация о многочисленных проявлениях керитов, антраксолитов, асфальтитов и мальт в протерозое, кембрии и перми Чекуровской и Булкурской антиклиналей обобщена в монографии Б.А. Клубова (1983). Позже В.А. Каширцевым был выделен Лено-Нордвикский битумный пояс от Предверхоаянского краевого прогиба на востоке до Анабаро-Хатангской седловины на западе. Он включает в себя Тигяно-Анабарское, Улахан-Юряхское и Нижнеленское битумные поля, последнее из которых находится в пределах территории исследования [Каширцев, 1988].

Нижнеленское битумное поле охватывает Чекуровскую, Булкурскую и Юттэхскую антиклинали Туорасисского выступа северной части Предверхоаянского краевого прогиба в низовьях р. Лены [Каширцев, 1988]. Битумопроявления на этой территории приурочены к верхневендским, кембрийским и пермским отложениям [Виноградов, 1961; Гольдберг, 1981; Клубов, 1983; Каширцев, 1988]. И.С. Гольдбергом были описаны включения графитизированного битума в трещинах и кавернах (5–7 см) мраморизованных доломитов верхней подсвиты хараютэхской свиты, залегающих непосредственно на мощном силле [Гольдберг, 1981]. Выше, в 10 м от интрузии, гнездовые скопления битумов (до 10–12 см) зафиксированы в кавернозных известняках

хараютэхской свиты, которые формируют пласт мощностью 6,0–6,5 м [Гольдберг, 1981; Клубов, 1983]. Еще выше по разрезу, в онколитовых известняках хараютэхской свиты, залегающих непосредственно под базальными песчаниками тюсерской свиты, В.А. Каширцевым были описаны проявления слабо преобразованных битумов типа мальт [Каширцев, 1988]. В кембрии (тюсерская свита) битумы типа мальт и асфальтов встречены в нескольких горизонтах песчаников и конгломератов мощностью от 1 до 7 м. Эти горизонты отделены друг от друга телами пластовых интрузий различной мощности (максимум до 35 м). Предполагается, что битумы заполнили поровое пространство песчаников после внедрения магматических тел [Гольдберг, 1981; Каширцев, 1988].

В скважине Дьяппальская-1 (см. рисунок 1.1.1) в интервале 2595–2598 м по данным газового каротажа отмечались повышенные газопоказания до 1,2 абс. % при фоновом значении 0,8% [Геологический..., 1988]. Битумопроявления в скважине заметны только в микроскопическом масштабе. Битум был обнаружен в шлифах карбонатных породах. Его содержание оценено от 3% (глубина 2765,1 м, битум желто-коричневый, аморфный, в виде прожилок) до 7% (глубина 2765,8 м, битум желто-коричневый, аморфный, в виде прожилок) и до 10% (глубина 3088,8 м, битум черный, метаморфизованный) [Геологический..., 1988].

## Глава 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общее количество исследованного материала включает 106 образцов хатыспытской свиты и 25 – хараютэхской свиты. Коллекция образцов хатыспытской свиты (53 шт.) из естественных обнажений вдоль р. Хорбусуонка и ее притоков (Рисунок 2.1, обн. 0601, 0602, 0604, 0605) передавалась Б.Б. Кочневым, Д.В. Гражданкиным и В.И. Роговым в 2006–2017 гг. в лабораторию геохимии нефти и газа ИНГГ СО РАН. В 2018 году из разрезов среднего течения р. Хорбусуонка автором был выполнен добор материала из обнажений 0601, 0602, собрана новая коллекция из обнажений 0603, 0607, 0701, 1853 (Рисунок 2.1) (всего – 53 образца).

Коллекция пород средней подсвиты хараютэхской свиты (21 образец), а также пород с битумами верхней подсвиты хараютэхской свиты (4 образца) была отобрана Т.М. Парфеновой и А.А. Постниковым в 2009 году из обнажения на левом берегу р. Лена (устье ручья, Бискеебит, в 4 км ниже пос. Чекуровка) (см. рисунок 1.1.2).

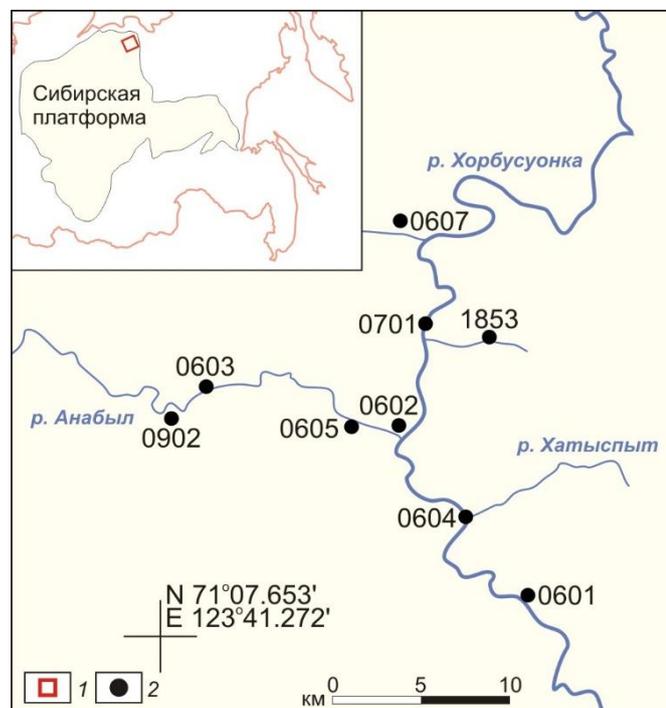


Рисунок 2.1 – Схема отбора образцов хатыспытской свиты на Оленекском поднятии. Условные обозначения: 1 – район отбора образцов; 2 – обнажения хатыспытской свиты

Исследование пород и ОВ проводились в лаборатории геохимии нефти и газа ИНГГ СО РАН в 2009–2011 гг, 2017–2022 гг. (при участии автора) по принятой в лаборатории методике (Рисунок 2.2). Анализ изотопного состава  $C_{орг}$ , определение форм серы и железа, рентгено-флюоресцентный анализ выполнялись в Центре коллективного пользования научным оборудованием многоэлементных и изотопных исследований в составе Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Основные виды и количество выполненных анализов пород, битумоидов и их фракций, битумов венда северо-востока Сибирской платформы

Методы исследования	Свита		
	Хатыспытская	Хараютэхская	
		Средняя подсвита	Верхняя подсвита
Общее количество образцов, шт.	106	21	4
Определение содержания НО в породах	106	21	4
Определение содержания $C_{орг}$ в породах	106	21	4
Пиролиз пород	74	19	–
Пиролиз НО	65	2	–
Экстракция битумоида из дробленных пород	79	21	4
Определение группового состава битумоида	76	21	4
Изотопное исследование $C_{орг}$	40	13	3
Газожидкостная хроматография метано-нафтеновых фракций	76	21	4
Хромато-масс-спектрометрия метано-нафтеновых фракций	76	21	4
Хромато-масс-спектрометрия нафтено-ароматических фракций	76	21	–



Рисунок 2.2 – Схема исследования пород и рассеянного органического вещества, используемая в настоящем исследовании

**Пробоподготовка.** Перед началом лабораторных анализов выполнено фотографирование и макроскопическое описание пород. Из спилов 32 образцов пород хатыспытской свиты, 1 образца маастахской свиты были изготовлены шлифы. Образцы пород были раздроблены до фракции  $<0,25\text{ мм}$ .

**Определение содержания нерастворимого остатка и органического углерода в породе.** Для определения содержания в породе органического углерода необходимо предварительно удалить ее карбонатную часть (представлена минералами, в составе которых присутствует анион  $[\text{CO}_3]^{2-}$ ), и получить нерастворимый остаток (НО). В настоящем исследовании содержание НО определяли с использованием 10%-й соляной кислоты. К навеске порошка породы

массой 2–5 г кислоту приливали по каплям до полного прекращения реакции с карбонатами. Через 15 минут стеклянный стакан с растворенной в кислоте пробой ставили на плиту, нагревали до появления на стенках стакана испарины, затем давали остыть и отстояться. Нерастворимые остатки промывали от кислоты через обеззоленный фильтр (синяя лента) дистиллированной водой. Контроль проводился при помощи метилоранжа. Промытые навески сушились при комнатной температуре 12 часов, затем несколько часов в шкафу при температуре 90 °С.

Определение содержания  $C_{\text{орг}}$  в % на массу породы было проведено на экспресс анализаторе АН-7529, в котором применен метод аналитического титрования по величине рН (аналитик – Н.В. Аксенова). Навески нерастворимых остатков (0,25–2,00 г) помещались в камеру сгорания на фарфоровой лодочке и сжигались в токе кислорода при температуре 1050–1100 °С. Выделившийся газ проходил по трубке в систему, состоящую из поглотительного раствора, вспомогательного раствора, катода и анода, и поглощался вспомогательным раствором, образуя кислоту. Изменение рН среды поглотительного раствора нивелировалось через подачу импульсов тока, протекающих через анод, вспомогательный раствор, поглотительный раствор, катод в соответствующем порядке. Количество электричества, потребовавшееся для нейтрализации кислоты, фиксировалось кулонометрическим детектором прибора, отградуированным в % массовой доли углерода.

Полученные значения  $C_{\text{орг}}$  пересчитывались на массу навески породы:

$$C_{\text{орг}} = \text{НО} * C_{\text{орг(НО)}}/100, \%$$

где:

$C_{\text{орг}}$  – содержание органического углерода в породе;

НО – содержание нерастворимого остатка в породе, %

$\text{НО} = 100 * \text{масса НО} / \text{масса породы}$

$C_{\text{орг(НО)}}$  – содержание органического углерода в нерастворимом остатке, фактически определяемое прибором, %.

Прибор АН-7529 обеспечивает следующие пределы относительных ошибок: при концентрации  $C_{\text{орг}}$ , равной 0,03–0,09% – 30%, при  $C_{\text{орг}} = 0,1–0,2\%$  – 10%, при  $C_{\text{орг}} = 1–3\%$  – 5%, и при  $C_{\text{орг}} > 3\%$  – 3%.

Всего выполнено 131 определение содержаний НО и  $C_{\text{орг}}$  в породе.

**Исследование изотопного состава органического углерода.** Под изотопным составом органического углерода понимается отношение концентраций его изотопов  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$ :  $R^{13}\text{C}_A = (^{13}\text{C}_A/^{12}\text{C}_A)$ , где  $A$  – исследуемый образец,  $C$  – концентрации соответствующих изотопов в исследуемой системе (образце). Указывается не абсолютный изотопный состав, а относительный стандарта: например,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  для образца  $A$ , в ‰, где  $\delta$  – «дельта», разница между изотопными составами анализируемого вещества и стандарта Pee Dee Belemnite, рассчитываемая как  $(R^{13}\text{C}_A/R^{13}\text{C}_{\text{PDB}} - 1) \times 10^3$  [Изотопная..., 2011; Hoefs, 2018].

Определение изотопного состава органического углерода пород венда северо-востока Сибирской платформы проводилось в Центре коллективного пользования научным оборудованием многоэлементных и изотопных исследований СО РАН. Навески нерастворимых остатков пород и твердых битумов были проанализированы методом проточной масс-спектрометрии на изотопном масс-спектрометре Thermo Fisher Finnigan MAT-253 с использованием линии пробоподготовки Conflo III и Flash EA-1112 (аналитик – к.х.н. А.Н. Пырьев).

Пробы массой 5–100 мкг помещали в оловянные капсулы и плотно сворачивали для удаления воздуха, капсулы помещали в предварительную капсулу автосэмплера, где происходило замещение воздуха гелием. В элементном анализаторе Flash EA-1112 пробы сжигались в окислительном реакторе (для заполнения реактора использовали оксид меди и посеребренный оксид кобальта) при температуре 900 °С с образованием  $\text{CO}_2$ , который в дальнейшем проходил через восстановительный реактор (восстановленная медная проволока, температура 680 °С), затем поступал в масс-спектрометр через хроматографическую капиллярную колонку в потоке гелия с постоянной скоростью потока (интерфейс Conflo III). Молекулы  $\text{CO}_2$  ионизировались в блоке ионного источника, затем проходили через изогнутую пролетную трубу

в магнитном поле, и улавливались системой детектирования масс ( $m/z$  (масса/заряд) 44, 45, 46).

Все измерения проводили относительно материалов сравнения МАГАТЭ (International Atomic Energy Agency – IAEA): NBS-22 и IAEA-CH-7, USGS24. Результаты представлены относительно стандарта Pee Dee Belemnite. Погрешность измерений не превышала 0,1%. Всего выполнено 56 определений изотопного состава  $C_{орг}$ .

**Пиролиз** в нефтяной геологии со второй половины XX века используется как экспресс-метод для первичной оценки обогащенности пород ОВ, зрелости, типа ОВ, миграции нафтидов [Тиссо, Вельте, 1981; Peters, 1986; Ломатин, Емец, 1987; Меленевский, 1991; Behar et al., 2001; Богородская и др., 2005; Peters et al., 2005].

Пиролизатор представляет собой автоматизированную систему, состоящую из микропечи, пламенно-ионизационного детектора (ПИД), детектора по теплопроводности или инфракрасных детекторов, блока подготовки и регулировки потоков газа, усилителя постоянного тока, хроматографической колонки, блока клапанов. Масса анализируемой пробы (порода, НО, битум) обычно составляет 70–100 мг.

Процесс анализа состоит из двух автономных циклов. В автоматическом режиме контейнер с пробой направляется в печь, где нагревается согласно заданной программе. В первом цикле продукты пиролиза выносятся потоком газа-носителя (гелия) из области нагрева и на выходе поступают в ПИД, регистрирующий углеводородную компоненту (Рисунок 2.3). Углекислый и угарный газы – продукты крекинга органического вещества – регистрируются детектором в инфракрасной ячейке [Тиссо, Вельте, 1981; Меленевский, 1991]. Вторым циклом, идущим либо одновременно с первым, либо после него, подразумевается окисление ОВ в токе кислорода атмосферы при нагревании по заданной программе (Рисунок 2.3) [Behar et al., 2001]. Результаты анализа выдаются в табличной форме и в графической в виде пирограммы.

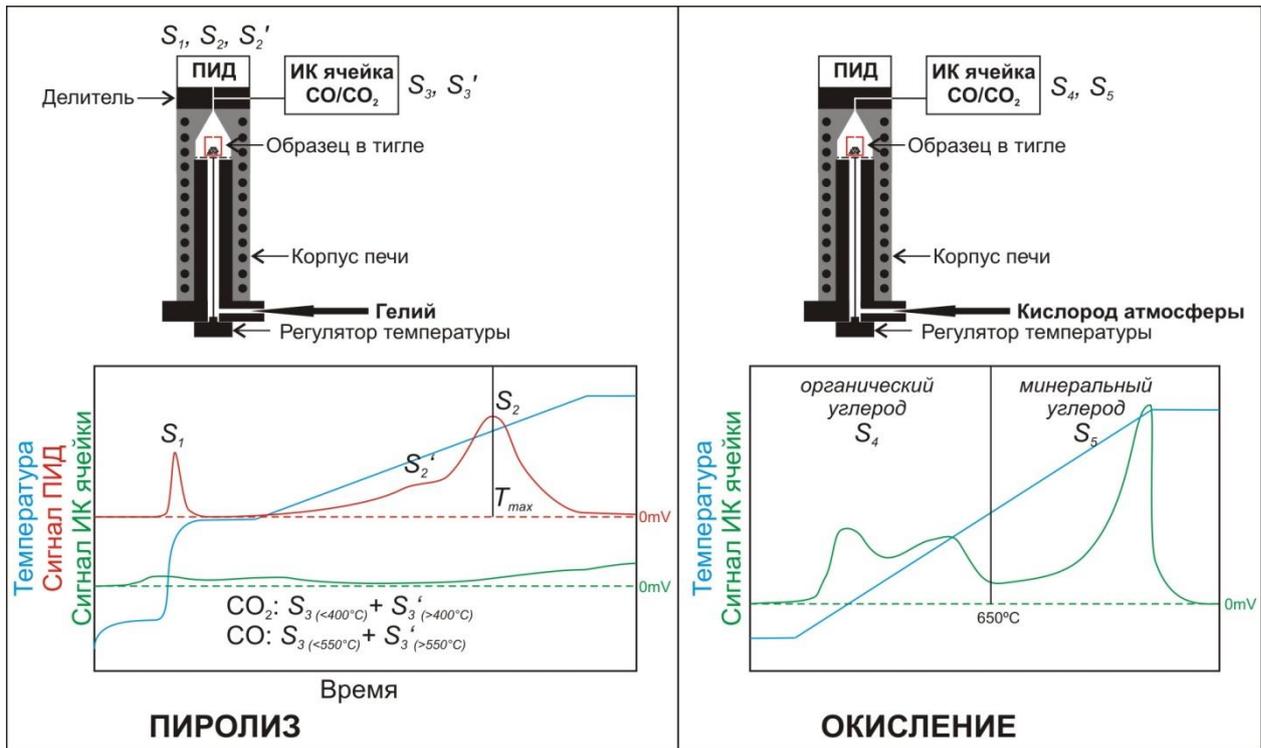


Рисунок 2.3 – Схема работы пиролизатора типа Rock-Eval и пример пирограммы (по: [Меленевский, 1991; Behar et al., 2001], с дополнениями)

В ходе пиролиза ПИД фиксирует выделение двух пиков органических соединений, поскольку ОВ в породе составлено двумя компонентами. При температурах, как правило, до 300 °С происходит десорбция свободных и сорбированных углеводородов и регистрируется «битумоидная» часть – пик S<sub>1</sub>. Сравнительно высокотемпературный этап пиролиза проходит обычно при 300–650 °С (пик S<sub>2</sub>), в результате которого кероген подвергается деструкции, десорбируются углеводороды, образовавшиеся при пиролизе смолисто-асфальтеновых компонентов битумоидов, регистрируется «керогеновая» составляющая – пик S<sub>2</sub>. Количество продуктов пиролиза, соответствующее вышеуказанным пикам, измеряют в мг УВ/г породы. Температура максимального выхода УВ в пределах пика S<sub>2</sub> обозначается как T<sub>max</sub> (°С). Пик S<sub>3</sub> регистрируется детектором теплопроводимости в ходе пиролиза. Подразумевается, что количество прошедшего через него CO<sub>2</sub> пропорционально содержанию кислорода в органическом веществе. Пик S<sub>4</sub> регистрируется при сожжении остаточного органического вещества в токе кислорода при максимальной температуре до 850 °С [Меленевский, 1991; Behar et al., 2001]. При проведении пиролиза рассчитывается

содержание общего органического углерода (TOC – total organic carbon). Общий органический углерод включает в себя пиролизуемый (PC) и остаточный органический углерод (RC).

Через сумму величин пиков  $S_1$  и  $S_2$  может быть количественно оценен генерационный потенциал материнских пород. По классификации Б. Тиссо и Д. Вельте не нефтематеринские породы с низким потенциалом характеризуются величинами  $S_1+S_2$  до 2 мг УВ/г породы, материнские породы с умеренным потенциалом – от 2 до 6 мг УВ/г породы, материнские породы с высоким потенциалом – от 6 мг УВ/г породы [Тиссо, Вельте, 1981]. Согласно К. Петерсу (1986), генерационный потенциал пород может быть бедным ( $S_1=0-0,5$ ,  $S_2=0-2,5$  мг УВ/г породы), удовлетворительным ( $S_1=0,5-1$ ,  $S_2=2,5-5$  мг УВ/г породы), хорошим ( $S_1=1-2$ ,  $S_2=5-10$  мг УВ/г породы) и очень хорошим ( $S_1 > 2$ ,  $S_2 > 10$  мг УВ/г породы).

Температура  $T_{max}$  является важным параметром для оценки степени зрелости ОБ. Согласно классификации К. Петерса, незрелому ОБ соответствуют значения  $T_{max} < 435$  °С, началу нефтяного окна – 435–445 °С, концу нефтяного окна – 470 °С [Peters, 1986]. Абсолютное значение  $T_{max}$  зависит от конструктивных особенностей установки и скорости нагрева образца, массы навески, может зависеть от литологического состава породы и ОБ. Эмпирически установлено, что температура  $T_{max}$  и отражательная способность витринита ( $R_o$ ) взаимосвязаны, их значения увеличиваются с катагенезом. Уравнение зависимости  $T_{max}$  и  $R_o$  необходимо калибровать для каждой коллекции отдельно [Peters, 1986; Меленевский, 1991]. С катагенезом ОБ растут и величины индекса продуктивности ( $PI=S_1/(S_1+S_2)$ ). Это связано с генерацией керогеном подвижных компонентов – битумоидов [Тиссо, Вельте, 1981; Peters, 1986; Меленевский, 1991].

Пиролиз позволяет оценить тип ОБ на основе водородного индекса ( $HI = S_2/C_{орг}$ , мг УВ/г  $C_{орг}$ ) – аналога отношения Н/С, и кислородного индекса ( $OI = S_3/C_{орг}$ , мг  $CO_2$ /г  $C_{орг}$ ) – аналога отношения О/С. Органическое вещество I типа (аквагенное озерное, по А.Э. Конторовичу (1977)) характеризуется высоким содержанием водорода и величинами HI, как правило, выше 600 мг УВ/г  $C_{орг}$

на начало мезокатагенеза. Для ОВ II типа (аквагенного морского) характерны значения НI в пределах около 150–600 мг УВ/г  $C_{орг}$ . Органическое вещество I и II типов склонно к генерации нефти, его источником служат в значительной мере водорослевой материал, а также микробиальные сообщества, перерабатывающие ОВ в осадке. Органическое вещество III типа (террагенный, по А.Э. Конторовичу (1977)) является наименее обогащенным водородом (НI обычно <150 мг УВ/г  $C_{орг}$ ). Его основным источником является высшая наземная растительность [Тиссо, Вельте, 1981; Меленевский, 1991; Peters et al., 2005].

Пиролиз пород и нерастворимых остатков в настоящем исследовании проводился на приборе Weatherford Laboratories Source Rock (SR) Analyzer (в режимах total petroleum hydrocarbons/total organic carbon) (аналитики – к.ф.-м.н. В.Н. Меленевский, к.г.-м.н. К.В. Долженко). Калибровка прибора производилась по стандарту IFP 160000 (Vinci Technologies), а также по внутреннему стандарту лаборатории. Выполнен пиролитический анализ 91 пробы пород и 67 проб НО (для контроля значений  $T_{max}$ ).

**Определение содержания и группового состава битумоида.** Битумоидом называют часть органического вещества, которая растворяется в органических растворителях [Вассоевич, 1967]. Изучение состава битумоида и его распределение в породах позволяет оценивать тип и катагенез ОВ, миграционную природу битумоидов [Конторович, 1976].

В настоящем исследовании битумоид извлекали из дробленных пород методом холодной экстракции безводным нелюминесцирующим хлороформом, с использованием центрифуги (1200 оборотов/минуту, 12 минут) [Винокур, Конторович, 1967]. Экстракция из одной пробы проводилась несколько раз для получения максимальных выходов битумоидов. Окончание экстракции контролировалось сравнением экстрактов с коллекцией эталонов. Чистые экстракты после отгонки растворителя освобождались от элементарной серы ртутью.

Рассчитывался битумоидный коэффициент – отношение выхода битумоида ( $b_{хл}$ ) к содержанию ОВ по формуле  $\beta = 100 \% \times b_{хл} / (1,33 \times C_{орг})$ , где 1,33 –

коэффициент, учитывающий долю водорода и гетероэлементов в органическом веществе [Конторович, 1976]. Во второй половине XX века В.А. Успенским и Н.Б. Вассовичем была установлена закономерность – при уменьшении содержания органического вещества ( $C_{орг}$ ) в породе величины битумоидного коэффициента возрастают. Отклонение от этой зависимости (повышенные значения  $\beta$ ) свидетельствует об аллохтонной природе битумоидов, т. е. они являются мигрировавшими. Пониженные значения битумоидного коэффициента могут указывать на остаточную природу битумоидов [Конторович, 1976].

Определялся групповой состав битумоидов. Для разделения мальтенов и асфальтенов пробу битумоида растворяли в 0,6 мг хлороформа, затем заливали избытком петролейного эфира. Растворы отстаивались в темном месте 24 часа, затем твердый асфальтовый осадок отделяли от мальтенов через ватный фильтр. Осадок на вате промывали горячим этиловым спиртом для разделения асфальтогеновых кислот от асфальтенов.

Деление мальтенов на фракции проводили методом хроматографии, основанном на разной адсорбционной способности компонентов битумоидов, и соответственно разной скорости прохождения этих веществ компонентов через колонку. Фракционирование проходило на хроматографической колонке длиной 40–70 см, заполненной силикагелем марки АСК с величиной зерен 0,2–0,5 мкм. Метано-нафтенновые фракции выделяли петролейным эфиром, нафтено-ароматические – смесью петролейного эфира и бензола 9:1. Бензольные и спиртобензольные смолы выделялись соответственно бензолом и смесью этилового спирта с бензолом 1:1. Каждая фракция после отгонки растворителя переводилась в стеклянные стаканчики и высушивалась до постоянного веса в сушильном шкафу при температуре 40 °С. После взвешивания каждой из фракций рассчитывался групповой состав в массовых % на битумоид.

Групповой состав битумоидов позволяет оценивать их миграционную природу. Так, для мигрировавших битумоидов характерно повышенное содержание наиболее легких компонентов – насыщенных и ароматических углеводородов, а для остаточных (тех, что остались после ухода легкой, подвижной

части битумода) – повышенное содержание асфальтовых компонент. В тоже время, групповой состав заведомо автохтонных битумоидов может выступать одним из критериев для оценки зрелости органического вещества [Конторович, 1976].

Битуминологические анализы в рамках настоящей работы проводили сотрудники лаборатории геохимии нефти и газа ИНГГ СО РАН: Н.В. Моисеева, Н.П. Шевченко, Е.Г. Гудяева, Н.П. Вертакова, А.И. Чуканова. Всего выполнено 104 определения содержания битумоида в породе и 101 определение группового состава битумоида.

***Исследование углеводородов-биомаркеров рассеянного органического вещества и нафтидов.*** Биомаркеры – молекулы, синтезированные живыми организмами, захороненные вместе с ними в осадке, претерпевшие изменения в конфигурации атомов и функциональных групп, но сохранившие свои структурные особенности в ископаемом органическом веществе. В геохимии нефти и газа результаты изучения состава биомаркеров используются при диагностике типа ОВ потенциально нефтематеринских пород, оценке условий его формирования и биологических предшественников, оценке преобразования ОВ в каатегезе и гипергенезе, корреляции нафтидов и ОВ нефтематеринских пород [Eglinton et al., 1964; Eglinton, Calvin, 1966; Тиссо, Вельте, 1981; Хант, 1982; Петров, 1984; Volkman, 1986; Peters, Moldowan, 1993; Peters et al., 2005; Баженова и др., 2000; Каширцев, 2003; Конторович, 2005; Гордадзе, 2013].

В настоящей работе составу и распределению индивидуальных углеводородов-биомаркеров битумоидов и нафтидов уделено особое внимание. Их метано-нафтенновые фракции были проанализированы методом газожидкостной хроматографии, метано-нафтенновые и нафтенно-ароматические – методом хромато-масс-спектрометрии.

***Газожидкостная хроматография*** (ГЖХ) выполняется с целью выявления и идентификации индивидуальных соединений в метано-нафтенновой и нафтенно-ароматической фракциях, определения качественного состава и содержания этих соединений. Метод основан на разной адсорбционной способности веществ.

Разделение пробы достигается за счет многократного повторения процессов распределения компонентов между подвижной и неподвижной фазами в колонке. Неподвижная фаза представлена жидкостью, нанесенной на внутреннюю поверхность колонки, подвижная – инертным газом-носителем, чаще всего гелием или азотом. При одинаковой температуре вещества с низкой растворимостью в неподвижной фазе быстрее проходят через колонку, с высокой растворимостью – медленнее [Руководство..., 1988; Шаповалова, Пирогов, 2007].

Перед анализом метано-нафтеновые фракции растворяют в пентане в виалах. В лаборатории использован подход, при котором для каждой пробы достигаются одинаковые концентрации фракции в растворителе. Виалы помещают в автосэмплер. Проба вводится через инжектор в колонку. После прохождения колонки углеводороды регистрируются пламенно-ионизационным детектором. Результат анализа представляется в виде хроматограммы, где каждому индивидуальному соединению соответствует свой сигнал (пик). В настоящем исследовании использовался газожидкостной хроматограф Agilent 7820 с кварцевой капиллярной колонкой длиной 30 м и диаметром 0,25 мм. Неподвижная фаза неполярная – 5%-дифенил, 95%-диметилполисилоксан, с толщиной нанесения 0,25 мкм. Газ-носитель – гелий, скорость потока – 1 мл/мин. Начальная температура анализа – 40 °С, конечная – 290 °С, скорость нагрева – 4 °С/мин.

Анализ ГЖХ выполнялся с целью изучения нормальных и изопреноидных алканов. Соотношения индивидуальных соединений рассчитывались на основе площадей соответствующих пиков (аналитик – Е.А. Зубова). Всего методом ГЖХ проанализировано 104 пробы метано-нафтеновых фракций.

*Хромато-масс-спектрометрия* является одним из наиболее высокоточных методов исследования углеводородов-биомаркеров. Этот метод с большим разрешением позволяет проанализировать состав и распределение индивидуальных соединений. В нефтяной геологии и геохимии нефти и газа он начал активно использоваться еще с 1970-х годов [Тиссо, Вельте, 1981; Петров, 1984; Peters, Moldowan, 1993].

Принципиальное отличие этого метода от газожидкостной хроматографии – наличие масс-спектрометра, в который поступают индивидуальные соединения после прохождения и разделения на хроматографической колонке. Молекулы попадают в ионизационную камеру масс-спектрометра, где бомбардируются высокоэнергичным пучком электронов. В результате утраты одного электрона, молекулы ионизируются, часть из них раскалывается на фрагменты определенным образом – рвутся самые слабые связи. Большая их часть имеет заряд «+1». Различие в соотношении массы к заряду ( $m/z$ ) позволяет разделить общий поток осколков в магнитном поле. Регистрация проходит на детекторе ионного захвата, где записывается относительное количество массы каждого иона. Запись интенсивности выхода масс всех ионов в определенный момент времени называется масс-спектром [Хмельницкий, Бродский, 1984].

В данной работе метано-нафтенновые и нафтенно-ароматические фракции битумоидов были проанализированы на установке, состоящей из газового хроматографа Agilent 6890 с кварцевой капиллярной колонкой HP-5ms длиной 30 м и внутренним диаметром 0,25 мм (неполярная фаза – 5%-фенил, 95%-метилполисилоксан, толщина нанесения – 0,25 мкм) и масс-спектрометра с масс-селективным детектором Agilent 5973N. Температурный режим – 100–320 °С, нагрев со скоростью 4 °С/мин, газ-носитель – гелий, энергия ионизации – 70 eV. Диапазон регистрируемых масс –  $m/z$  50–550, временной шаг сканирования – 0,36 с. Для каждой пробы запись проходила в режимах регистрации общего ионного тока (TIC – total ion current), а также по заданным ионам (режим SIM – selected ion monitoring) (аналитик – Е.Н. Иванова).

Анализ ХМС метано-нафтенновых фракций (104 пробы) проводился с целью изучения насыщенных полициклических УВ – стеранов, терпанов, непредельных УВ с двойными связями. Идентификация индивидуальных соединений осуществлялась путем сравнения масс-спектров с опубликованными материалами и данными из библиотеки NIST04. Относительные содержания индивидуальных соединений и их соотношения были рассчитаны с использованием площадей пиков на типовых масс-хроматограммах. В нафтенно-ароматических фракциях

(изучено 100 проб) были исследованы фенантрен и метилфенантрены (Ф) (на масс-хроматограммах по заданным  $m/z$  178 и 192), дибензотиофен и метилдибензотиофены (ДБТ) ( $m/z$  184 и 198) моноароматические (МАС) и триароматические стероиды (ТАС) ( $m/z$  253 и 231 соответственно). Количественная оценка относительных концентраций ароматических соединений проведена по площадям пиков, за 100% была принята сумма всех идентифицированных соединений [Конторович и др., 2004].

**Рентгенофлуоресцентный анализ.** Для определения состава породообразующих оксидов для пород хатыспытской свиты впервые был выполнен рентгенофлуоресцентный силикатный анализ (РФА). Определялось содержание основных породообразующих оксидов –  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , а также содержание  $\text{BaO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ .

Анализ проводился в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (аналитик – Н.Г. Карманова). Пробы (порошки пород) сушились при 105 °С в течение 1 часа, прокаливались при 960 °С в течение 2,5 часов. Далее пробы смешивались с флюсом (66,67% тетрабората лития; 32,83% метабората лития и 0,5% лития бромистого) в соотношении 1:9 (общий вес смеси составлял 6 г), полученные смеси плавилась в платиновых тиглях в индукционной печи Katanax. Полученные таким образом стекла анализировались на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation). Для построения градуировочных графиков использовались стандартные образцы состава горных пород.

Анализ РФА проводился для 20 образцов хатыспытской свиты.

**Определение форм серы и железа.** Химическими методами (методом «мокрой химии») определялось содержание в породах серы сульфатной, сульфидной, железа общего и «растворимого». Анализы проводились в лаборатории изотопно-аналитической геохимии ИГМ СО РАН (аналитик – Л.А. Горчукова).

Для определения общего содержания серы методом Эшка навеска дробленной породы (500 мг) спекалась в муфельной печи со смесью Эшка

(оксид магния и безводный карбонат натрия в соотношении масс 2:1) при температуре 800 °С в течение двух часов. Спекшаяся смесь переносилась в коническую колбу и кипятилась 5 минут в 150 г воды, затем фильтровалась в стакан. К содержимому фильтрата добавляли  $\text{BaCl}_2$  для осаждения сульфата бария  $\text{BaSO}_4$ . Раствор со взвесью после кипячения фильтровали, на фильтре оставался осадок, который прокаливали в муфельной печи при температуре 800 °С в течение 20 минут. Количество общей серы рассчитывалось из массы сульфата бария с учетом его молекулярной массы.

Для определения сульфатной серы бралась еще одна навеска дробленой породы (500 мг), которая кипятилась в 10%-й  $\text{HCl}$  и затем фильтровалась. При добавлении в раствор хлорида бария, сульфатная сера осаждалась в виде сульфата бария. Осадок отфильтровывался, высушивался и взвешивался. Содержание сульфидной серы определялось как разница между содержанием общей серы и сульфатной серы. Определялась карбонатность пород.

Формы железа и серы определены для 43 образцов хатыспытской свиты.

### Глава 3. ЛИТОЛОГО-СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД ВЕНДА СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО МАТЕРИАЛАМ ИЗ ОБНАЖЕНИЙ БАССЕЙНА р. ХОРБУСУОНКА И НИЗОВЬЕВ р. ЛЕНА

*Хатыспытская свита* мозаично обнажается в разрезах на Оленекском поднятии. Были выполнены полевые наблюдения разрезов хатыспытской свиты в обнажениях 1811, 0601, 0602, 0603, 0607, 0701. Макроскопическое описание пород проводилось в полевых и лабораторных условиях. Корреляция разрезов выполнялась сотрудниками лаборатории палеонтологии и стратиграфии докембрия ИНГГ СО РАН – Д.В. Гражданкиным, В.И. Роговым, К.Е. Наговициным, Б.Б. Кочневым, Н.В. Быковой (Рисунок 3.1) [Nagovitsin et al., 2015; Рогов, 2018, 2022; Гражданкин, Рогов, 2020]. При участии автора составлен сводный разрез хатыспытской свиты (Рисунок 3.2). Хатыспытской свита залегает на светло-кремовых доломитах маастахской свиты нижнего венда (Рисунок 3.3, А). В хатыспытской свите выделяют четыре подсвиты (см. рисунок 3.1).

**Первая подсвита.** В основании свиты залегает пачка аргиллитов и переслаивающихся известняков и аргиллитов. Породы представлены известняками серыми, темно-серыми, зеленовато-серыми преимущественно массивными, интракластовыми. Интракласты представлены, как правило, слабо окатанными вытянутыми зернами темно-серых и серых известняков до 2–3 мм. Часто отмечаются разно ориентированные трещины толщиной от 0,1 до 1,5–2,0 мм, заполненные кальцитом. Отмечаются прослои тонкоплитчатых сланцеватых известняков темно-серых, серых. Концентрации нерастворимого остатка обычно не превышают 15%, в среднем составляя 7%. В этой части разреза распространены низкоуглеродистые породы, как правило, обедненные ОВ. Содержание  $C_{орг}$  в них обычно на уровне кларковых значений (0,2% для карбонатных пород [Вассоевич, 1967]). Встречен один образец известковой породы (К601В-5.0) с повышенным значением  $C_{орг} = 0,6\%$  (см. рисунок 3.3). Мощность подсвиты 25 м [Nagovitsin et al., 2015].

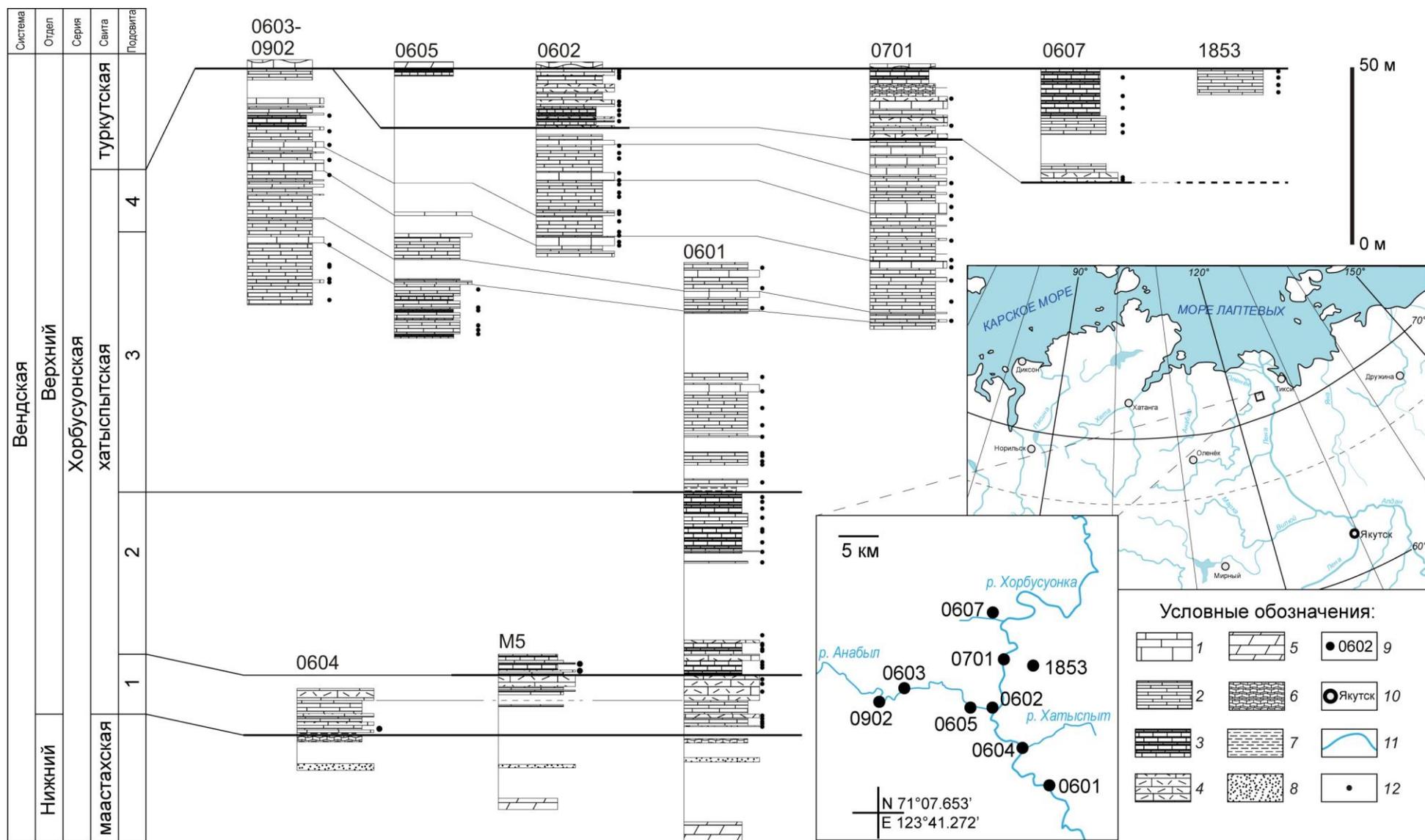


Рисунок 3.1 – Корреляционная схема разрезов хатыспытской свиты на Оленекском поднятии (бассейн р. Хорбусуонка) (по: [Nagovitsin et al., 2015; Рогов, 2022], с дополнениями автора).

Условные обозначения: 1 – известняки грубослоистые; 2 – известняки тонкослоистые; 3 – чередование известняков и аргиллитов; 4 – известняки интракластовые; 5 – доломиты; 6 – известняки строматолитовые; 7 – аргиллиты; 8 – песчаники; 9 – обнажение и номер; 10 – населенный пункт; 11 – гидрография; 12 – уровень отбора образцов для исследования органической геохимии.

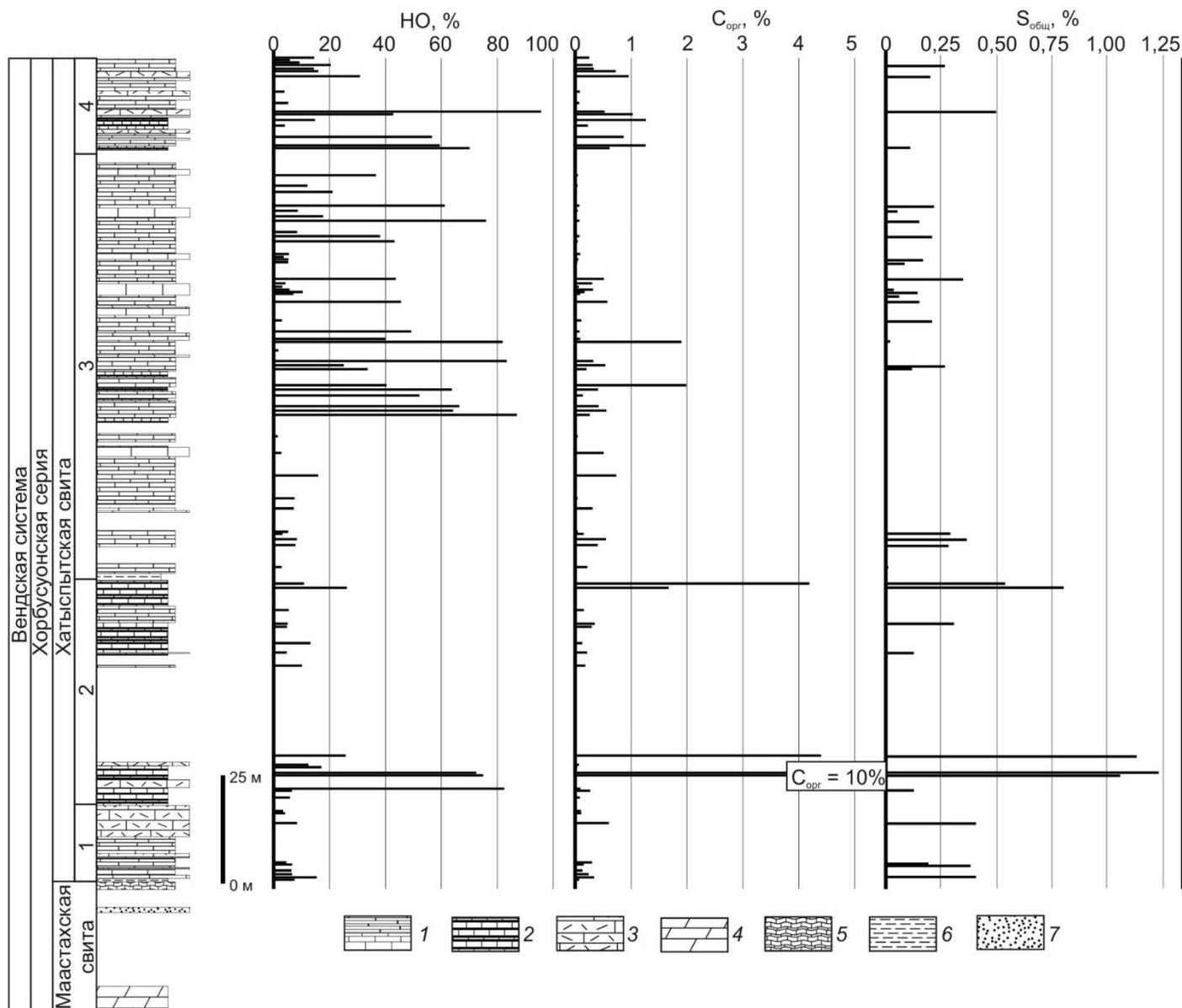


Рисунок 3.2 – Литолого-геохимическая характеристика сводного разреза хатыспытской свиты на Оленекском поднятии.  
 Условные обозначения: 1 – известняки; 2 – чередование известняков и аргиллитов; 3 – известняки интракластовые; 4 – доломиты;  
 5 – доломиты микробиалитовые; 6 – аргиллиты; 7 – песчаники



Рисунок 3.3 – Фото спилов образцов пород маастахской (А) и хатыспытской свит (Б-Ж) венда из изученных разрезов среднего течения р. Хорбусуонка

**Вторая подсвита** представлена чередованием пачек тонкоплитчатых и рассланцованных известняков, глинистых известняков темного-серого и черного цвета, обогащенных ОВ ( $C_{орг}$  на уровне 0,2–0,3%), и прослоев массивных обедненных ОВ известняков зеленовато-серых грубослоистых трещиноватых, концентрация  $C_{орг}$  в которых не превышает 0,05%. В нижней части подсвиты отмечаются маломощные прослой интракластовых известняков (см. рисунок 3.2, Б). Между ними залегают тонкоплитчатые и сланцеватые черные известняки, высоко обогащенные ОВ ( $C_{орг} = 4,4\%$ ), а также маломощный слой (до 10 см) известково-кремнистых аргиллитов, аномально обогащенных ОВ ( $C_{орг}$  до 10%). В верхней части второй подсвиты залегают глинисто-кремнистые известняки с высоким содержанием  $C_{орг}$  – 1,6–4,2% (см. рисунок 3.3). Концентрации нерастворимого остатка в породах второй подсвиты, как правило, составляют от 3–5% до 10–13%, редко – 72–82%. Вверх по разрезу первой и второй

подсвит увеличивается мощность и количество пачек переслаивающихся известняков и аргиллитов. Порядка 20 м разреза второй подсвиты перекрыты осыпью и не изучены (см. рисунок 3.2). Мощность подсвиты 50 м [Nagovitsin et al., 2015].

**Третья подсвита** сложена чередующимися пачками известняков серых, темно-серых тонкоплитчатых и сланцеватых, с маломощными прослоями аргиллитов, редко алевролитов, известняков бежево-серых, серых грубо слоистых и массивных, а также бежевых карбонатно-кремнистых пород, обычно обедненных ОВ (см. рисунок 3.3, В). В разрезе третьей подсвиты резко выделяется интервал бежево-серых, темно-серых и черных глинисто-кремнистых известняков и известковых силицитов (нижняя часть разреза 0605), для которых характерно высокое содержание НО (40–87%) и повышенное –  $C_{\text{орг}}$  (0,26–1,99%) (см. рисунки 3.2, 3.3, Г, Д). На поверхностях напластования часто отмечаются макроводоросли, а также макробиота миаохенского типа [Cui et al., 2016; Vyukova et al., 2017]. В одном образце кремнисто-карбонатной породы (обр. К605-12.0) значение  $C_{\text{орг}}$  достигает 1,99% и является максимальным в третьей подсвите. В нижней и верхней части подсвиты отмечается чередование обедненных и слабо обогащенных органическим веществом карбонатных и карбонатно-кремнистых пород. Для первых значения  $C_{\text{орг}}$  не превышают 0,05%, для вторых – варьируют от 0,2 до 0,7%. Величины НО изменяются в широких пределах от 2 до 50%, в среднем составляя 15%. Верхняя часть третьей подсвиты сложена мощной толщей (около 20 м), представленной бежевыми и серыми известняками и кремнисто-карбонатными породами, обедненными ОВ ( $C_{\text{орг}} < 0,05\%$ ) (см. рисунок 3.2). Мощность подсвиты 100 м [Nagovitsin et al., 2015].

**Четвертая подсвита.** В ее разрезе распространены интракластовые известняки темно-серые, серые, а также тонко волнистослоистые известняки с чередованием слоев черного и темно-коричневато-серого цвета (см. рисунок 3.3, Е, Ж). Содержание НО, как правило, изменяется от 4 до 15%, однако в образце К602-38.20 достигает 57%. Породы в разной степени обогащены органическим веществом,  $C_{\text{орг}}$  варьирует в широких пределах от 0,02 до 1,3%,

в среднем составляя 0,5%. В некоторых породах, по тонким трещинам и стиллолитовым швам, наблюдается, по-видимому, перераспределенное органическое вещество черного цвета (см. рисунок, 3.2 Ж). Мощность подсветы до 17 м [Nagovitsin et al., 2015].

Мощность сводного разреза хатыспытской свиты составляет около 190 м (см. рисунок 3.2).

Определение форм серы и железа в породах показало, что содержание общей серы изменяется от 0,01 до 1,2%, в среднем составляя 0,3%. Оно прямо пропорционально содержанию  $C_{\text{орг}}$  в породах ( $R = +0,82$ ) (Рисунок 3.4). Высокие содержания серы ( $>0,5\%$ ) характерны для нижней части разреза хатыспытской свиты; максимальные (1,0–1,2%) – наблюдаются в двух образцах известково-кремнистых аргиллитов (черных сланцев) (см. рисунок 3.3). В части образцов определено содержание сульфатной и сульфидной серы. В черных сланцах и глинистых известняках, высоко обогащенных ОВ ( $C_{\text{орг}} = 4,4\text{--}10,2\%$ ), силицитах и кремнистых известняках ( $C_{\text{орг}} = 0,5\%$ ) преобладает сульфидная сера (0,4–1,1%), содержание сульфатной серы  $\leq 0,1\%$ . В нескольких образцах известняков ( $\text{НО} < 10\%$ ) и глинисто-кремнистых известняков содержание сульфатной серы на уровне или выше содержания сульфидной серы.

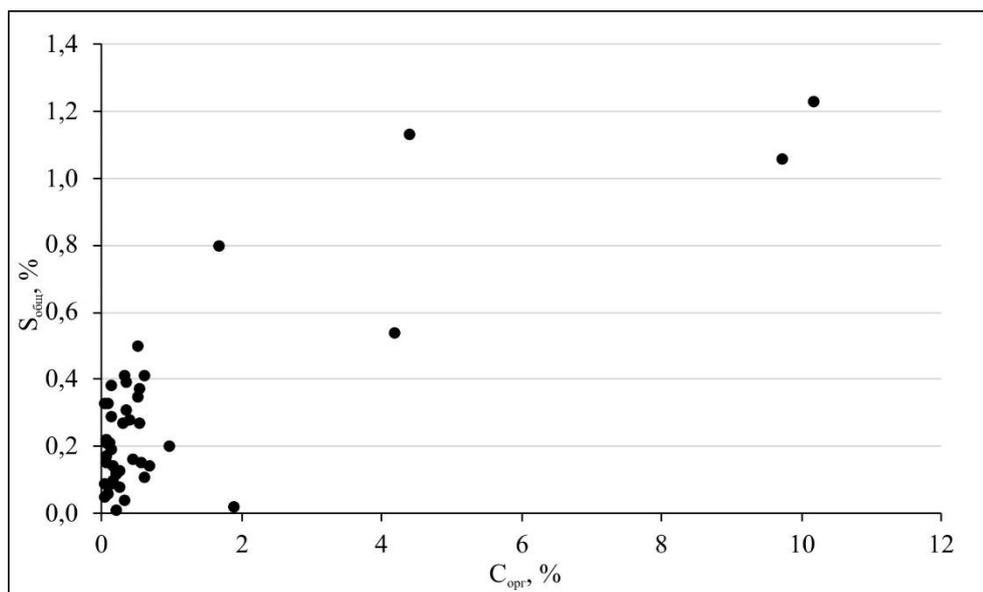


Рисунок 3.4 – Диаграмма содержаний органического углерода и серы общей в породах хатыспытской свиты

Содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  общего составляет 0,06–2,62%. Его распределение по разрезу, в целом, равномерное. Максимальные концентрации железа фиксируются в двух образцах известково-кремнистых аргиллитов (черных сланцев), и одном образце глинистого доломита в нижней части хатыспытской свиты. Концентрации  $\text{FeO}$  не зависят от величин  $\text{НО}$  и  $C_{\text{орг}}$ . Как правило, железо присутствует в восстановленной форме  $\text{FeO}$ . В черных сланцах ( $C_{\text{орг}} = 9,7\text{--}10,2\%$ ) и глинистых известняках ( $C_{\text{орг}} = 1,7\%$ ) содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  окисленного на уровне или выше, чем содержание  $\text{FeO}$ . Количество  $\text{CO}_2$ , определенное химическими методами, обратно пропорционально концентрации  $\text{НО}$  в породах. Высокий коэффициент корреляции для этой зависимости ( $R = -0,99$ ) подтверждает достоверность результатов, полученных разными методами.

По результатам РФА были получены сведения по содержанию основных породообразующих оксидов в хатыспытской свите. Содержание  $\text{SiO}_2$  изменяется в интервале 4–68%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 1–15%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,4–4%,  $\text{CaO}$  – 0,6–49%,  $\text{MgO}$  – 0,3–16%,  $\text{K}_2\text{O}$  – 0,1–5%,  $\text{SO}_3$  – 0,1–3%,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,1–1,4%,  $\text{TiO}_2$  – 0,02–0,8%. Концентрации таких оксидов, как  $\text{BaO}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{MnO}$ , обычно  $\leq 0,01\%$ . Содержание серы, определенное методом РФА (в виде  $\text{SO}_3$ ), и  $S_{\text{общ}}$  – методами аналитической химии, взаимосвязаны ( $R = +0,97$ ) (Рисунок 3.5).

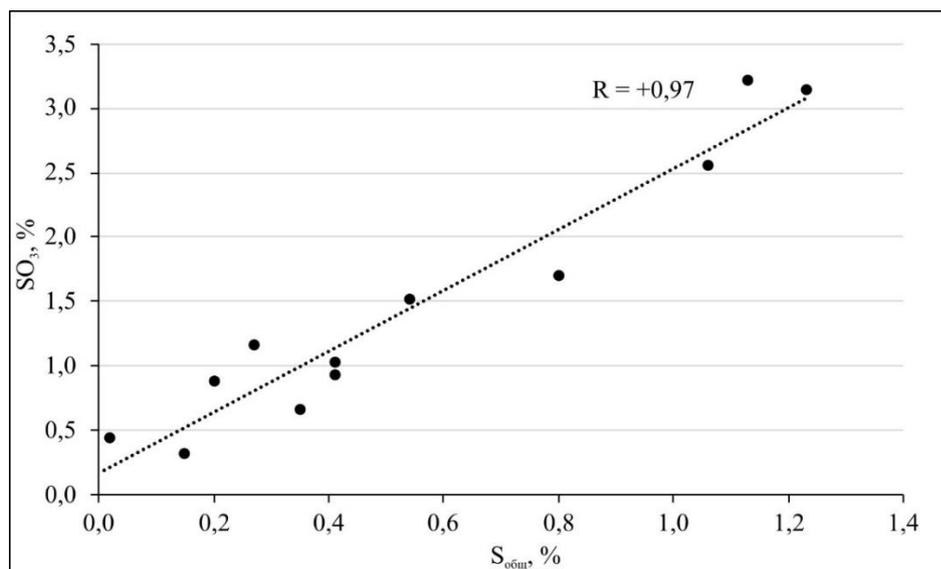


Рисунок 3.5 – Диаграмма содержаний  $S_{\text{общ}}$  по результатам аналитического определения химическими методами и оксида серы (VI) по результатам рентгено-флюоресцентного анализа

Установлено, что значения  $C_{\text{орг}}$  не коррелируют с содержанием основных породообразующих оксидов. Однако следует отметить, что в черных сланцах, аномально обогащенных ОВ, фиксируются повышенные концентрации ВаО (0,08–0,15%),  $K_2O$  (5%),  $MnO$  (0,02%),  $TiO_2$  (0,5%).

Анализ материалов впервые позволил рассмотреть изменение содержаний породообразующих оксидов в разрезе венда бассейна р. Хорбусуонка (Рисунок 3.6). Кремнеземом в основном обогащены (>20%) породы верхней части разреза (средняя часть третьей подсвиты, четвертая подсвита). В средней части третьей подсвиты повышено содержание оксидов алюминия (III), железа (III) и фосфора (V). В нижней части свиты высокие концентрации  $SiO_2$  (>40%),  $Al_2O_3$  (10%),  $Fe_2O_3$  (>2%) зафиксированы в черных сланцах (см. рисунок 3.6).

Для 12 образцов хатыспытской свиты химический состав пород был пересчитан на минеральный. Использовалась программа MINLITH, разработанная О.М. Розеном с соавторами и построенная на последовательном запуске макросов в системе Excel Microsoft Office [Розен, Нистратов, 1984; Розен и др., 2000]. Полученные данные для одного образца были отбракованы из-за отрицательных значений содержания глинистых минералов. Построена диаграмма значений содержаний НО, полученных растворением проб пород в соляной кислоте, и суммы некарбонатных минералов и ОВ по данным расчета минералогического состава. Получен высокий коэффициент корреляции ( $R = +0,99$ ), что указывает на правильность выполненных расчетов.

Содержание кремнистого материала изменяется в интервале 4–60%, глинистого – 2–27%, карбонатного – 11–90%. Установлено, что концентрации  $C_{\text{орг}}$  возрастают с содержанием глинистых минералов в породах ( $R = +0,82$ ). Среди карбонатных минералов рассчитывались концентрации кальцита и доломита. Как правило, преобладает кальцит, в нескольких образцах (в том числе в черных сланцах) – доломит. Доля полевого шпата изменяется от 0,5 до 6,0%, апатита – от 0,1 до 2,9%, пирита – от 0,04 до 3,1% (>1,5% для обогащенных ОВ пород ( $C_{\text{орг}} \geq 2\%$ )).

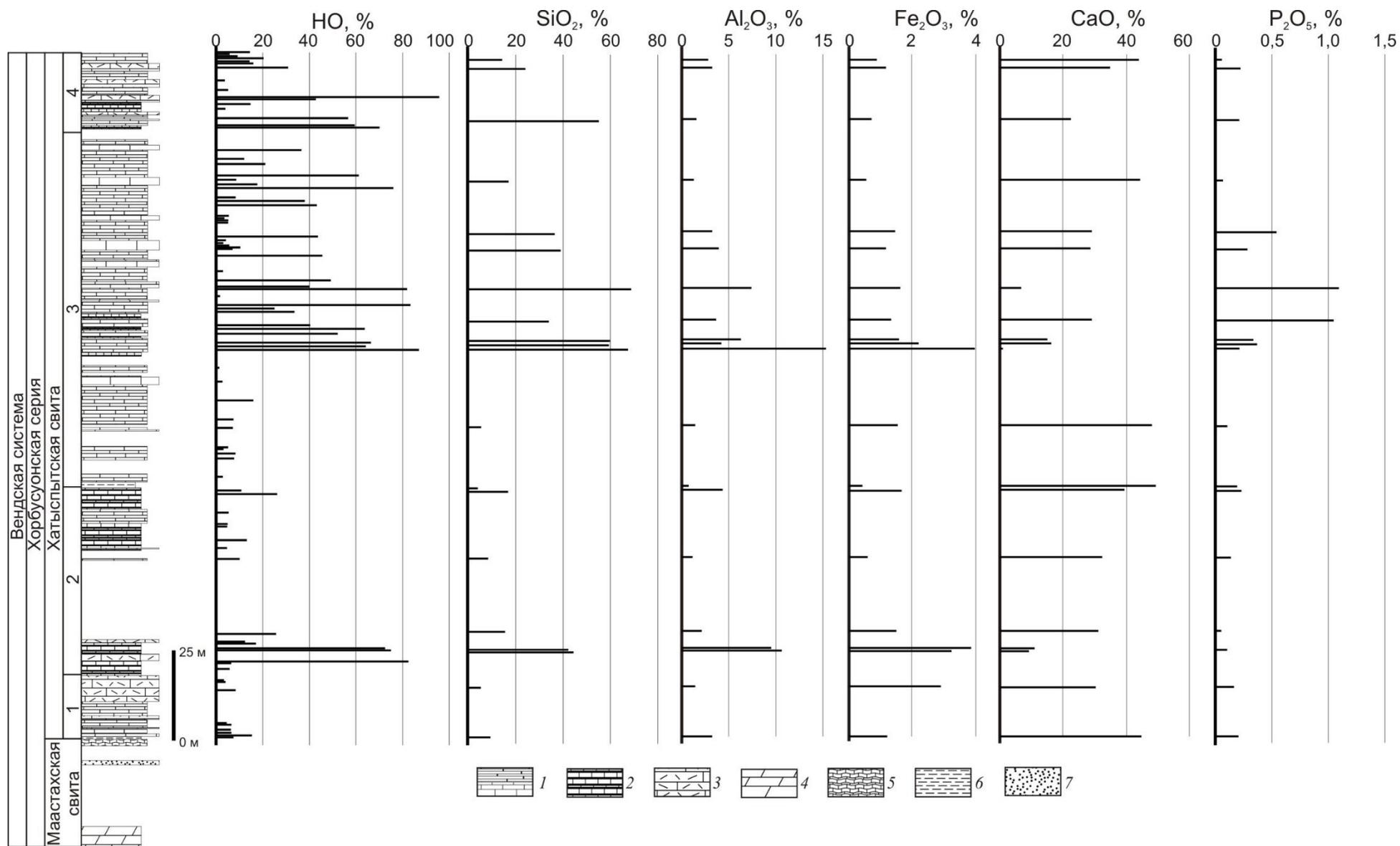


Рисунок 3.6 – Распределение  $\text{H}_2\text{O}$  и оксидов кремния, алюминия, железа (III), кальция, фосфора (V) в разрезе хатыспытской свиты. Условные обозначения: 1 – известняки; 2 – чередование известняков и аргиллитов; 3 – известняки интракластовые; 4 – доломиты; 5 – доломиты микробиалитовые; 6 – аргиллиты; 7 – песчаники

**Хараютэхская свита.** По материалам Т.М. Парфеновой автором составлен разрез средней и верхней подсвит хараютэхской свиты и нижней части тюсерской свиты (Рисунок 3.7).

**Средняя подсвита.** В разрезе средней подсвиты хараютэхской свиты на кварцевых песчаниках залегают тонкоплитчатые темно-серые и черные известняки и известково-кремнистые породы, обогащенные ОВ. В виде прослоев встречаются тонкоплитчатые и сланцеватые черные карбонатно-кремнистые породы, высоко обогащенные ОВ (Рисунок 3.8, Рисунок 3.9).

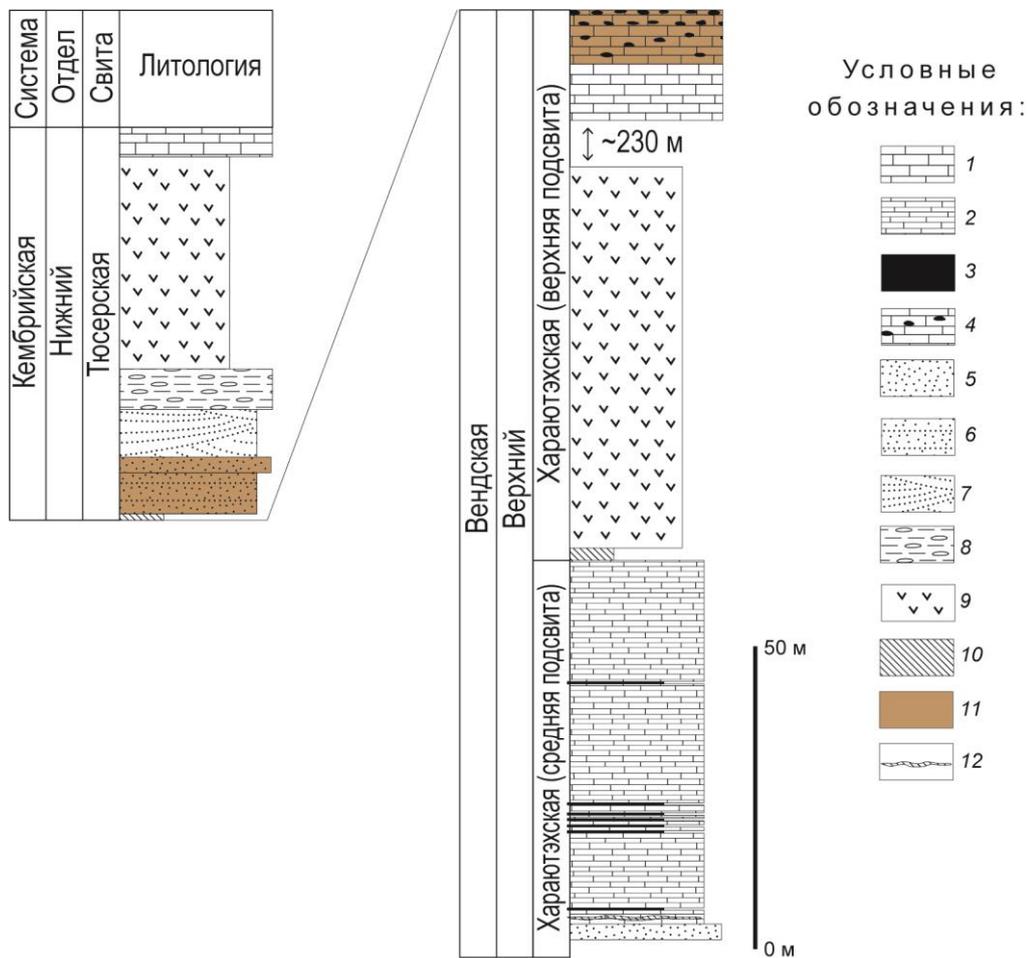


Рисунок 3.7 – Сводный разрез хараютэхской свиты и низов тюсерской свиты в обнажении в устье ручья Бискеебит (по материалам Т.М. Парфеновой).

Условные обозначения: 1 – известняки массивные, грубоплитчатые; 2 – известняки тонкоплитчатые, сланцеватые; 3 – тонкослоистые, сланцеватые черные карбонатно-кремнистые породы; 4 – известняки кавернозные, оолитовые, заполненные антракосолитом; 5 – песчаники без видимой слоистости; 6 – песчаники ровнослоистые; 7 – песчаники косослоистые; 8 – конгломераты с галькой кварцевых порфиров; 9 – долериты; 10 – осыпь; 11 – участки интенсивного битумонасыщения; 12 – кальцитовая жила, заполненная битумом

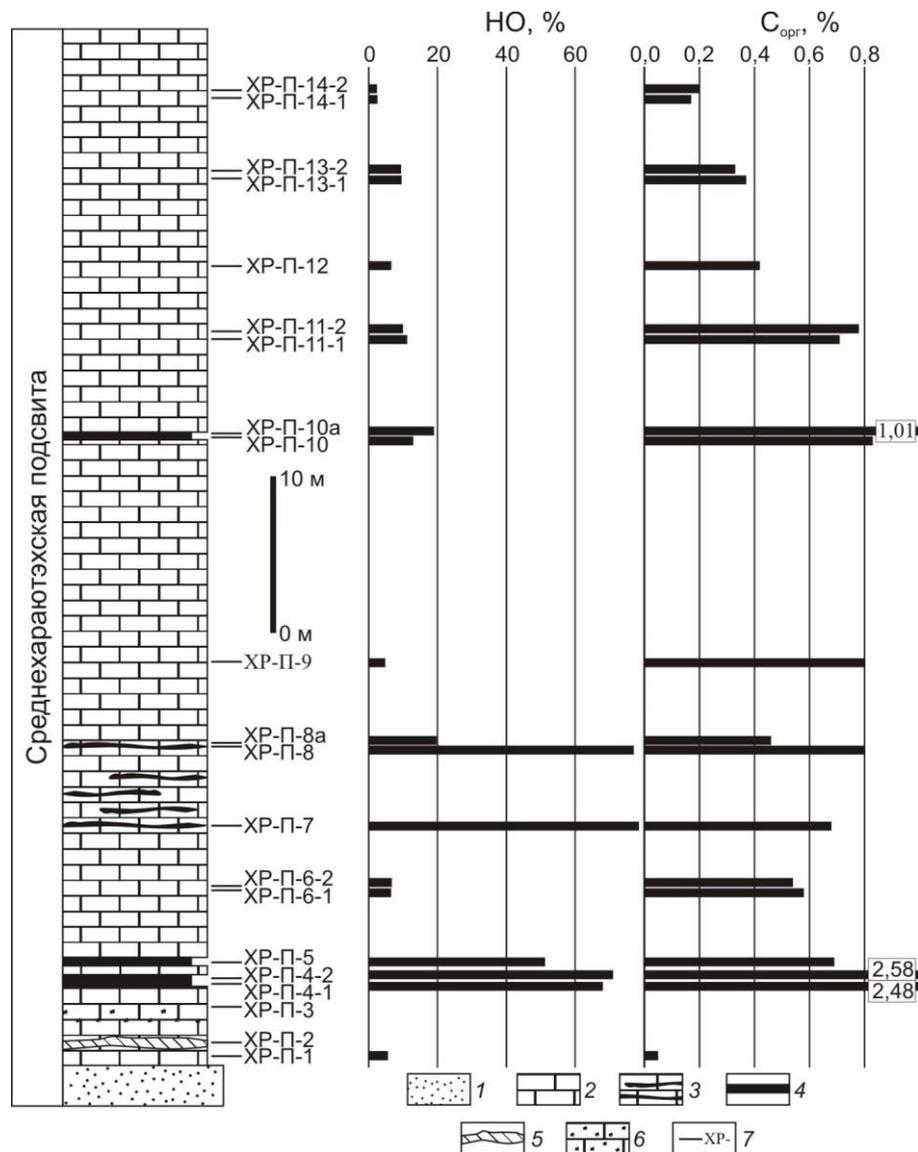


Рисунок 3.8 – Литолого-геохимическая характеристика изученного разреза средней подсвиты хараютэхской свиты в устье ручья Бискеебит.

Условные обозначения: 1 – песчаники; 2 – известняки; 3 – карбонатные породы с тончайшими прослоями черных кремнистых пород; 4 – черные тонкоплитчатые карбонатно-кремнистые породы; 5 – окремненная кальцитовая жила с битумом; 6 – известняки с включениями графитоподобного битума; 7 – уровень отбора образца и его номер

В основании разреза подсвиты залегает пласт серых плотных доломитов, обедненных ОВ. Содержания НО и С<sub>орг</sub> в образце доломита ХР-П-1 составляют 6% и 0,05% соответственно. В светлых карбонатных породах присутствует окремненная кальцитовая жила, заполненная битумом (обр. ХР-П-2). Выше, в кавернозных светлых карбонатных породах встречается черный графитоподобный битум (обр. ХР-П-3) (см. рисунок 3.8). В целом, в нижней части средней подсвиты содержание НО в породах составляет от 5–7% в кремнистых

известняках до 20–79% в кремнистых известняках и известковых силицитов. Содержание  $C_{\text{орг}}$  обычно на уровне 0,5–0,8%, в двух образцах повышено до 2,5–2,6% (см. рисунок 3.8).

Верхняя часть средней подсвиты сложена породами преимущественно карбонатного состава с содержанием НО <20%. Значения  $C_{\text{орг}}$  уменьшается вверх по разрезу от 1,0 до 0,2% (см. рисунок 3.8).



Рисунок 3.9 – Прослой черных сланцеватых карбонатно-кремнистых пород, высоко обогащенных ОВ, среди темно-серых плитчатых карбонатных пород средней подсвиты хараютэхской свиты (фото Т.М. Парфеновой)

Выше известняков средней подсвиты хараютэхской свиты залегает мощный силл диабазов (~60 м), который разделяет среднюю и верхнюю подсвиты хараютэхской свиты. Описание разреза продолжается с верхней части верхней подсвиты (см. рисунок 3.7).

**Верхняя подсвита.** Здесь залегают светлые массивные известняки, выше – оолитовые известняки, от светло-серых до белых. В трех образцах содержание НО составляет 1–4%, в одном образце карбонатно-кремнистой породы – 77%. В породах наблюдаются поры и каверны, заполненные черным графитоподобным битумом (Рисунок 3.10, А, Б, В). Значения  $C_{\text{орг}}$  изменяются от 0,3 до 1,6%.

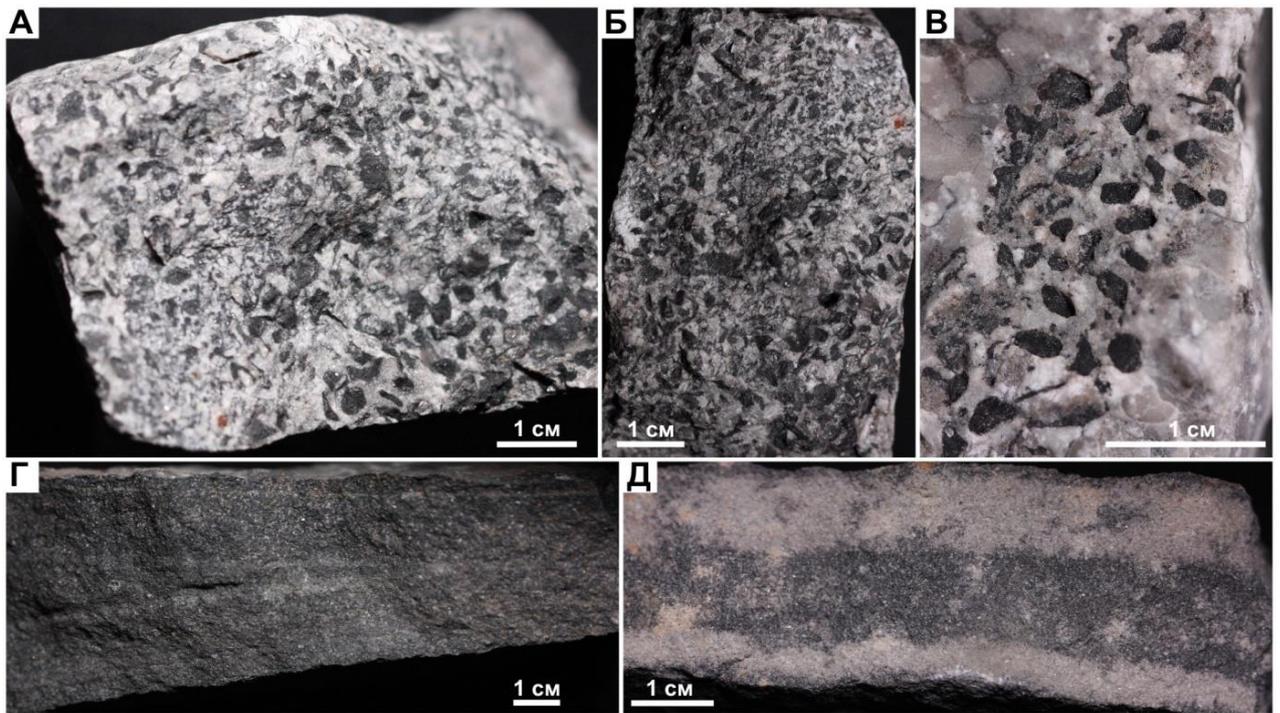


Рисунок 3.10 – Кавернозные карбонатные породы с битумами верхней подсвиты хараютэхской свиты венда (А, Б, В) и песчаники тюсерской свиты кембрия (Г, Д) Хараулахского выступа

**Тюсерская свита.** Карбонатные породы хараютэхской свиты перекрываются песчаниками и гравелитами тюсерской свиты нижнего кембрия (см. рисунок 3.8). Песчаники содержат битум (см. рисунок 3.10, Г, Д).

## Глава 4. ГЕОХИМИЯ ПОРОД И ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ВЕНДСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

### 4.1 Распределение органического углерода в породах и его изотопный состав

*Хатыспытская свита.* Содержание нерастворимого остатка в породах изменяется от 1,3 до 95,6%. Породы неравномерно обогащены рассеянным ОВ. Анализ показал, что концентрации  $C_{\text{орг}}$  в породах варьируют от 0,02 до 10,2% и в среднем составляют 0,2–0,3%. Примерно в половине образцов значения  $C_{\text{орг}}$  в породе превышают кларковые значения – 0,2% для карбонатных пород [Вассоевич, 1967], а в 70% от всех образцов –  $C_{\text{орг}} > 0,1\%$  (Рисунок 4.1.1). Содержание  $C_{\text{орг}}$  не зависит от концентрации НО (Рисунок 4.1.2). В разрезе чередуются интервалы преимущественно карбонатных пород, обедненных ( $C_{\text{орг}} < 0,1\%$ ) и слабо обогащенных ОВ ( $C_{\text{орг}}$  до 0,4%), и интервалы глинисто-карбонатных, глинисто-кремнисто-карбонатных, карбонатно-кремнистых пород и силицитов, обогащенных ОВ ( $C_{\text{орг}}$  до 1–4%) (Таблица 4.1.1). Наиболее обогащенные ОВ породы ( $C_{\text{орг}}$  до 10%) распространены в разрезе второй подсвиты хатыспытской свиты, реже – в третьей и четвертой подсвитях (Рисунок 4.1.3) [Мельник и др., 2023].

Породы хатыспытской свиты, аномально обогащенные ОВ ( $C_{\text{орг}}$  до 10–17%), прежде описывались в литературе [Натапов, 1962; Баженова и др., 1981, 2019; Конторович и др., 1981]. Однако неясным остается их распространение в разрезе и частота встречаемости. Новые полевые наблюдения выявили маломощный интервал черных сланцев (до 10 см) в обнажении 0601 в нижней части второй подсвиты (см. рисунок 4.1.3). Содержание НО в черных сланцах составляет 73–75% (породы представлены известковыми аргиллитами), а концентрации  $C_{\text{орг}}$  достигают 9,7–10,2% (см. таблицу 4.1.1) [Парфенова и др., 2020; Parfenova et al., 2021; Мельник и др., 2023].

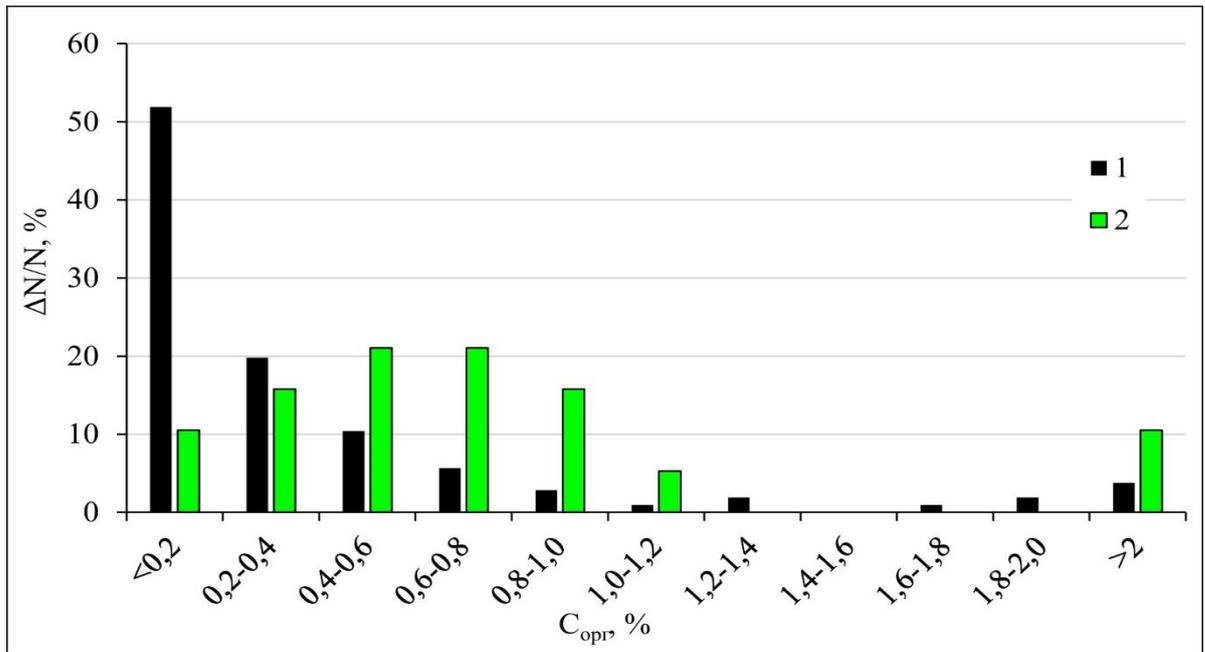


Рисунок 4.1.1 – Гистограмма содержания органического углерода в породах хатыспытской свиты (1) и средней подсвиты хараютэжской свиты (2)

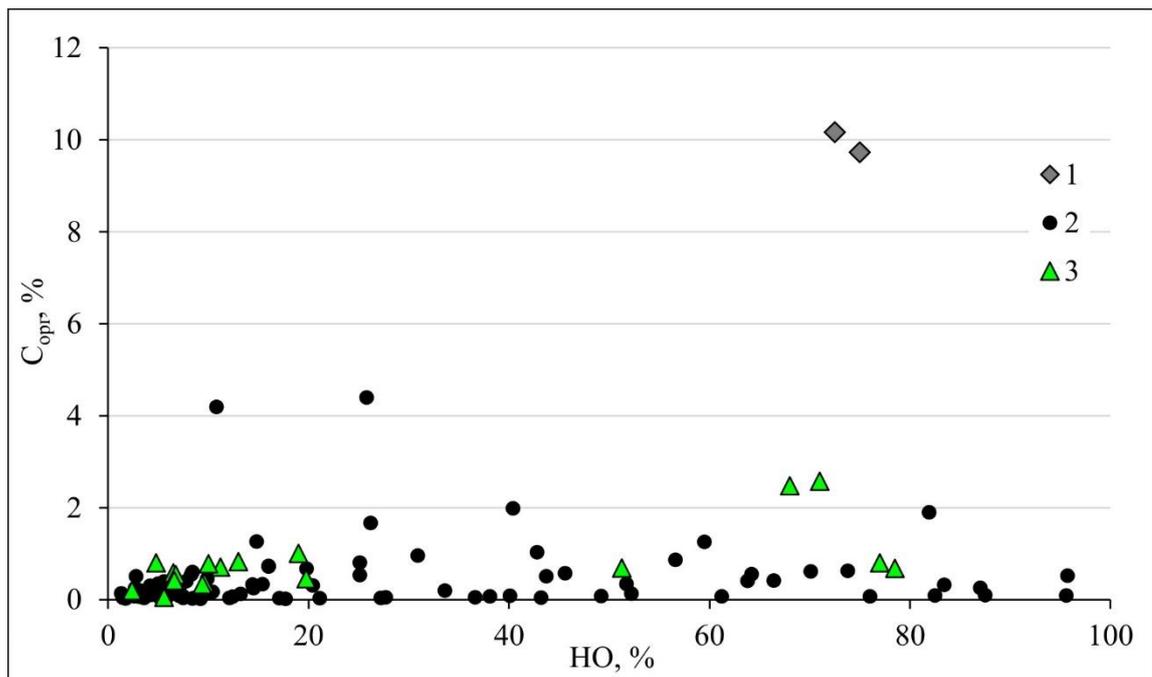


Рисунок 4.1.2 – Диаграмма содержаний органического углерода и нерастворимого остатка в черных сланцах (1) и карбонатных, глинисто-кремнисто-карбонатных и карбонатно-кремнистых породах (2) хатыспытской свиты и в породах средней подсвиты хараютэжской свиты (3)

Таблица 4.1.1 – Геохимическая и пиролитическая характеристика пород вендских отложений северо-востока Сибирской платформы

Свита	Хатыспытская		Хараютэхская (средняя подсвита)	Хараютэхская (верхняя подсвита)	
Литология	Известковые аргиллиты (черные сланцы)	Карбонатные и глинисто-карбонатно- кремнистые породы		Карбонатные и карбонатно- кремнистые породы	Кавернозные карбонатные породы с битумами
Битумоиды	Автохтонные	Преимущественно автохтонные	Параавтохтонные биодеградируемые	Остаточные	Аллохтонные <sup>1</sup>
Количество образцов, шт.	2	92(38) <sup>2</sup>	12(9) <sup>2</sup>	19(8) <sup>2</sup>	4
НО, %	$\frac{73-75}{74}$	$\frac{1-96}{23}$	$\frac{4-74}{27}$	$\frac{2-79}{25}$	$\frac{1-4 (77)^3}{2}$
C <sub>орг</sub> , %	$\frac{9,73-10,17}{9,95}$	$\frac{0,02-4,40}{0,37}$	$\frac{0,07-1,26}{0,51}$	$\frac{0,05-2,58}{0,76}$	$\frac{0,34-1,64}{0,82}$
$\delta^{13}C_{орг}$ , ‰	-35	$\frac{-38...-29 (-27...-23)^3}{-32}$	$\frac{-33...-30}{-31}$	$\frac{-35...-29}{-31}$	$\frac{-32...-30}{-30}$
S <sub>1</sub> , мг УВ/ г породы	$\frac{1,06-1,16}{1,11}$	$\frac{0,01-0,50}{0,09}$	$\frac{0,02-0,67}{0,14}$	$\frac{0,09-0,25}{0,16}$	17,28 <sup>4</sup>
S <sub>2</sub> , мг УВ/ г породы	$\frac{68,51-73,37}{70,94}$	$\frac{0,07-24,66}{2,32}$	$\frac{0,21-7,84}{2,83}$	$\frac{0,10-0,62}{0,26}$	57,82 <sup>4</sup>
PI	0,02	$\frac{0,01-0,22}{0,07}$	$\frac{0,01-0,19}{0,06}$	$\frac{0,23-0,49}{0,41}$	0,23 <sup>4</sup>
HI, мг УВ/ г C <sub>орг</sub>	$\frac{628-644}{636}$	$\frac{45-560}{217}$	$\frac{57-622}{324}$	$\frac{19-40}{31}$	–
T <sub>max</sub> , °C	437	$\frac{431-444}{436}$	$\frac{423-436}{431}$	$\frac{439-509}{479}$	462 <sup>4</sup>

*Примечание.* Здесь и далее в числителе разброс значений, в знаменателе среднее арифметическое. <sup>1</sup> – здесь – хлороформенные экстракты из дробленных битумосодержащих пород; <sup>2</sup> – в строке «Количество образцов, шт.» за скобками – количество образцов, для которых определено содержание НО и C<sub>орг</sub>, в скобках – для которых получены удовлетворительные результаты по пиролизу; <sup>3</sup> – в скобках – аномальные значения; <sup>4</sup> – результаты пиролиза битума из образца ХР-Л-1

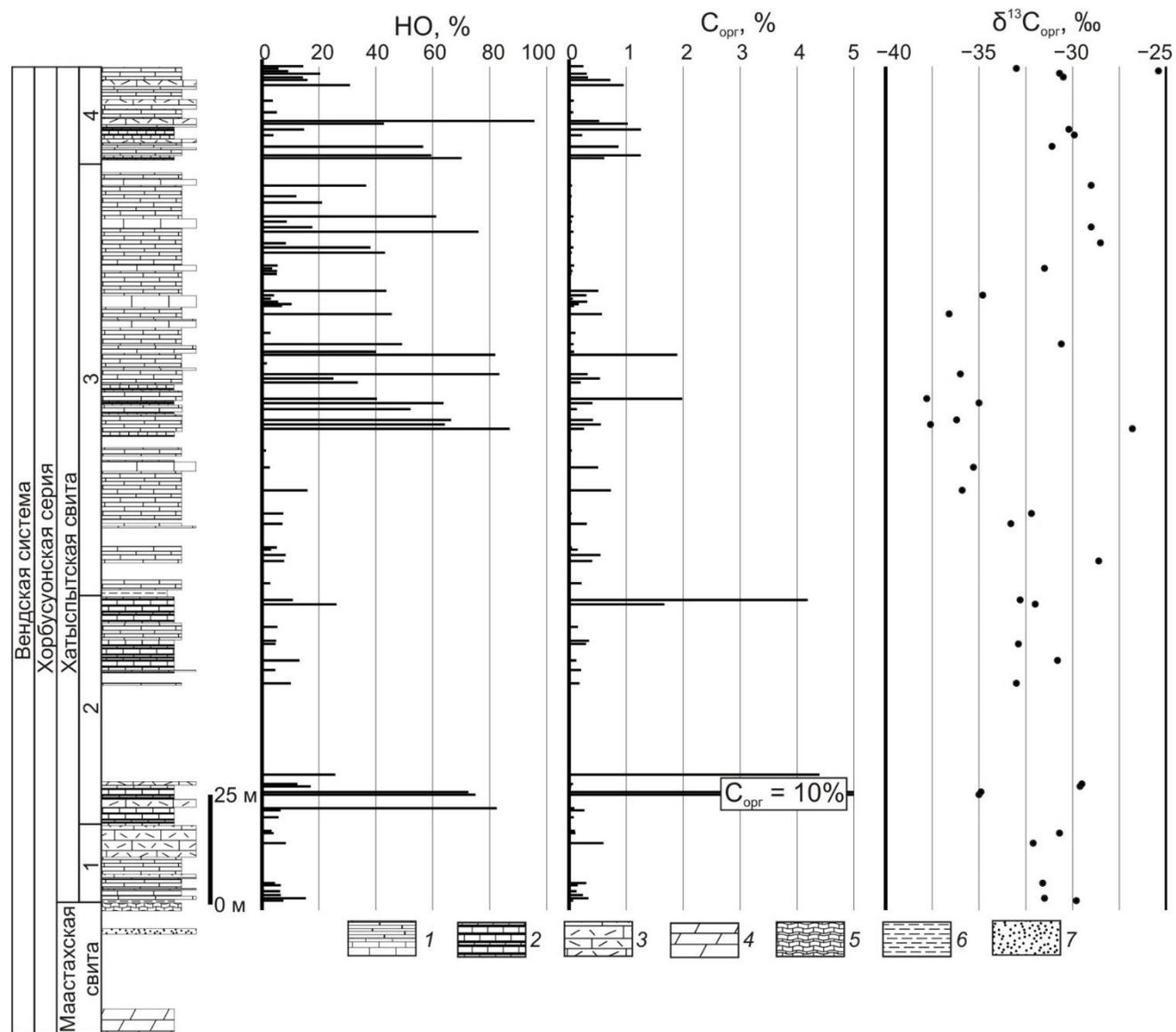


Рисунок 4.1.3 – Изменение содержаний нерастворимого остатка, органического углерода и изотопного состава органического углерода по разрезу хатыспытской свиты.

Условные обозначения: 1 – известняки; 2 – переслаивание известняков и аргиллитов; 3 – известняки обломочные; 4 – доломиты; 5 – доломиты микробиалитовые; 6 – аргиллиты; 7 – песчаники

Полученные результаты по содержанию и распределению  $C_{\text{орг}}$  в породах согласуются с опубликованными данными (Таблица 4.1.2) и свидетельствуют о том, что распределение  $C_{\text{орг}}$  в породах хатыспытской свиты неравномерное.

Таблица 4.1.2 – Содержание органического углерода в породах хатыспытской свиты

Авторы	Количество образцов, шт	Содержание $C_{\text{орг}}$ , %
Настоящее исследование	106	$\frac{0,02-10,2}{0,3}$
[Натапов, 1962]	-	6–8 (битуминозные известняки и доломиты) 12,2–13,7 (битуминозные сланцы)
[Баженова и др., 1981]	-	До 16,7 в известковых аргиллитах
[Геология нефти..., 1981; Конторович и др., 1981]	-	0,05–0,2 10–15 в глинистых породах
[Knoll et al., 1995]	24	$\frac{0,03-1,1}{0,2}$
[Каширцев, 2003]	-	0,4–0,6
[Парфенова и др., 2010]	9	$\frac{0,04-4,2}{0,7}$
[Cui et al., 2016]	158	$\frac{0,01-3,1}{0,3}$
[Duda et al., 2016, 2020]	12	0,1–2,2

Органическое вещество черных сланцев хатыспытской свиты характеризуются легким изотопным составом углерода, значения  $\delta^{13}C_{\text{орг}}$  составляют -35‰ (см. таблицу 4.1.1) [Парфенова и др., 2020; Parfenova et al., 2021; Мельник и др., 2023].

Значения  $\delta^{13}C_{\text{орг}}$  карбонатных, глинисто-кремнисто-карбонатных и карбонатно-кремнистых пород изменяются обычно от -38 до -29‰ и не зависят от содержаний НО и  $C_{\text{орг}}$ . Среднее значение  $\delta^{13}C_{\text{орг}}$  равно -33‰ (см. таблицу 4.1.1). В трех образцах значения  $\delta^{13}C_{\text{орг}}$  аномально высокие и составляют: -26,8‰ в силицитах известковых ( $C_{\text{орг}} = 0,28\%$ ); -25‰ в доломитах с полостями окремнения ( $C_{\text{орг}} = 0,02\%$ ); -23‰ в тонко переслаивающихся известковых и кремнистых породах ( $C_{\text{орг}} = 0,03\%$ ) [Мельник и др., 2023]. Ранее [Cui et al., 2016] в результате изучения 179 проб хатыспытских пород показан широкий разброс значений  $\delta^{13}C_{\text{орг}}$  от -41 до -24‰, среднее равно -33‰. По данным [Knoll et al., 1995]

(24 образца хатыспытской свиты) значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$  лежат в пределах  $-35\dots-27\%$  и в среднем составляют  $-31\%$ . Для керогена ОВ хатыспытской свиты характерны значения  $\delta^{13}\text{C}$ , равные  $-33\dots-32\%$  [Parfenova et al., 2011]. Обогащенность аквагенного ОВ протерозойских и раннепалеозойских отложений легким изотопом углерода подтверждается на значительном статистическом материале [Галимов, 1981; Конторович и др., 1985а, 1985б; Peters, Moldowan, 1993; Peters et al., 2005].

Минимальные значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$  от  $-38$  до  $-34\%$ , как правило, характеризуют среднюю часть третьей подсвиты (см. рисунок 4.1.2) [Мельник и др., 2023]. Это подтверждает ранее зафиксированный уровень отклонения от  $-40$  до  $-35\%$  значений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$  [Cui et al., 2016].

На основе обогащенности пород органическим веществом, битуминологических характеристик пород, особенностей молекулярного состава насыщенных УВ изученная коллекция пород хатыспытской свиты была разделена на три группы. Первая объединяет черные сланцы с автохтонными битумоидами, вторая – породы с преимущественно автохтонными битумоидами (реже параавтохтонными), третья – породы с биодegradированными параавтохтонными битумоидами (установлено по «нафтоновым горбам» на хроматограммах, присутствию деметилированных терпанов, см. подробнее в разделе 4.4) (см. таблицу 4.1.1).

**Хараяотэхская свита.** Содержание НО в породах средней подсвиты хараяотэхской свиты варьирует от 2,4 до 78,5%. Концентрации  $\text{C}_{\text{орг}}$  изменяются от 0,05 до 2,58%. Основную часть коллекции составляют породы с содержанием  $\text{C}_{\text{орг}}$  0,4–0,8%, лишь в двух образцах  $\text{C}_{\text{орг}}$  меньше кларковых значений (0,2% для карбонатных пород [Вассоевич, 1967]) (см. рисунок 4.1.1). В среднем содержание  $\text{C}_{\text{орг}}$  составляет 0,76%, что в два раза выше, чем в породах хатыспытской свиты. Наиболее обогащенными ОВ ( $\text{C}_{\text{орг}} = 2,48\text{--}2,58\%$ ) являются черные тонкослоистые карбонатно-кремнистые породы (см. таблицу 4.1.1, рисунки 4.1.2, 4.1.4).

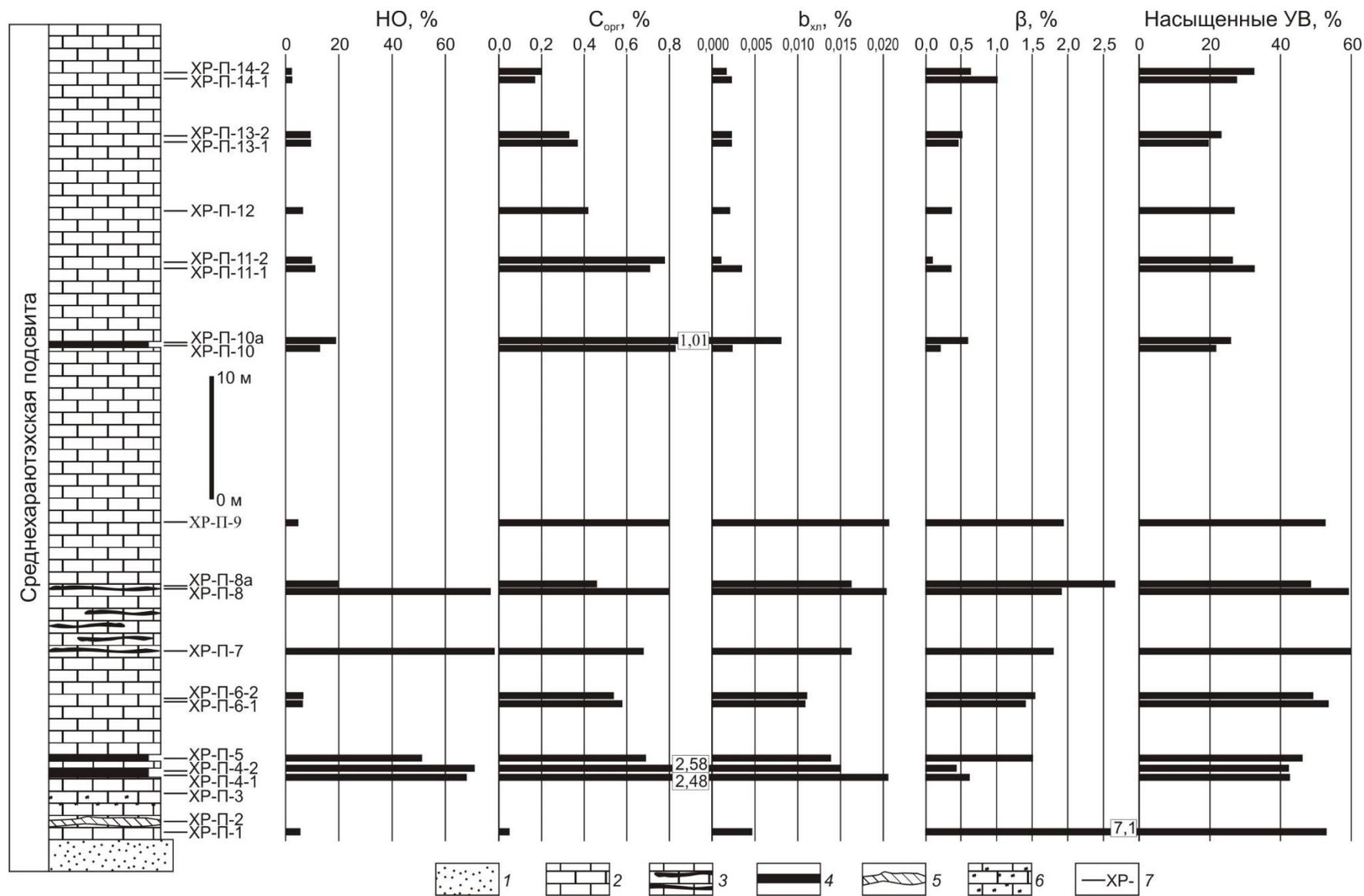


Рисунок 4.1.4 – Литолого-геохимическая характеристика разреза средней подсвиты хараютэхской свиты в устье ручья Бискеебит.  
 Условные обозначения: 1 – песчаники; 2 – известняки; 3 – карбонатные породы с тончайшими прослоями черных кремнистых пород;  
 4 – черные тонкоплитчатые карбонатно-кремнистые породы; 5 – окремненная кальцитовая жила с битумом; 6 – известняки с включениями графитоподобного битума; 7 – уровень отбора образца и его номер

В публикациях Т.К. Баженовой, П.Н. Соболева, С.Ф. Бахтурова и других было показано, что породы хараютэхской свиты обогащены ОВ как в естественных обнажениях, так и в разрезе скважины. В обнажении на ручье Хатыстах концентрации  $C_{\text{орг}}$  составляют 0,41%, в скважине Дьяппальская-1 – 1,09% [Баженова и др., 1981; Бахтуров, 1987; Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021].

По изотопному составу углерода ОВ пород средней подсвиты хараютэхской свиты похоже на ОВ пород хатыспытской свиты. Значения  $\delta^{13}C_{\text{орг}}$  изменяются от -35 до -29‰ и в среднем равны -31‰ [Мельник, Парфенова, 2021] (см. таблицу 4.1.1).

Были изучены светлые преимущественно карбонатные породы с битумами верхней подсвиты хараютэхской свиты. Установлено, что содержание НО в трех образцах пород составляет 0,7–3,5%, в одном – 76,8 %. Содержание  $C_{\text{орг}}$  на породу варьирует от 0,3 до 1,6%, а на нерастворимый остаток – от 0,7 до 68,4%. Исследование изотопного состава углерода показало, что для нерастворимых остатков битумосодержащих пород (2 пробы) значения  $\delta^{13}C_{\text{орг}}$  составляют -30‰, а для битума из одного образца -32‰ (см. таблицу 4.1.1).

## 4.2 Пиролитические характеристики органического вещества пород

При обсуждении пиролитических характеристик ОВ необходимо определить критерии валидности полученных результатов. К. Петерс с коллегами предлагают следующие пороговые значения, при которых результаты пиролиза можно считать удовлетворительными:  $C_{\text{орг}} \geq 0,3\%$ ,  $S_2 \geq 0,5$  мг УВ/г породы [Peters, 1986; Peters, Cassa, 1994]. В настоящем исследовании результаты считались удовлетворительными при  $C_{\text{орг}} \geq 0,1\%$ ,  $S_2 \geq 0,1$  мг УВ/г породы.

**Хатыспытская свита.** Для аномально обогащенных ОВ черных сланцев значения «битумоидной компоненты»  $S_1$  составляют 1,06–1,16 мг УВ/г породы, «керогеновой компоненты»  $S_2$  – 68,5–73,37 мг УВ/г породы,  $PI$  – 0,02,  $HI$  – 628–644 мг УВ/г  $C_{\text{орг}}$ ,  $T_{\text{max}}$  – 437 °С (см. таблицу 4.1.1) [Мельник и др., 2023]. Суммарная величина «битумоидной» и «керогеновой» ( $S_1+S_2$ ) составляющих численно отражает генерационный потенциал нефтепроизводящих пород.

Черные сланцы обладают высоким генерационным потенциалом по классификации [Тиссо, Вельте, 1981].

Для карбонатных и карбонатно-кремнистых пород хатыспытской свиты с преимущественно автохтонными битумоидами удовлетворительные результаты по пиролизу были получены для 36 образцов (Рисунок 4.2.1). Значения  $S_1$  лежат в пределах 0,01–0,50 мг УВ/г породы, а  $S_2$  – 0,10–24,66 мг УВ/г породы. Величины  $S_1$  и  $S_2$  возрастают с увеличением содержания  $C_{\text{орг}}$  в породах ( $R = +0,91$  и  $+0,98$  соответственно) (Рисунок 4.2.2, Рисунок 4.2.3).

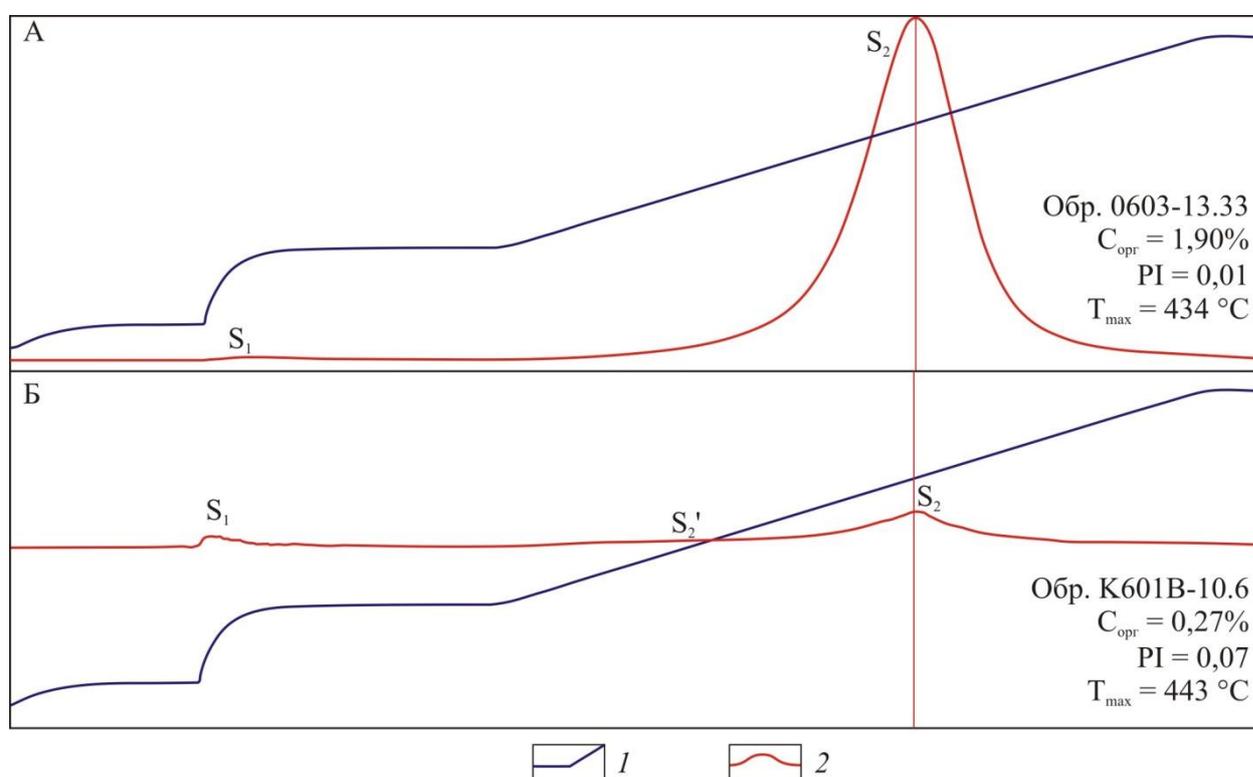


Рисунок 4.2.1 – Типовые пирограммы пород хатыспытской свиты, обогащенных (А) и слабо обогащенных ОВ (Б).

Условные обозначения: 1 – кривая температурного режима; 2 – пирограмма

Среднее значение суммарного генерационного потенциала ( $S_1+S_2$ ) равно 2,85 мг УВ/г породы, максимальное – 25,13 мг УВ/г породы. По классификации Б. Тиссо и Д. Вельте (1981), большая часть образцов пород хатыспытской свиты характеризуется низким генерационным потенциалом ( $<2$  мг УВ/г породы), меньшая – умеренным (2–6 мг УВ/г породы), редко отмечается высокий генерационный потенциал ( $>6$  мг УВ/г породы). Значения  $PI$  как правило  $<0,1$ ,

HI – >150 мг УВ/г C<sub>орг</sub> и достигают 560 мг УВ/г C<sub>орг</sub>, T<sub>max</sub> – в среднем 436 °С (Рисунок 4.2.4). В двух образцах с содержанием C<sub>орг</sub> 0,3 и 0,6% наблюдаются повышенные значения PI (0,22 и 0,14) и пониженные HI (94 и 102 мг УВ/г C<sub>орг</sub> соответственно) (см. таблицу 4.1.1) [Мельник и др., 2023].

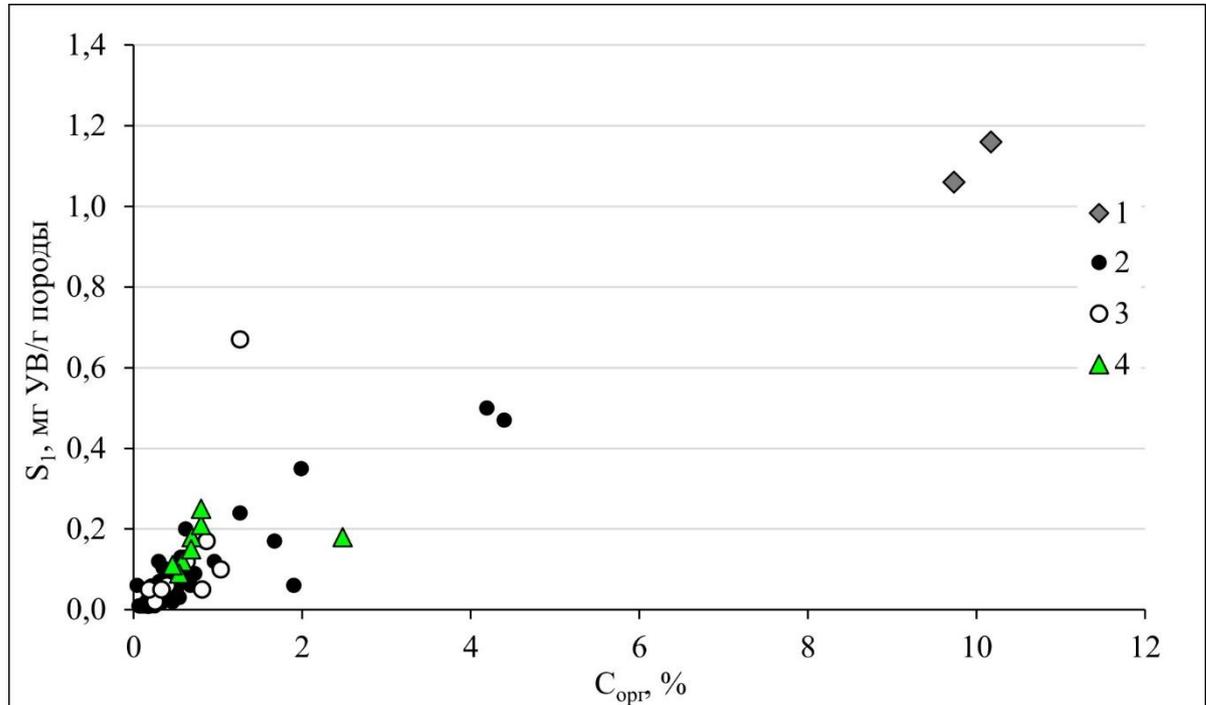


Рисунок 4.2.2 – Диаграмма пика «битумоидной» составляющей S<sub>1</sub> и содержания органического углерода в породах.

Условные обозначения. Породы хатыспытской свиты: 1 – черные сланцы; 2 – карбонатные и глинисто-карбонатно-кремнистые с преимущественно автохтонным битумоидом; 3 – карбонатные и карбонатно-кремнистые с биодegradированным битумоидом. 4 – породы средней подсвиты хараютэхской свиты

Породы с биодegradированными битумоидами по генерационным свойствам, как правило, похожи на породы с преимущественно автохтонными битумоидами. Величины «битумоидной» и «керогеновой» составляющих равны 0,02–0,17 и 0,21–4,77 мг УВ/ г породы; в одном образце с максимальным содержанием C<sub>орг</sub> (1,26%) – 0,67 и 7,84 мг УВ/г породы соответственно. Значения пиков S<sub>1</sub> и S<sub>2</sub> растут с увеличением концентраций C<sub>орг</sub> в породе (r = +0,72 и +0,96 соответственно). Величины PI составляют 0,01–0,08, HI – 170–622 мг УВ/г C<sub>орг</sub>. В одном образце PI = 0,19, HI = 57 мг УВ/г C<sub>орг</sub>. Значения T<sub>max</sub> равны 429–436 °С, что в среднем ниже, чем в породах с преимущественно автохтонным битумоидом (см. таблицу 4.1.1,

рисунок 4.2.4). Вероятно, это понижение связано с миграционной природой биодegradированных битумоидов [Мельник и др., 2020, 2023].

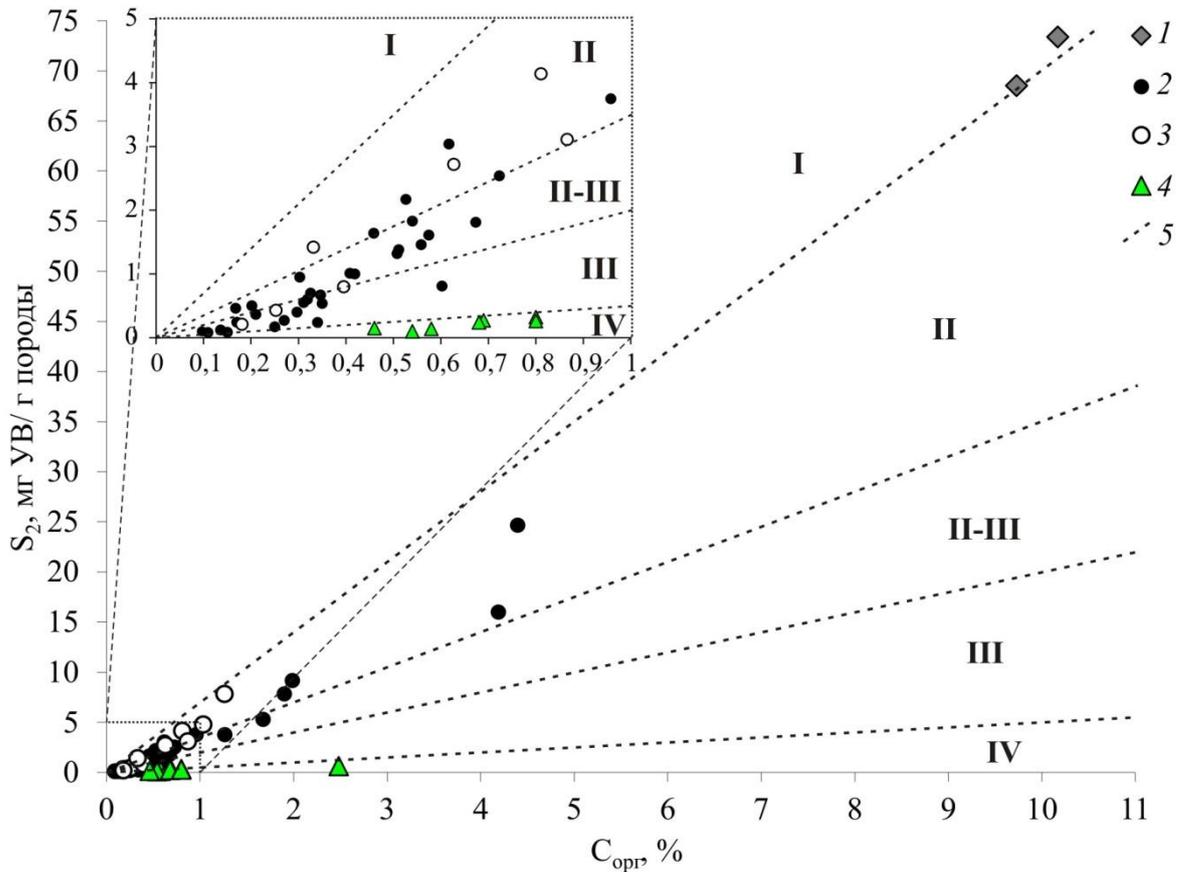


Рисунок 4.2.3 – Диаграмма остаточного генерационного потенциала  $S_2$  и содержания органического углерода в породах.

Условные обозначения: 1–4 – см. на рисунке 4.2.2. 5 – границы типов ОВ: I – озерный, склонный к генерации нефти; II – морской, склонный к генерации нефти; II-III – смешанный, склонный к генерации нефти и газа; III – склонный к генерации газа; IV – инертный

Распределение фигуративных точек на диаграмме  $HI-T_{max}$  демонстрирует, что аквагенное морское ОВ хатыспытской свиты соответствует II типу керогена (см. рисунок 4.2.4) [Peters, 1986; Peters et al., 2005]. В серии образцов наблюдаются пониженные значения водородного индекса  $<150$  мг УВ/г  $C_{орг}$ , а фигуративные точки попадают в область III типа керогена, который обычно связан с террагенным органическим веществом (см. рисунок 4.2.4).

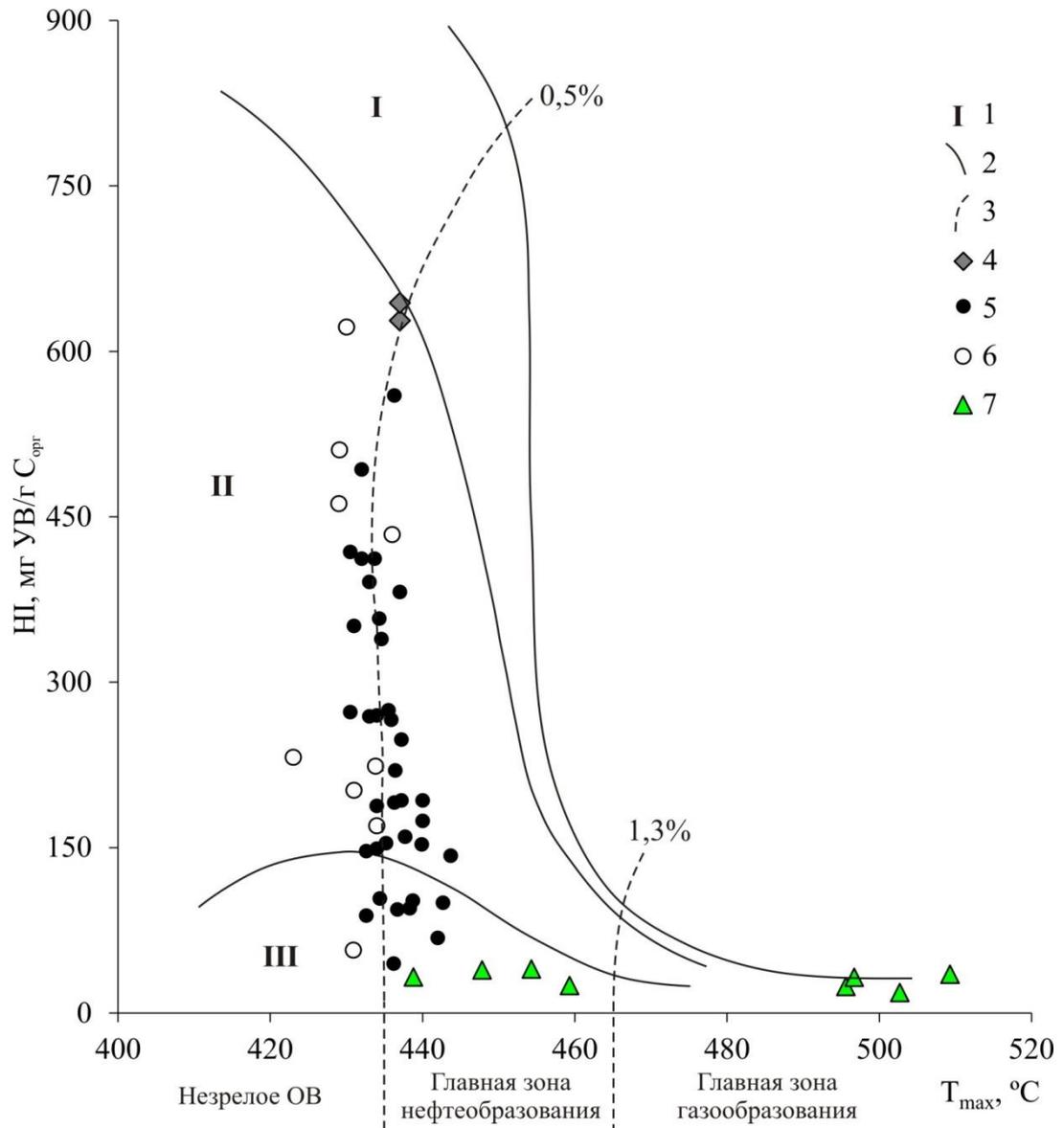


Рисунок 4.2.4 – Диаграмма HI–T<sub>max</sub> для пород венда северо-востока Сибирской платформы.

Условные обозначения. 1 – типы ОВ: I – аквагенный озерный; II – аквагенный морской; III – террагенный; 2 – границы типов ОВ; 3 – изолинии отражательной способности витринита. Породы хатыспытской свиты: 4 – черные сланцы; 5 – карбонатные и глинисто-карбонатно-кремнистые с преимущественно автохтонным битумоидом; 6 – карбонатные и карбонатно-кремнистые с биодegradированным битумоидом. 7 – породы средней подсвиты хараютэхской свиты

Ранее для ОВ хатыспытской свиты были получены значения HI 56–382 мг УВ/г C<sub>орг</sub> [Parfenova et al., 2011]. Авторы предположили, что понижение величины HI может быть связано с окислением органического вещества на стадиях седименто- и диагенеза [Parfenova et al., 2011].

Приведенные значения T<sub>max</sub> и RI свидетельствуют о зрелом органическом веществе пород хатыспытской свиты [Меленевский, 1991]. Степень его

преобразования соответствует градации катагенеза МК<sub>1</sub><sup>1</sup> по шкале А.Э. Конторовича – началу главной зоны нефтеобразования [Конторович, 1976], или, по классификации К. Петерса, началу нефтяного окна [Peters, 1986].

*Хараютэхская свита.* Был проведен пиролиз 19 образцов пород средней подсвиты хараютэхской свиты. В большинстве случаев полученные пирограммы демонстрируют низкий пик S<sub>1</sub>, отсутствие пика S<sub>2</sub> и аномально низкий пик S<sub>2</sub>' (T<sub>max</sub> регистрируется на уровне 300–350 °С). Удовлетворительные результаты были получены для 8 проб пород (см. таблицу 4.1.1). Величины пиков S<sub>1</sub> и S<sub>2</sub> составляют 0,09–0,25 и 0,10–0,62 мг УВ/г породы соответственно. Значения PI в среднем равны 0,41, HI – 31 мг УВ/г C<sub>орг</sub>. Пик S<sub>2</sub> во всех пробах осложнен несколькими пиками (Рисунок 4.2.5). Значения T<sub>max</sub> варьируют от 439 до 509 °С (см. таблицу 4.1.1, рисунок 4.2.4). По-видимому, сложное строение пика S<sub>2</sub> и пониженные значения T<sub>max</sub> обусловлены асфальто-смолистыми компонентами битумоидов в породах средней подсвиты хараютэхской свиты.

Низкие значения S<sub>2</sub> (до 0,62 мг УВ/г породы при C<sub>орг</sub> = 2,5%) и HI (до 40 мг УВ/г породы) указывают на высокий катагенез ОВ, соответствующий глубинной зоне газообразования. На диаграмме S<sub>2</sub>–C<sub>орг</sub> фигуративные точки, соответствующие образцам средней подсвиты хараютэхской свиты, попадают в область инертного ОВ (тип IV) (см. рисунок 4.2.3). Полученные данные свидетельствуют о полной реализации генерационного потенциала породами средней подсвиты хараютэхской свиты.

Был проведен пиролиз битума из образца карбонатной породы верхней подсвиты хараютэхской подсвиты ХР-Л-1. Значения S<sub>1</sub> составили 17,28 мг УВ/г битума, S<sub>2</sub> – 57,82 мг УВ/г битума, T<sub>max</sub> – 462 °С (см. таблицу 4.1.1). Согласно классификации, предложенной в работе [Меленевский, 1991], на основе величины  $100 \times S_1 / (S_1 + S_2)$ , равной 23% для образца битума из верхней подсвиты хараютэхской свиты, его можно отнести к классу асфальтитов.

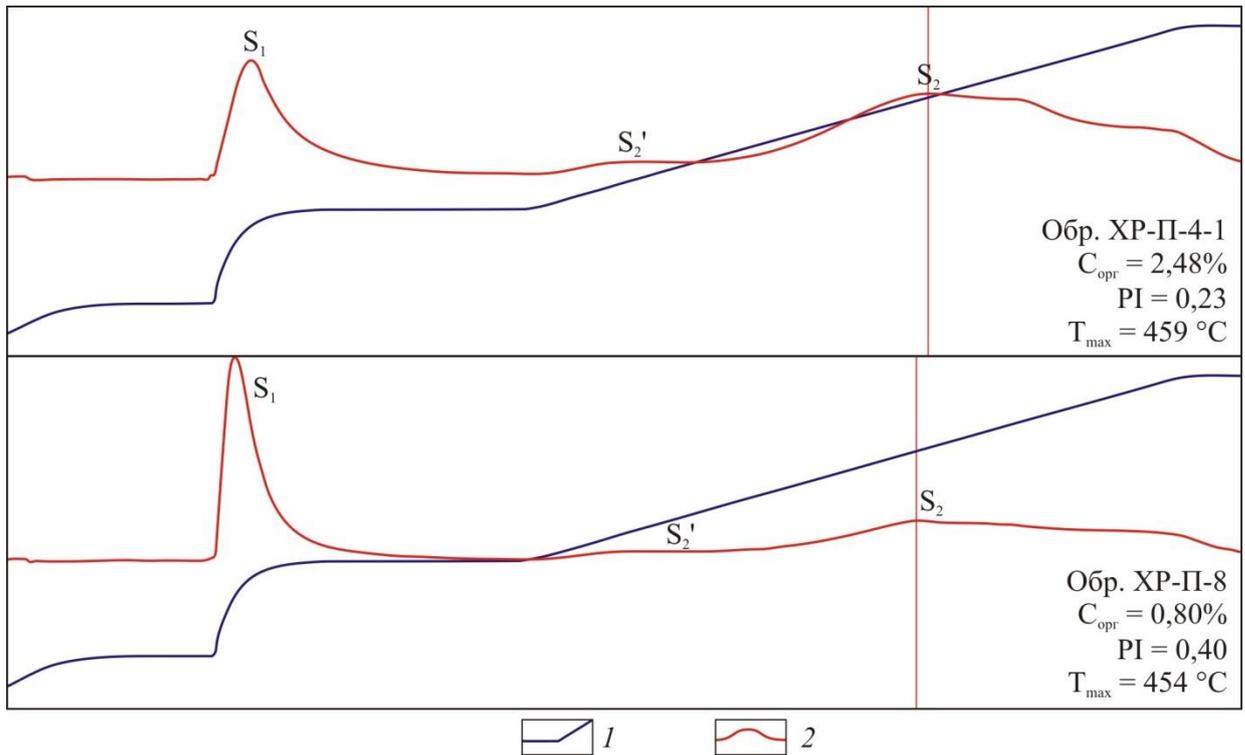


Рисунок 4.2.5 – Типовые пирограммы пород средней подбиты харяотэхской свиты.  
Условные обозначения: 1 – кривая температурного режима, 2 – пирограмма

### 4.3 Битуминологические характеристики пород

**Хатыспытская свита.** Выходы хлороформенных битумоидов для черных сланцев составляют 0,308–0,385%,  $\beta$  – 2,4–2,9%. В карбонатных, глинисто-кремнисто-карбонатных и карбонатно-кремнистых породах с преимущественно автохтонными и параавтохтонными биodeградированными битумоидами значения  $b_{\text{хл}}$  изменяются в интервалах 0,002–0,691% и 0,009–0,220%, и в среднем равны 0,038 и 0,060% соответственно (Таблица 4.3.1, Рисунок 4.3.1). Величины  $\beta$  в породах с преимущественно автохтонными битумоидами изменяются обычно от 1,0 до 10,5%, в некоторых образцах пород, обедненных ОВ ( $C_{\text{орг}} < 0,2\%$ ), отмечаются высокие значения  $\beta$  (до 47,4%). Для биodeградированных битумоидов значения  $\beta$  лежат в интервале 3,5–13,1% (см. таблицу 4.3.1, Рисунок 4.3.2).

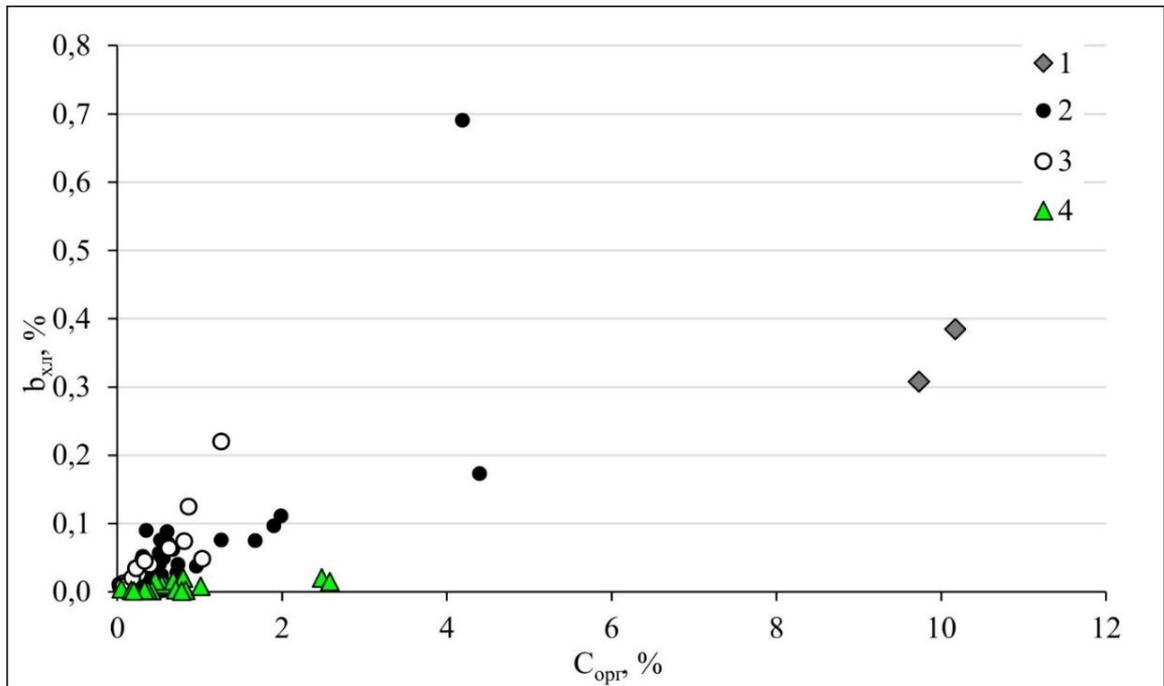


Рисунок 4.3.1 – Диаграмма выхода битумоида и содержания  $C_{орг}$  в породах. Условные обозначения. Породы хатыспытской свиты: 1 – черные сланцы; 2 – карбонатные и глинисто-карбонатно-кремнистые с преимущественно автохтонным битумоидом; 3 – карбонатные и карбонатно-кремнистые с биodeградированным битумоидом. 4 – породы средней подсвиты хараютэхской свиты

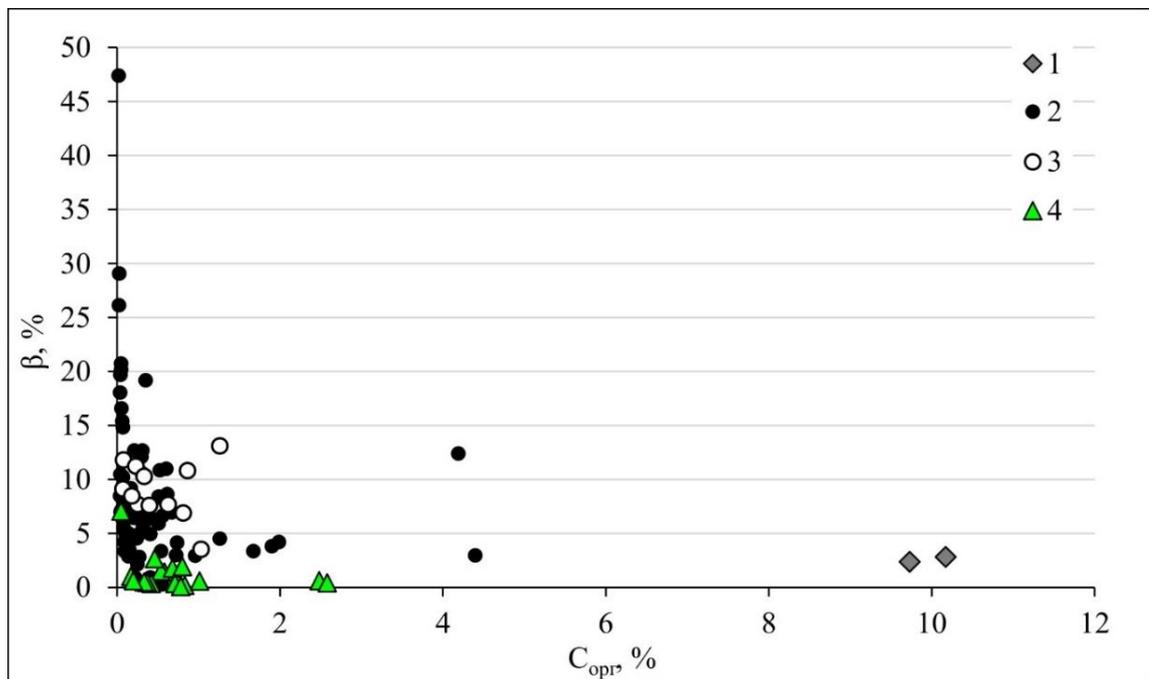


Рисунок 4.3.2 – Диаграмма битумоидного коэффициента и содержания органического углерода в породах (закономерность Успенского-Вассоевича). Условные обозначения: см. на рисунке 4.3.1

Таблица 4.3.1 – Битуминологические характеристики пород вендских отложений северо-востока Сибирской платформы

Свита	Хатыспытская			Хараютэхская (средняя подсвита)	Хараютэхская (верхняя подсвита)
	Известковые аргиллиты (черные сланцы)	Карбонатные и глинисто-карбонатно- кремнистые породы		Карбонатные и карбонатно-кремнистые породы	Кавернозные карбонатные породы с битумами
Битумоиды	Автохтонные	Преимущественно автохтонные	Паравтохтонные биодegradированные	Остаточные	Аллохтонные <sup>1</sup>
Количество образцов, шт.	2	73	12	19	4
b <sub>хл</sub> , %	<u>0,308–0,385</u> 0,346	<u>0,002–0,691</u> 0,038	<u>0,009–0,22</u> 0,06	<u>0,001–0,021</u> 0,009	<u>0,019–0,099</u> 0,065
β, %	<u>2,4–2,9</u> 2,6	<u>0,3–47,4</u> 8,7	<u>3,5–13,1</u> 9,0	<u>0,1–7,1</u> 1,3	–
Насыщенные УВ, %	14	<u>9–66</u> 25	<u>9–48</u> 22	<u>20–60</u> 39	<u>23–38</u> 31
Ароматические УВ, %	<u>19–28</u> 24	<u>0,3–27</u> 9	<u>1–24</u> 13	<u>1–17</u> 7	<u>12–15</u> 14
Сумма УВ, %	<u>33–43</u> 37	<u>13–76</u> 33	<u>22–53</u> 35	<u>21–66</u> 46	<u>38–52</u> 45
Смолы, %	<u>57–65</u> 61	<u>24–84</u> 63	<u>45–78</u> 59	<u>33–79</u> 53	<u>37–43</u> 40
Асфальтены, %	<u>1–2</u> 1	<u>1–11 (28–29)</u> 4	<u>0,6–11</u> 6	<u>2–4<sup>2</sup></u> 2	<u>10–20</u> 15
Насыщенные УВ/ Ароматические УВ	<u>0,5–0,8</u> 0,6	<u>0,4–11 (17–95)</u> 4	<u>0,5–15</u> 4	<u>1–15</u> 7	<u>2–3</u> 2
Смолы/ Асфальтены	<u>44–87</u> 66	<u>6–54</u> 12	<u>2–56 (134)</u> 17	<u>10–28<sup>2</sup></u> 19	<u>2–4</u> 3

Примечание. <sup>1</sup> – здесь – хлороформные экстракты из дробленных битумосодержащих пород. <sup>2</sup> – определено для 8 образцов.

Групповой состав битумоидов представлен на тригонограмме (Рисунок 4.3.3). В составе битумоидов черных сланцев хатыспытской свиты на насыщенные УВ приходится 14%, содержание ароматических УВ в среднем равно 24%, смол – 61%, асфальтенов – 1% (см. таблицу 4.3.1, рисунок 4.3.3). В автохтонных битумоидах карбонатных и глинисто-кремнисто-карбонатных пород содержание насыщенных УВ, как правило, на уровне 9–38%, ароматических УВ – 0,3–16%, смол – 49–84%, асфальтенов – 0,6–11%. В редких случаях наблюдается повышенное содержание насыщенных УВ до 42–66%, ароматических – до 18–28%, асфальтенов – 28–29%.

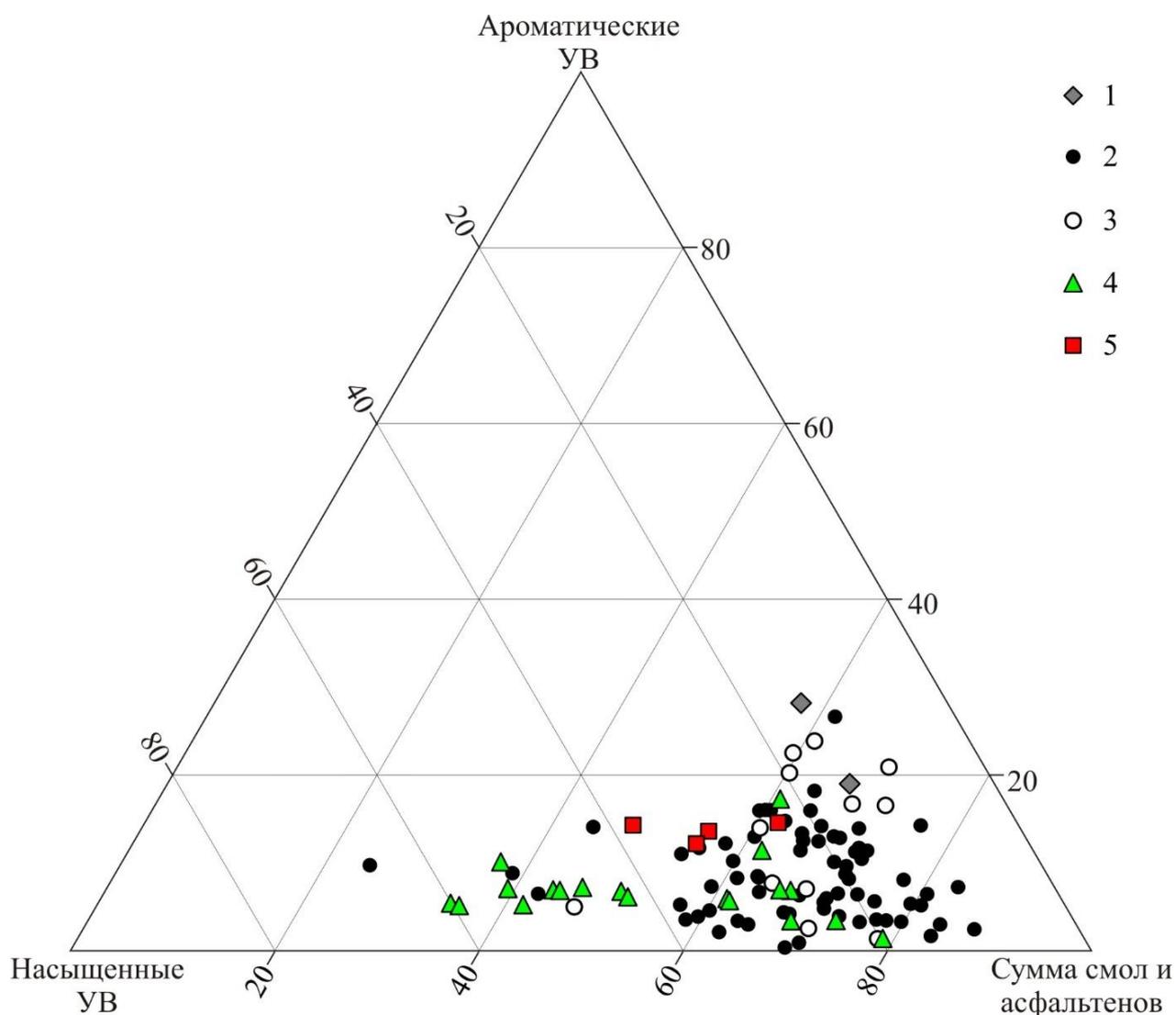


Рисунок 4.3.3 – Тригонограмма группового состава битумоидов пород.  
Условные обозначения: 1–4 – см. на рисунке 4.3.1; 5 – хлороформные экстракты из дробленных пород верхней подсвиты хараютэхской свиты

Преобладание смол в групповом составе битумоидов, низкие величины битумоидного коэффициента свидетельствуют, что большинство битумоидов хатыспытской свиты являются автохтонными. Повышенные значения  $\beta$  (до 47,4%) и содержание насыщенных УВ (до 66%) в нескольких образцах позволяют диагностировать битумоиды как параавтохтонные. Сопоставление битуминологических характеристик с содержанием НО и  $C_{орг}$  показывает, что большинство из них сосредоточено в карбонатных породах, слабо обогащенных органическим веществом. Увеличение содержания насыщенных УВ в групповом составе битумоидов хатыспытской свиты не коррелируют с ростом значений  $\beta$  (Рисунок 4.3.4).

Невысокое содержание УВ в автохтонных битумоидах свидетельствует о катагенезе ОВ хатыспытской свиты, соответствующем началу главной зоны нефтеобразования [Конторович, 1976].

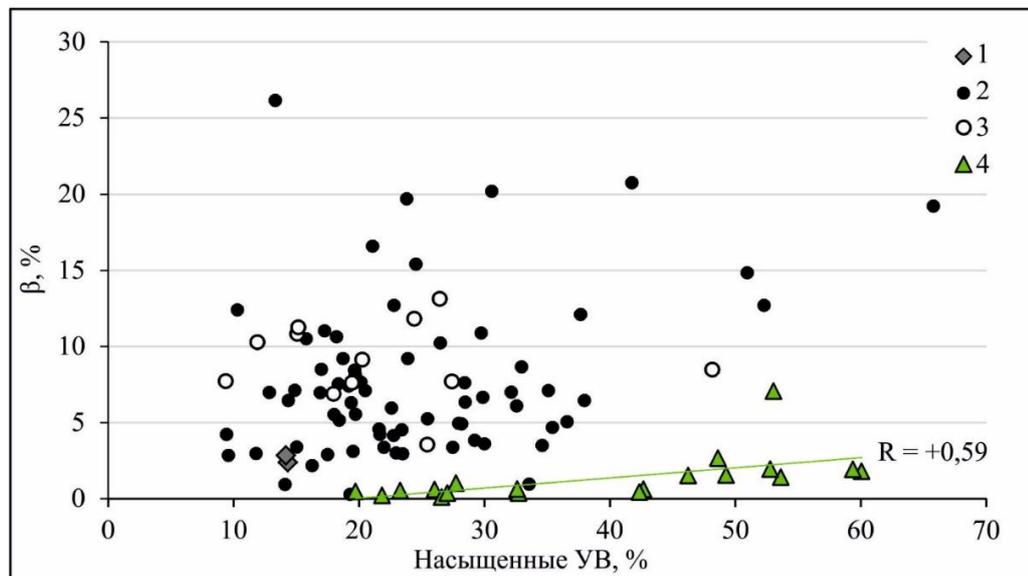


Рисунок 4.3.4 – Диаграмма значений  $\beta$  и содержания насыщенных УВ в групповом составе битумоидов пород.

Условные обозначения: см. на рисунке 4.3.1

Биодеградированные параавтохтонные битумоиды по групповому составу похожи на автохтонные. Содержание насыщенных УВ – 9–27% (в одном образце – 48%), ароматических соединений – от 1 до 24%, смол – 47–78%, асфальтенов – 1–11% (см. таблицу 4.3.1, рисунок 4.3.3).

Выполнено сопоставление результатов пиролитических и битуминологических исследований. Установлено, что значения PI для пород хатыспытской свиты увеличиваются с ростом значений  $\beta$  ( $R = +0,53$ ) (Рисунок 4.3.5) и содержаний насыщенных УВ в групповом составе битумоидов ( $R = +0,58$ ) (Рисунок 4.3.6).

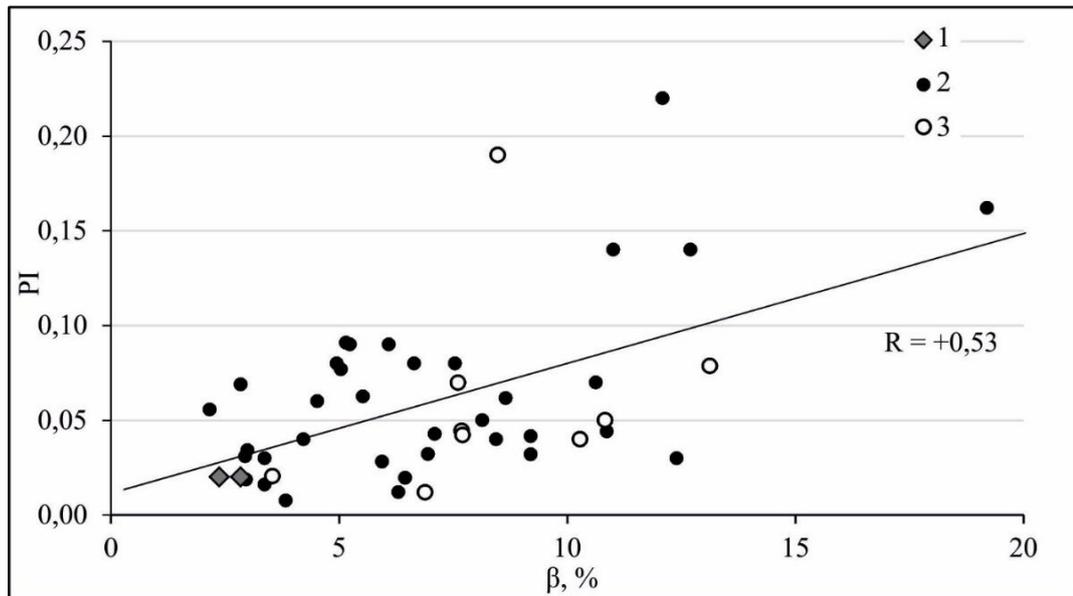


Рисунок 4.3.5 – Диаграмма PI и  $\beta$  для пород хатыспытской свиты.

Условные обозначения: 1 – черные сланцы; 2 – карбонатные и глинисто-карбонатно-кремнистые с преимущественно автохтонным битумоидом; 3 – карбонатные и карбонатно-кремнистые с биодegradированным битумоидом

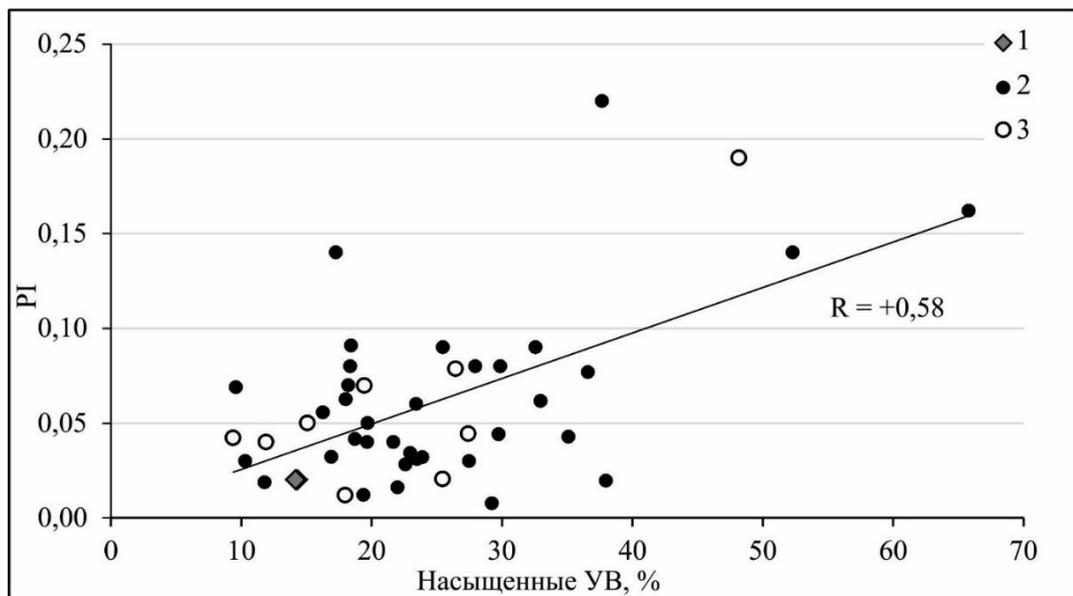


Рисунок 4.3.6 – Диаграмма PI и содержания насыщенных УВ в групповом составе битумоидов пород хатыспытской свиты.

Условные обозначения: см. на рисунке 4.3.5

**Хараютэхская свита.** Выходы битумоидов низкие (0,001–0,021%). В нижней части разреза значения  $b_{\text{хл}}$  на уровне 0,01–0,02%, в верхней части разреза – как правило  $\leq 0,05\%$  (см. рисунки 4.1.4, 4.3.7). Величины  $b_{\text{хл}}$  слабо связаны с содержанием  $C_{\text{орг}}$ . Значения битумоидного коэффициента обычно не превышают 2,7%, в одном образце доломита, обедненном ОВ ( $C_{\text{орг}} = 0,05\%$ ), значение  $\beta$  повышено до 7,1% (см. таблицу 4.3.1, рисунок 4.3.2). Распределение фигуративных точек на диаграммах  $C_{\text{орг}}-b_{\text{хл}}$  и  $C_{\text{орг}}-\beta$  показывает, что в сравнении с образцами из хатыспытской свиты, породы средней подсвиты хараютэхской свиты характеризуются пониженными значениями  $b_{\text{хл}}$  и  $\beta$  (см. рисунки 4.3.1, 4.3.2). Такие величины  $b_{\text{хл}}$  и  $\beta$  характеризуют битумоиды пород средней подсвиты хараютэхской свиты как остаточные [Конторович, 1976].

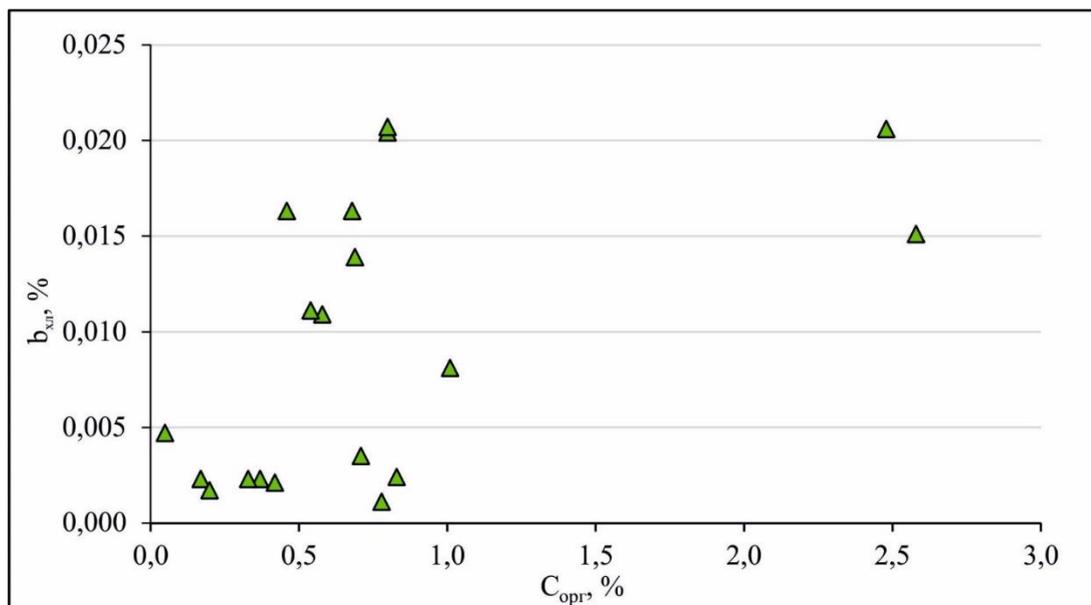


Рисунок 4.3.7 – Диаграмма выхода битумоида и содержания  $C_{\text{орг}}$  в породах средней подсвиты хараютэхской свиты

На тригонограмме группового состава битумоидов (см. рисунок 4.3.3) отчетливо видно, что фигуративные точки формируют две совокупности, обособленные друг от друга. В десяти образцах из нижней части разреза (ХР-П-1 – ХР-П-9) содержание насыщенных углеводородов повышено и составляет 42–60%. Оно увеличивается с ростом значений  $\beta$  ( $R = +0,59$ ) (см. рисунок 4.3.4). Содержание ароматических УВ – 5–10%, смол – 33–50%, асфальтенов – 2–4%,

в двух образцах количественное содержание асфальтенов не определяли. В девяти образцах из верхней части разреза (ХР-П-10 – ХР-П-14-2) повышено содержание смол. Содержание насыщенных УВ составляет 19–33%, ароматических УВ – 1–11% (в одном образце – 17%), смол – 61–79%, количественное содержание асфальтенов не определено (см. таблицу 4.3.1, рисунок 4.3.3).

Сопоставление содержания УВ с содержанием НО и  $C_{\text{орг}}$  показало, что групповой состав битумоидов не зависит от литологии и обогащенности пород органическим веществом. Установлено, что содержание насыщенных УВ в групповом составе битумоидов средней подсвиты хараютэхской свиты возрастает с общим выходом битумоида ( $R = +0,78$ ) и значениями  $\beta$  ( $R = +0,53$ ).

Удовлетворительные результаты по пиролизу (см. раздел 4.2) были получены для образцов из нижней части разреза с повышенными значениями  $b_{\text{хл}}$ ,  $\beta$  и содержанием УВ в групповом составе битумоидов. Вероятно, это может свидетельствовать о том, что пик  $S_2$  и величина  $T_{\text{max}}$  характеризуют УВ, образовавшиеся в результате крекинга смолисто-асфальтеновых компонентов битумоидов, а не керогена (см. раздел 4.2).

Выходы хлороформенных экстрактов из дробленных битумонасыщенных пород верхней подсвиты хараютэхской свиты лежат в интервале 0,019–0,099%. Значения  $\beta$  составляют 4,1–9,1% (см. таблицу 4.3.1). В групповом составе экстрактов содержание насыщенных УВ составляет 23–38%, ароматических УВ – 12–15%, смол – 37–43%, содержание асфальтенов заметно повышено по сравнению с битумоидами средней подсвиты хараютэхской свиты и достигает 10–20% (см. таблицу 4.3.1).

#### **4.4 Состав и распределение алканов, стеранов, терпанов метано-нафтеных фракций битумоидов и нафтидов**

*Хатыспытская свита.* Анализ газожидкостных хроматограмм показал, что нормальные алканы метано-нафтеных фракций битумоидов черных сланцев имеют типовое для аквагенного ОВ распределение с максимумом на  $n\text{-}C_{17}\text{--}C_{19}$ , отношение  $n\text{-}C_{27}/n\text{-}C_{17}$  составляет 0,1 (Таблица 4.4.1, Рисунок 4.4.1, А). Среди

изопреноидных алканов доминируют пристан (Pr) и фитан (Ph). Значения отношений нормальных и изопреноидных алканов следующие: Pr/Ph – 1,0–1,1; Pr/ $n$ -C<sub>17</sub> – 0,4; Ph/ $n$ -C<sub>18</sub> – 0,6–0,7;  $\sum n$ -C<sub>*i*</sub>/ $\sum$ izo-C<sub>*i*</sub> – 4,4–4,5. Значения коэффициента нечетности (CPI) равны 1,1 (Таблица 4.4.1) [Парфенова и др., 2020; Мельник и др., 2023].

Максимум распределения нормальных алканов в преимущественно автохтонных битумоидах хатыспытской свиты приходится на  $n$ -C<sub>17</sub> (что особенно характерно для пород, высоко обогащенных ОВ), для большей части пород максимум представлен широкой областью высоких пиков  $n$ -C<sub>19</sub>–C<sub>25</sub> (см. рисунок 4.4.1, Б). Реже, как правило, для пород, обедненных ОВ, характерен узкий пик распределения нормальных алканов, приходящийся на  $n$ -C<sub>23</sub>–C<sub>25</sub>. Отношение  $n$ -C<sub>27</sub>/ $n$ -C<sub>17</sub> изменяется в широких пределах от 0,1 до 6,4 (редко возрастает до 14,7–25,0) и в среднем равно 2,3. Минимальные значения фиксируются в породах, высоко обогащенных ОВ. Коэффициент нечетности нормальных алканов (CPI по [Bray, Evans, 1961]) в среднем равен 1,1. Значения отношения пристана (Pr) к фитану (Ph) изменяются в широких пределах от 0,2 до 1,2 и в среднем равны 0,6. Отношения Pr/ $n$ -C<sub>17</sub> и Ph/ $n$ -C<sub>18</sub> в среднем равны 0,3 и 0,4 соответственно. Важно отметить, что для глинистых известняков, аномально обогащенных ОВ ( $C_{\text{орг}} = 4,2$ – $4,4\%$ ), как и для черных сланцев, значения Pr/ $n$ -C<sub>17</sub> и Ph/ $n$ -C<sub>18</sub> повышены до 0,4 и 0,6–0,7 соответственно. Отношение суммы нормальных алканов к сумме изопреноидных ( $\sum n$ -C<sub>*i*</sub>/ $\sum$ izo-C<sub>*i*</sub>) в среднем равно 15 [Мельник и др., 2019, 2023].

Таблица 4.4.1 – Распределение и отношения алканов битумоидов вендских отложений северо-востока Сибирской платформы

Свита	Хатыспытская		Хараютэхская (средняя подсвита)	Хараютэхская (верхняя подсвита)	
Литология	Известковые аргиллиты (черные сланцы)	Карбонатные и глинисто-карбонатно- кремнистые породы		Карбонатные и карбонатно- кремнистые породы	Карбонатные породы с битумами
Битумоиды	Автохтонные	Преимущественно автохтонные	Параавтохтонные биodeградированные	Остаточные	Аллохтонные <sup>1</sup>
Количество образцов, шт.	2	69	12	19	4
Pr/Ph	$\frac{1,0-1,1}{1,0}$	$\frac{0,2-1,2}{0,6}$	$\frac{0,3-1,0}{0,7}$	$\frac{0,7-1,6}{1,0}$	$\frac{1,2-2,1}{1,6}$
Pr/n-C <sub>17</sub>	0,4	$\frac{0,2-1,0}{0,3}$	$\frac{0,2-0,4}{0,3}$	$\frac{0,2-1,0}{0,4}$	$\frac{0,3-0,4}{0,3}$
Ph/n-C <sub>18</sub>	0,6	$\frac{0,2-1,1}{0,4}$	$\frac{0,3-0,5}{0,4}$	$\frac{0,2-1,0}{0,4}$	$\frac{0,2-0,4}{0,3}$
n-C <sub>27</sub> /n-C <sub>17</sub>	0,1	$\frac{0,2-6,4 (14,7-25,0)^2}{1,4}$	$\frac{0,4-1,6}{0,8}$	$\frac{0,1-0,5}{0,2}$	$\frac{0,1-0,3}{0,2}$
$\frac{\sum n-C_i}{\sum iso-C_i}$	$\frac{4-5}{4}$	$\frac{4-57}{16}$	$\frac{10-20}{14}$	$\frac{3-8}{6}$	$\frac{5-8}{7}$
CPI <sup>3</sup>	1,1	$\frac{0,9-1,4}{1,1}$	$\frac{1,0-1,5}{1,1}$	$\frac{1,0-1,1 (1,5)^2}{1,0}$	$\frac{1,0-1,2}{1,1}$

Примечание. <sup>1</sup> – хлороформенные экстракты из дробленных битумосодержащих пород. <sup>2</sup> – в скобках указаны аномальные значения.

<sup>3</sup> – коэффициент нечетности нормальных алканов ( $CPI = 0,5 \times ((C_{25}-C_{33})_{\text{нечетные}} / (C_{26}-C_{34})_{\text{четные}} + ((C_{25}-C_{33})_{\text{нечетные}} / (C_{26}-C_{32})_{\text{четные}}))$ )  
[Bray, Evans, 1961].

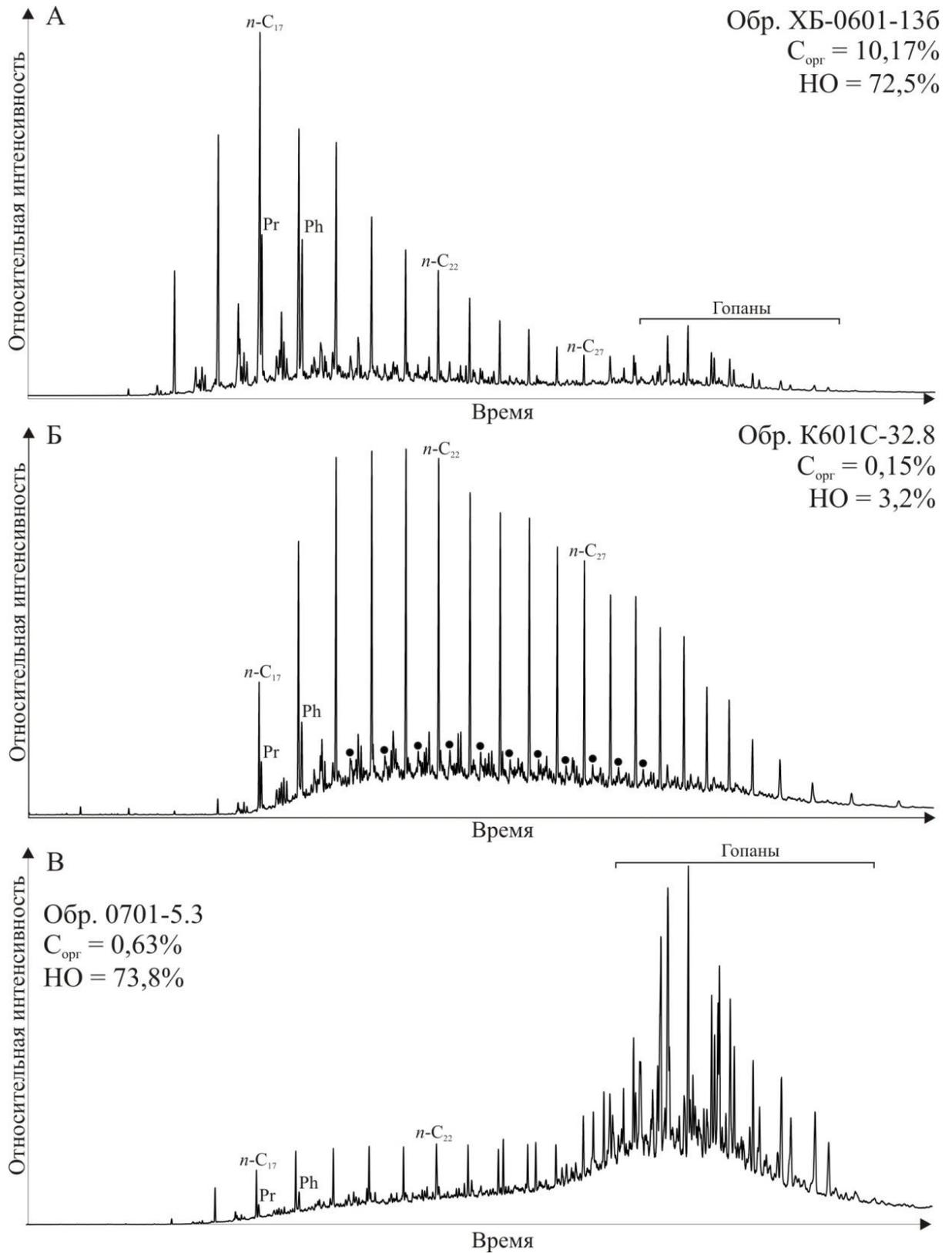


Рисунок 4.4.1 – Газожидкостные хроматограммы метано-нафтеновых фракций автохтонных битумоидов известковых аргиллитов (черных сланцев) (А), карбонатных пород (Б) и биodeградированных битумоидов хатыспытской свиты (В).

Условные обозначения: Pr – пристан; Ph – фитан;  $n\text{-C}_i$  – нормальные алканы; черные кружки – 12- и 13-монотетраалканы

В некоторых образцах автохтонных и параавтохтонных битумоидов карбонатных и карбонатно-кремнистых пород были зафиксированы 12- и 13-монометилалканы в низких концентрациях. Их присутствие подтверждается анализом масс-хроматограмм по  $m/z$  182 (Рисунок 4.4.2). Ранее сообщалось, что для ОВ хатыспытской свиты нехарактерно присутствие этих соединений [Каширцев, 2003; Парфенова и др., 2010]. В целом 12- и 13-монометилалканы являются уникальными биометками. В высоких концентрациях они были обнаружены в древних нефтях (вмещающие отложения – от рифея до нижнего кембрия) южных районов Сибирской платформы и Омана (юг Аравийской платформы на юго-западе Евразии) [Петров, 1984; Конторович и др., 1996, 1999; Тимошина, 2004, 2005; Peters et al., 2005; Craig et al., 2009; Grosjean et al., 2009; Баженова и др., 2014 и многие другие].

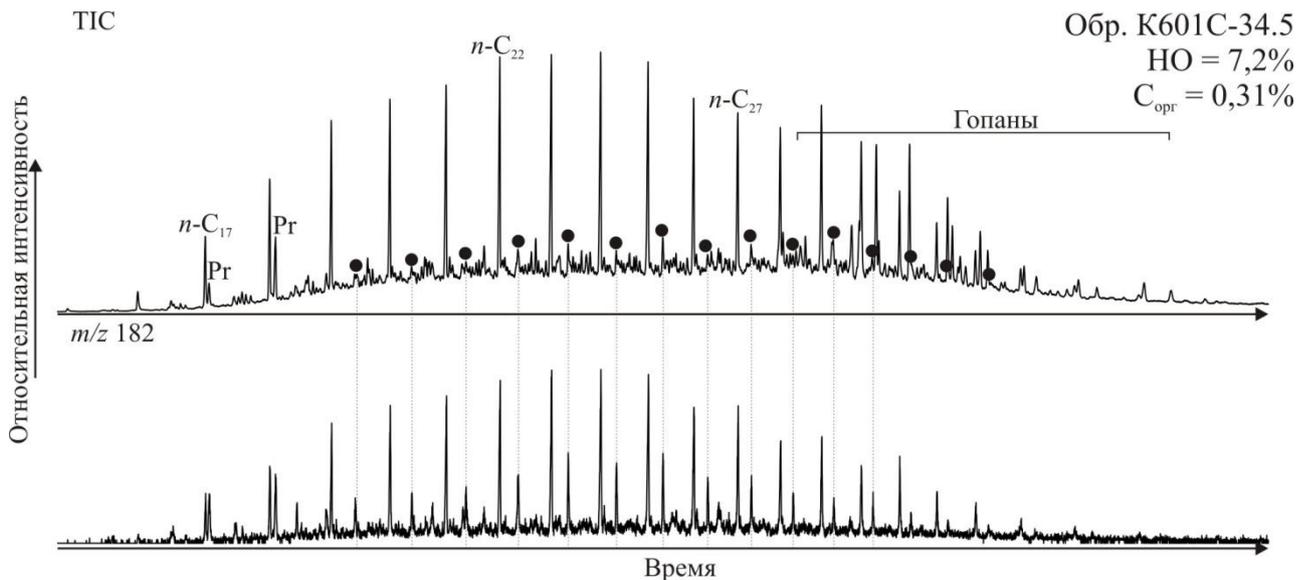


Рисунок 4.4.2 – Хроматограммы по общему ионному току и по  $m/z$  182 метано-нафтеновой фракции битумоида хатыспытской свиты.  
Условные обозначения: см на рисунке 4.4.1

Для нафтидов северо-востока и востока Сибирской платформы 12- и 13-монометилалканы нехарактерны, либо присутствуют в очень низких концентрациях [Тимошина, 2005; Каширцев, 2003, 2004; Каширцев и др., 2009а; Конторович и др., 2014; Парфенова и др., 2014; Баженова и др., 2014; Соболев и др., 2017]. В рассеянном органическом веществе потенциально

нефтегазоматеринских пород 12- и 13-монометилалканы встречаются в высоких концентрациях в бюкской свите венда (Сюгджерская седловина) и в низких концентрациях – в сералахской свите венда (Березовская впадина) и ванаварской свите венда (Байкитская антиклиз) [Филипцов и др., 1999, 2014; Дахнова и др., 2014; Иванова, 2016].

На газожидкостных хроматограммах метано-нафтенных фракций биодegradированных битумоидов хатыспытской свиты наблюдаются высокие «нафтенные горбы» [Петров, 1984] или области неразделенных УВ, а также высокие пики терпанов, часто превышающие пики нормальных алканов (см. рисунок 4.4.1, В). Разбросы значений основных алкановых отношений и коэффициентов следующие:  $n\text{-C}_{27}/n\text{-C}_{17} - 0,4-1,6$ ;  $\text{Pr}/\text{Ph} - 0,3-0,9$ ;  $\text{Pr}/n\text{-C}_{17} - 0,2-0,4$ ;  $\text{Ph}/n\text{-C}_{18} - 0,3-0,5$ ;  $\text{CPI} - 1,0-1,2$  (1,5 в одном образце);  $\sum n\text{-C}_i/\sum \text{izo-C}_i - 10-20$  (см. таблицу 4.4.1). По соотношению нормальных и изопреноидных алканов, в целом, биодegradированные битумоиды похожи на автохтонные (см. таблицу 4.4.1) [Мельник и др., 2020, 2023; Мельник, 2022].

Стерановые УВ анализировались на масс-хроматограммах по  $m/z$  217, 218. Зарегистрированы стераны  $\text{C}_{27}-\text{C}_{30}$  и прегнаны  $\text{C}_{21}-\text{C}_{22}$ . Среди стеранов обычно доминирует этилхолестан  $\text{C}_{29}$  (Рисунок 4.4.3, А), что было показано ранее для ОВ хатыспытской свиты [Каширцев, 2003, 2004; Парфенова и др., 2010; Duda et al., 2016, 202; Каширцев и др., 2019]. Новое исследование позволило установить, что в нескольких образцах как обедненных, так и обогащенных ОВ пород, фиксируются близкие концентрации гомологов  $\text{C}_{27}$  и  $\text{C}_{29}$  (см. рисунок 4.4.3, Б). Процентное соотношение средних концентраций гомологов стеранов  $\text{C}_{27} : \text{C}_{28} : \text{C}_{29}$  составляет 24% : 15% : 61%, отношение  $\text{C}_{29}/\text{C}_{27}$  обычно на уровне 2,0–3,9, в нескольких образцах равно – 1,0–1,8 (Таблица 4.4.2, Рисунок 4.4.4).

Таблица 4.4.2 – Распределение и отношения стеранов битумоидов вендских отложений северо-востока Сибирской платформы

Свита		Хатыспытская		Хараютэхская (средняя подсвита)	Хараютэхская (верхняя подсвита)	
Литология		Известковые аргиллиты (черные сланцы)	Карбонатные и глинисто-карбонатно- кремнистые породы		Карбонатные и карбонатно- кремнистые породы	Кавернозные карбонатные породы с битумами
Битумоиды		Автохтонные	Преимущественно автохтонные	Параавтохтонные биодegradированные	Остаточные	Аллохтонные <sup>1</sup>
В % на сумму C <sub>27</sub> -C <sub>29</sub>	C <sub>27</sub>	<u>24-25</u> 24	<u>17-36</u> 23	<u>21-36</u> 26	<u>30-49</u> 38	<u>32-33</u> 32
	C <sub>28</sub>	14	<u>10-27</u> 15	<u>12-28</u> 18	<u>26-30</u> 28	<u>23-27</u> 24
	C <sub>29</sub>	<u>62-63</u> 62	<u>38-71</u> 61	<u>37-63</u> 56	<u>25-41</u> 34	<u>41-45</u> 44
C <sub>29</sub> /C <sub>27</sub>		<u>2,50-2,61</u> 2,56	<u>1,04-3,90</u> 2,73	<u>1,00-2,88</u> 2,22	<u>0,5-1,4</u> 0,9	<u>1,3-1,4</u> 1,4
C <sub>29</sub> ββ/(αα+ββ)		<u>0,2-0,6</u> 0,4	<u>0,2-0,6</u> 0,4	<u>0,3-0,5</u> 0,4	<u>0,4-0,6</u> 0,5	<u>0,5-0,6</u> 0,5
Диастераны/ Рег. стераны		<u>0,22-0,24</u> 0,23	<u>0,06-0,75</u> 0,25	<u>0,09-0,55</u> 0,22	<u>0,4-1,0</u> 0,6	<u>0,4-0,7</u> 0,5
Стераны/ Прегнаны		3	<u>2-18</u> 9	<u>4-11</u> 7	<u>0,8-3,1</u> 1,4	<u>0,7-1,3</u> 1,0

Примечание. <sup>1</sup> – хлороформные экстракты из дробленных битумосодержащих пород.

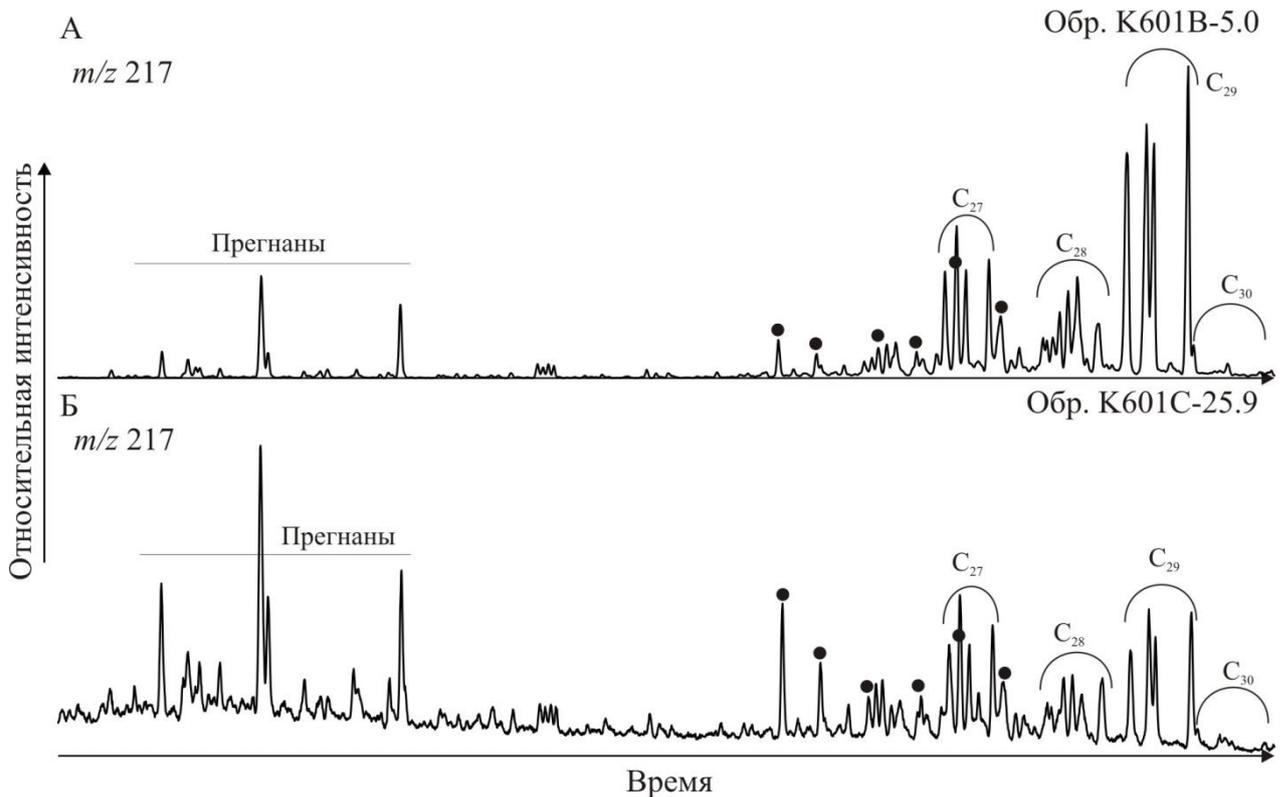


Рисунок 4.4.3 – Масс-хроматограммы по  $m/z$  217 метано-нафтеновых фракций битумоидов хатыспытской свиты.

Условные обозначения:  $C_{27}$ – $C_{30}$  – регулярные стераны; черные кружки – диастераны

Многолетние исследования органической геохимии докембрийских и палеозойских отложений показывают, что ОВ позднего докембрия и раннего палеозоя характеризуется распределением стеранов  $C_{27}$ – $C_{29}$  с высоким содержанием этилхолестана  $C_{29}$  [Peters, Moldowan, 1993; Баженова и др. 1994; Конторович и др., 1996, 2014; Тимошина, 2004, 2005; Тимошина, Болдушевская, 2020; Peters et al., 2005; Kelly et al., 2011; Grosjean et al., 2009; Craig et al., 2013; Brocks et al., 2017; Brocks, 2018]. По представлениям [Brocks et al., 2017; Brocks, 2018] это обусловлено распространением зеленых водорослей в мировом океане после Стертского оледенения, закончившегося 650 млн лет назад.

На Сибирской платформе такое распределение стеранов зафиксировано в ОВ сералахской, бюкской свит венда [Соболев, Кожевых, 2013; Баженова и др., 2014; Дахнова и др., 2014; Иванова, 2016]. В битумоидах аргиллитов ванаварской свиты и в сингенетичных битумоидах оскобинской свиты, распределение стеранов характеризуется близкими концентрациями  $C_{27}$  и  $C_{29}$  [Тимошина, 2004; Филипцов, 2014].

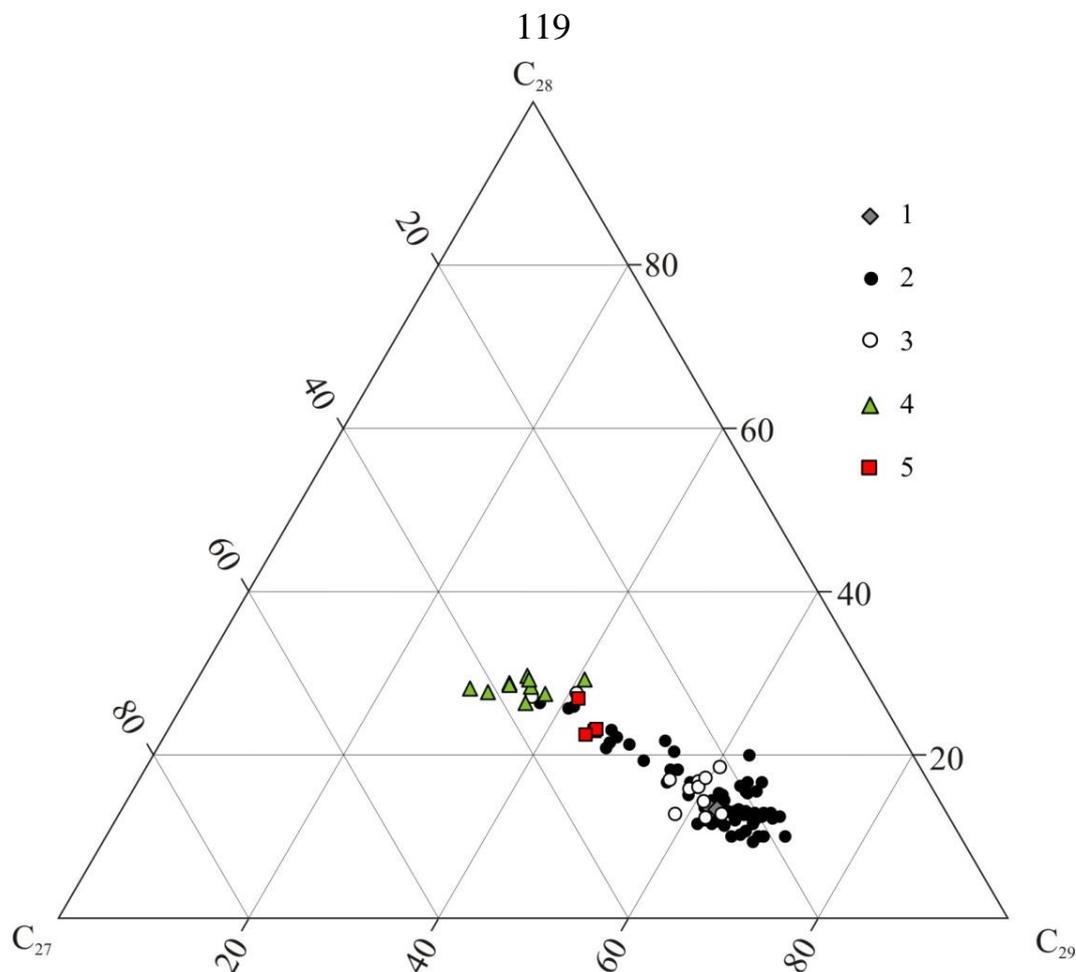


Рисунок 4.4.4 – Тригонограмма распределения стеранов.

Условные обозначения. Битумоиды пород хатыспытской свиты: 1 – черных сланцев; 2 – карбонатных и глинисто-карбонатно-кремнистых с преимущественно автохтонным битумоидом; 3 – карбонатных и карбонатно-кремнистых с биodeградированным битумоидом. 4 – битумоиды пород средней подсвиты хараютэхской свиты; 5 – хлороформенные экстракты из дробленных пород верхней подсвиты хараютэхской свиты

Значения отношений изомеров этилхолестана  $C_{29} \frac{20S}{(20S+20R)}$  и  $C_{29} \frac{\beta\beta}{(\alpha\alpha+\beta\beta)}$  в среднем равны 0,4 и 0,5 соответственно. Отношение стеранов к прегнанам варьирует в пределах 2–18 и увеличивается с ростом отношения стеранов  $C_{29}/C_{27}$  (Рисунок 4.4.5) [Парфенова, Мельник, 2019]. Сопоставление этих величин с содержаниями  $HO$ ,  $S_{орг}$ ,  $S_{общ}$  в породах не выявило связей. Обычно повышенные концентрации прегнанов по отношению к стеранам связывают с высоким катагенезом  $OB$  [Peters et al., 2005; Конторович и др., 2020]. При одинаковом уровне катагенеза  $OB$  в породах хатыспытской свиты, можно предполагать, что изменение отношений стеранов  $C_{29}/C_{27}$  и прегнанов к стеранам связано либо с исходными биологическими источниками, либо с условиями в седиментогенезе и диагенезе.

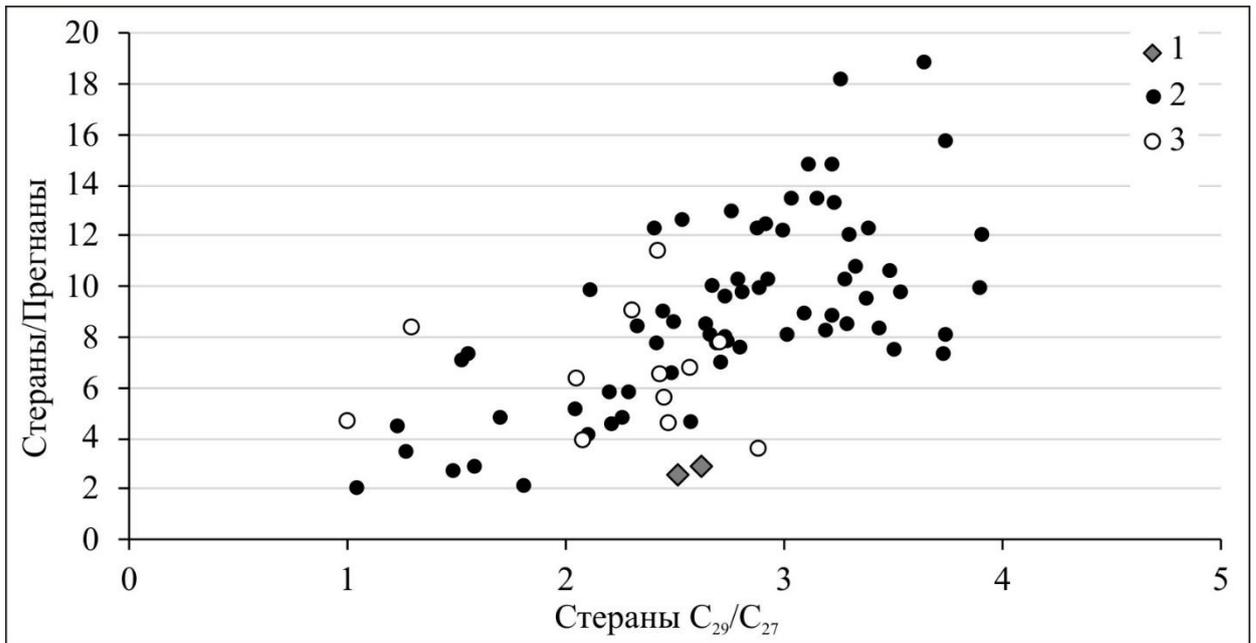


Рисунок 4.4.5 – Диаграмма отношения стеранов к прегнанам и стеранов  $C_{29}/C_{27}$ .  
 Условные обозначения. Битумоиды пород хатыспытской свиты: 1 – черных сланцев; 2 – карбонатных и глинисто-карбонатно-кремнистых с преимущественно автохтонным битумоидом; 3 – карбонатных и карбонатно-кремнистых с биodeградированным битумоидом

Регулярные стераны преобладают над диастеранами, отношение  $\sum C_{27-C_{30}} \beta\alpha/(\alpha\alpha+\beta\beta)$  сохраняется как правило на уровне 0,1–0,3, в нескольких образцах повышено до 0,4–0,8. Образование диастеранов связывают с преобразованием регулярных стеранов при катализе на глинистых минералах [Петров, 1984; Peters et al., 2005]. Результаты настоящего исследования показывают, что относительные концентрации диастеранов не зависят от содержания НО и  $C_{орг}$  в породах, а также от содержания глинистых минералов по данным РФА.

Распределение стеранов в биodeградированных битумоидах хатыспытской свиты подобно их распределению в преимущественно автохтонных битумоидах (см. рисунок 4.4.4). Среди высокомолекулярных гомологов стеранов доминирует, как правило, этилхолестан  $C_{29}$ , в двух образцах  $C_{29} \approx C_{27}$ . Отношения  $C_{29} 20S/(20S+20R)$  и  $C_{29} \beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$  в среднем равны 0,4 и 0,5 соответственно. Отношение стеранов к прегнанам изменяется от 3,5 до 11,4. Регулярные стераны преобладают над диастеранами – отношение изомеров  $\beta\alpha/(\alpha\alpha+\beta\beta)$  составляет 0,1–0,3, в двух образцах повышено до 0,5–0,6 [Мельник и др., 2020; Мельник, 2022].

Терпановые УВ анализировались на масс-хроматограммах по  $m/z$  191, 205, 177 (Рисунок 4.4.6). Среднее содержание гопанов и гомогопанов составляет 32 и 48% соответственно (суммарное – 80%), трицикланов – 13%, тетрацикланов – 2%, моретанов – 5%. В ряду трицикланов доминируют гомологи  $C_{20}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{24}$ . Значения трицикланового индекса (ТЦИ =  $2 \times \sum C_{19-20} / \sum C_{23-26}$  [Конторович и др., 1999]), как правило,  $< 1$  (Таблица 4.4.3). В тетрацикланах преобладает гомолог  $C_{24}$  (90% на сумму  $C_{24}-C_{27}$ ) (см. рисунок 4.4.6). Среди гопанов и гомогопанов преобладает собственно гопан  $C_{30}$ . Отношение адиантана к гопану  $< 1$  и в среднем равно 0,71 (в одном образце  $C_{29}/C_{30} = 1,12$ ). Значения отношения триснорнеогопана (Ts) к трисноргопану (Tm) варьируют в широком интервале от 0,2 до 1,2 и в среднем составляют 0,5.

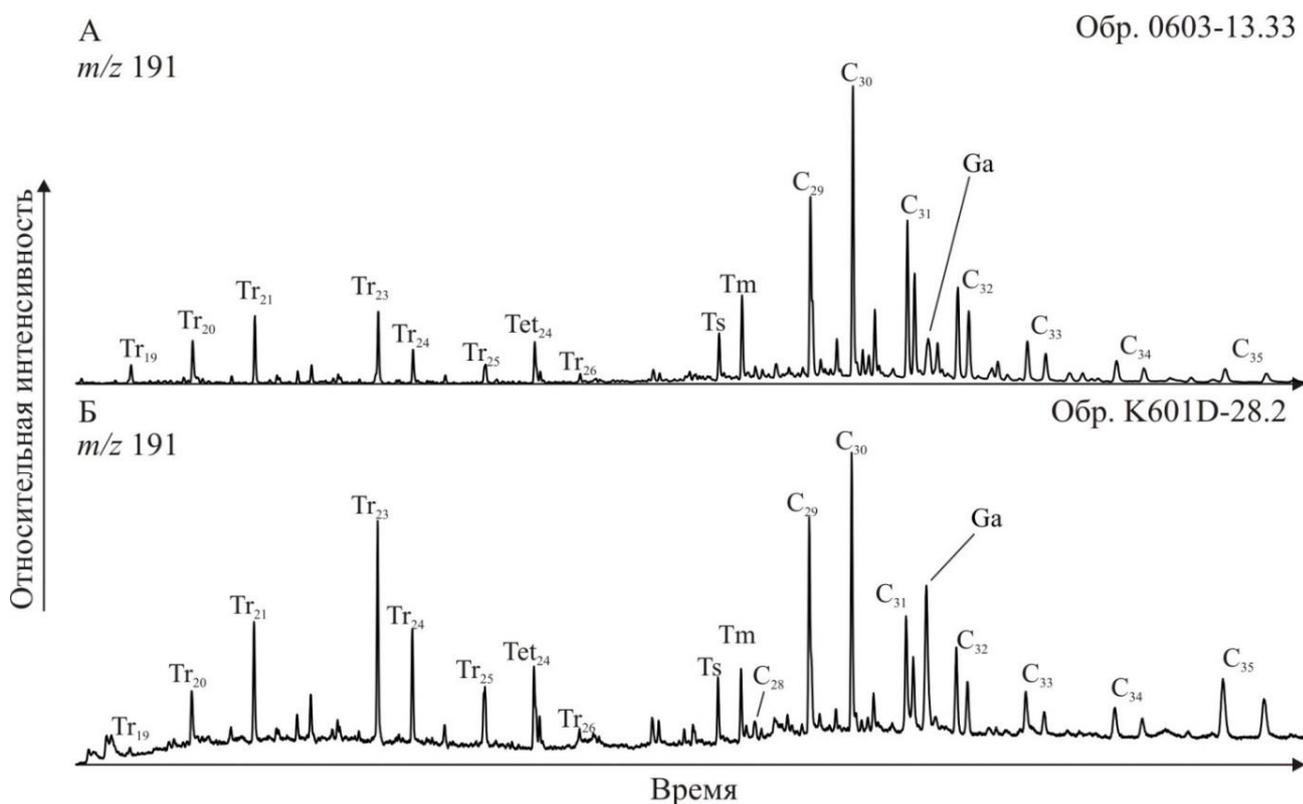


Рисунок 4.4.6 – Масс-хроматограммы по  $m/z$  191 метано-нафтеновых фракций битумоидов хатыспытской свиты.

Условные обозначения:  $Tr_i$  – трицикланы;  $Tet_{24}$  – тетрациклан; Ts – триснорнеогопан; Tm – трисноргопан;  $C_i$  – гопаны и гомогопаны;  $C_{28}$  – 29,30-бисноргопан; Ga – гаммацеран

Таблица 4.4.3 – Распределение и отношения терпанов битумоидов вендских отложений северо-востока Сибирской платформы

Свита		Хатыспытская		Хараютэхская (средняя подсвита)	Хараютэхская (верхняя подсвита)	
Литология		Известковые аргиллиты (черные сланцы)	Карбонатные и глинисто-карбонатно- кремнистые породы		Карбонатные и карбонатно-кремнистые породы	Кавернозные карбонатные породы с битумами
Битумоиды		Автохтонные	Преимущественно автохтонные	Параавтохтонные биodeградированные	Остаточные	Аллохтонные <sup>1</sup>
В % на сумму терпанов	Гопаны	33	<u>20–42</u> 32	<u>23–39</u> 31	<u>13–29</u> 20	<u>12–21</u> 16
	Гомогопаны	<u>36–37</u> 37	<u>27–70</u> 48	<u>28–64</u> 50	<u>7–30</u> 13	<u>2–12</u> 7
	Трицикланы	<u>24–25</u> 24	<u>5–38</u> 12	<u>6–29</u> 12	<u>38–74</u> 63	<u>63–84</u> 73
	Тетрацикланы	2	<u>1–4</u> 2	<u>2–5</u> 3	<u>2–4</u> 3	1
	Моретаны	4	<u>2–12</u> 5	<u>3–6</u> 4	<u>1–3</u> 2	<u>1–3</u> 1
ТЦИ <sup>2</sup>		0,5	<u>0,1–1,3</u> 0,5	<u>0,3–1,1</u> 0,6	<u>0,7–1,4</u> 0,9	<u>1,8–3,1</u> 2,5
Ts/Tm		0,5	<u>0,2–1,0 (1,2)<sup>3</sup></u> 0,5	<u>0,1–0,9</u> 0,5	<u>0,8–1,1</u> 0,9	<u>1,3–3,7</u> 2,5
Гопаны C <sub>29</sub> /C <sub>30</sub>		<u>0,6–0,7</u> 0,7	<u>0,5–1,0 (1,1)</u> 0,7	<u>0,5–0,9</u> 0,8	<u>0,7–1,1</u> 0,9	<u>1,1–12,1</u> 5,1
Гомогопаны C <sub>35</sub> /C <sub>34</sub>		<u>0,8–0,9</u> 0,8	<u>0,6–2,9</u> 1,2	<u>0,8–1,3</u> 1,0	<u>0,6–1,0</u> 0,9	<u>0,7–1,0</u> 0,9
Гаммацераи, %		0,1	<u>0,4–9,9</u> 2,4	<u>0,4–7,9</u> 4,8	<u>0,04–0,1</u> 0,1	<u>0,04–0,1</u> 0,1
GI <sup>4</sup>		0,07	<u>0,25–4,93</u> 1,38	<u>0,01–4,38</u> 2,62	–	–

Примечание. <sup>1</sup> – хлороформенные экстракты из дробленных пород с битумами. <sup>2</sup> – трициклановый индекс ( $TЦИ = 2 \times \sum C_{19-C_{20}} / \sum C_{23-C_{26}}$ ) [Конторович и др., 1999]. <sup>3</sup> – в скобках указаны аномальные значения. <sup>4</sup> – гаммацераиновый индекс ( $GI = 10 \times Ga / (Ga + C_{30})$ ) [Peters et al., 2005].

Установлено, что с ростом отношения стеранов  $C_{29}/C_{27}$  уменьшаются содержание трицикланов (Рисунок 4.4.7, А) и значения отношения  $Ts/Tm$  (см. рисунок 4.4.7, Б). Закономерное изменение отношений стерановых и терпановых УВ, вероятно, может контролироваться условиями осадконакопления и составом биосообществ в бассейне. Этот вопрос требует дальнейшей проработки.

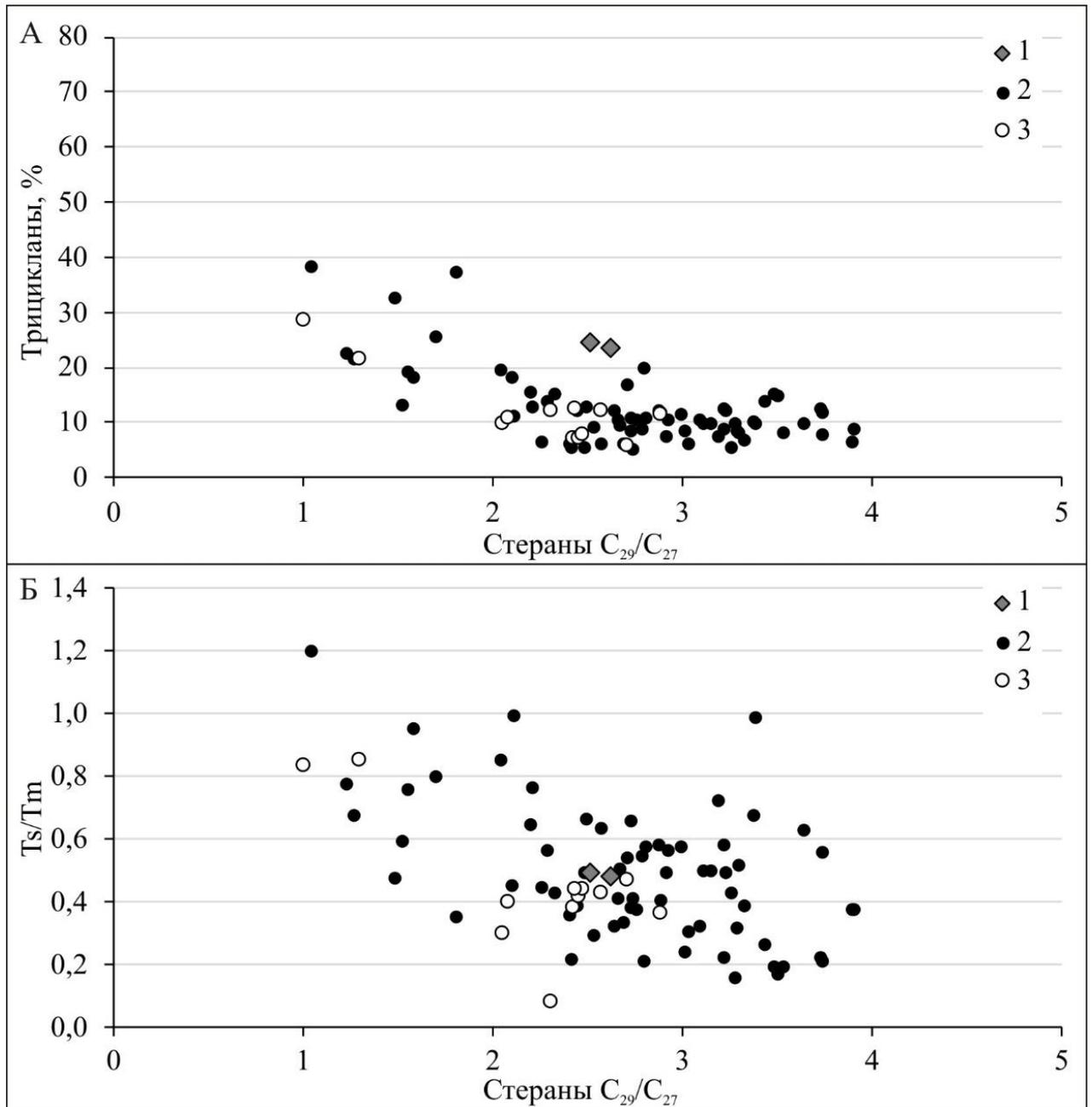


Рисунок 4.4.7 – Диаграммы зависимости содержания трицикланов (А) и значений отношения  $Ts/Tm$  (Б) от отношения стеранов  $C_{29}/C_{27}$ .  
Условные обозначения: см. на рисунке 4.4.5

По характерным масс-ионам 384, 369, 191 и 163 был идентифицирован 29,30-бисноргопан  $C_{28}$  (см. рисунок 4.4.6). Его образование связывают с карбонатным осадконакоплением [Peters et al., 2005]. Распределение гомогопанов отличается. В одних пробах наблюдается уменьшение концентраций в ряду  $C_{31} > C_{32} > C_{33} > C_{34} > C_{35}$ , в других – гомогопан  $C_{35}$  преобладает над  $C_{34}$ , реже пики гомогопана  $C_{32}$  выше пиков гомогопана  $C_{31}$ . Ранее также сообщалось о двух типах распределения гомогопанов в метано-нафтеновых фракциях битумоидов хатыспытской свиты [Парфенова и др., 2010]. Значения отношения  $C_{35}/C_{34}$  широко варьируют от 0,6 до 2,9, а  $C_{32}/C_{31}$  – от 0,6 до 1,9. С увеличением параметра  $C_{35}/C_{34}$  растут значения  $C_{32}/C_{31}$ .

Зарегистрирован гаммацеран (Ga). Его относительное содержание во всей коллекции (в % на сумму всех терпанов) значительно варьирует от 0,1% до 9,9% (см. таблицу 4.4.3, рисунок 4.4.6). Был рассчитан гаммацерановый индекс по формуле  $GI = 10 \times Ga / (Ga + C_{30})$ , где Ga – площадь пика гаммацерана на масс-хроматограмме по  $m/z$  191,  $C_{30}$  – пика гопана  $C_{30}$  [Peters et al., 2005]. Значения GI составляют 0,07–4,93 (см. таблицу 4.4.3). Распределение гомогопанов, а также относительное содержание гаммацерана во фракции терпанов не связаны с распределением стеранов и отношением стеранов  $C_{29}/C_{27}$ .

Отношение суммы стеранов и прегнанов к терпанам изменяется в широких пределах 0,09–0,46, в среднем составляя 0,23. Эти данные согласуются с прежними результатами исследований углеводородов рассеянного ОВ вендских отложений Сибирской платформы – терпановые структуры доминируют над стерановыми [Соболев и др., 2013; Баженова и др., 2014; Дахнова и др., 2014; Филипцов и др., 2014; Иванова, 2016]. Важно отметить, что в черных сланцах, аномально обогащенных ОВ ( $C_{org} = 10\%$ ), значения этого отношения низкие, на уровне 0,13–0,14 (подробнее об этом главе 5).

Среди терпанов биodeградированных битумоидов хатыспытской свиты на масс-хроматограммах по  $m/z$  177 были идентифицированы 25-норгопаны, в большинстве проб – 25-трицикланы, -тетрацикланы (Рисунок 4.4.8). В целом, для биodeградированных битумоидов наблюдаются те же средние содержания

гопанов, гомогопанов (81%), трицикланов (12%), тетрацикланов (3%) и моретанов (4%), что и для преимущественно автохтонных битумоидов (см. таблицу 4.4.3). Также подобны и распределения отдельных гомологов трицикланов (доминируют  $C_{21}$ ,  $C_{23}$ - $C_{24}$ , ТЦИ < 1), гопанов ( $T_s/T_m = 0,1$ - $0,9$ , в среднем –  $0,5$ ;  $C_{29}/C_{30} = 0,5$ - $0,9$ ; идентифицирован 29,30-бисноргопан  $C_{28}$  (см. рисунок 4.4.8)) и гомогопанов ( $C_{35}/C_{34} = 0,9$ - $1,3$ ;  $C_{32}/C_{31} = 0,6$ - $1,3$ ). Содержание гаммацераана изменяется от 0,02 до 7,9% (см. таблицу 4.4.3).

Образование деметилированных терпанов (25-нор-) связывают с бактериальным окислением углеводородов битумоидов на контакте с водой [Петров, 1984; Peters et al., 2005]. Ранее на Сибирской платформе деметилированные терпаны были идентифицированы в битумах востока платформы в отложениях венда, нижнего и среднего кембрия [Каширцев, 1988; 2003; Парфенова и др., 2014, 2022; Каширцев и др., 2019].

При сопоставлении содержания гаммацераана с отношениями гомогопанов  $C_{35}/C_{34}$  и изопреноидов Pr/Ph двух групп битумоидов хатыспытской свиты видно, что относительное содержание гаммацераана при тех же значениях  $C_{35}/C_{34}$  и Pr/Ph, как правило, выше в биodeградированных битумоидах (см. таблицу 4.4.3). Известно, что гаммацераан, в отличие от гопанов, три- и тетрацикланов, устойчив к процессам бактериального окисления [Peters et al., 2005]. Таким образом, повышенные концентрации гаммацераана в биodeградированных битумоидах хатыспытской свиты могут быть связаны не с обстановками осадконакопления, а с последовательным окислением терпанов в процессе бактериальной деградации битумоидов.

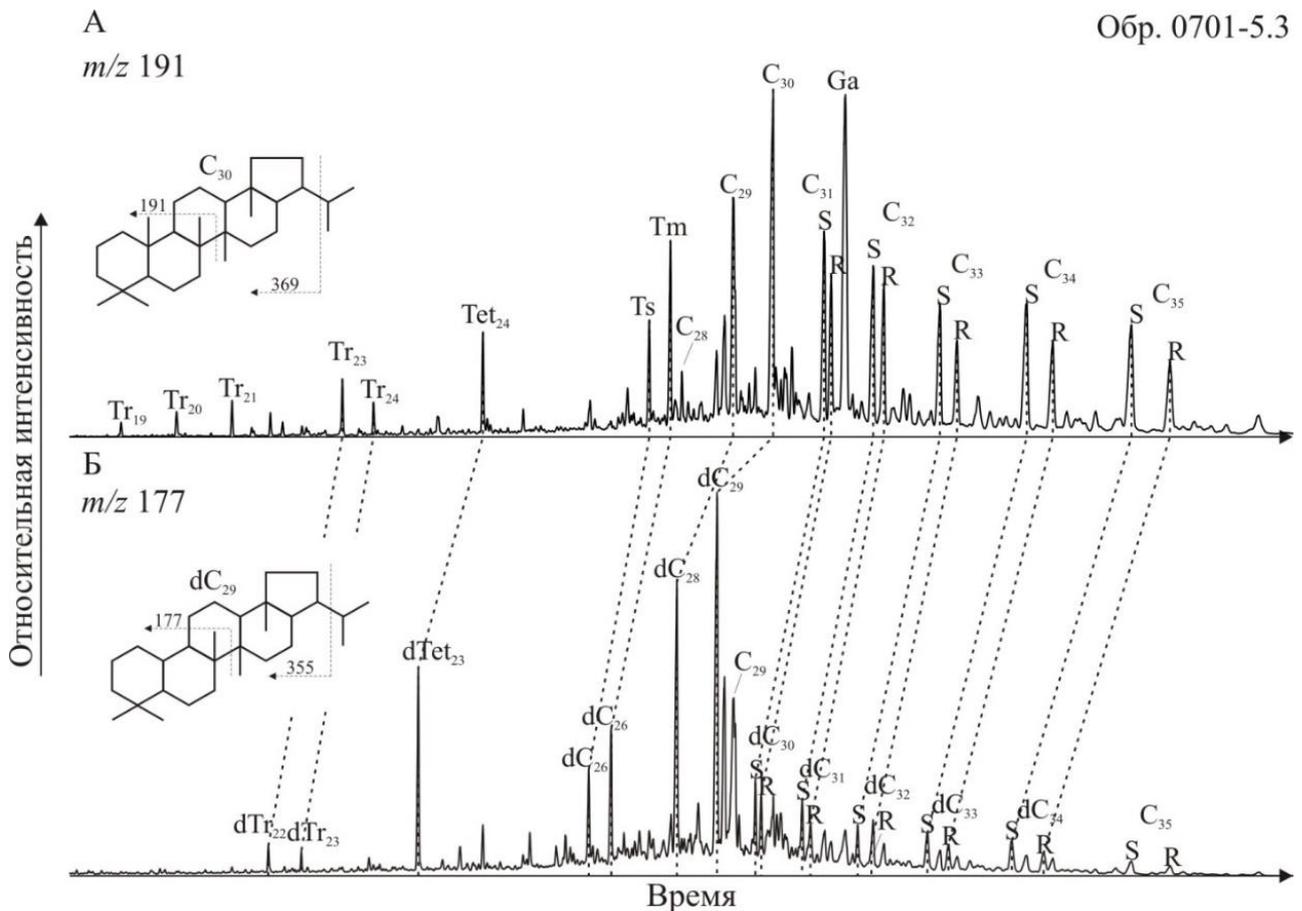


Рисунок 4.4.8 – Масс-хроматограммы по  $m/z$  191 (А) и 177 (Б) метано-нафтеновой фракции биодградированного битумоида хатыспытской свиты.

Условные обозначения:  $Tr_i$  – трицикланы;  $Tet_{24}$  – тетрациклан;  $Ts$  – триснорнеогопан;  $Tm$  – трисноргопан;  $C_i$  – гопаны и гомогопаны;  $C_{28-29,30}$  – бисноргопан;  $Ga$  – гаммацеран;  $dTr_i$ ,  $dTet_i$ ,  $dC_i$  – деметилированные трицикланы, тетрацикланы, гопаны и гомогопаны

**Хараяутэхская свита.** На газожидкостных хроматограммах метано-нафтеновых фракций битумоидов средней подсвиты хараяутэхской свиты максимум распределения нормальных алканов, как правило, приходится на область  $n-C_{17}-C_{19}$  (Рисунок 4.4.9). Высокомолекулярные нормальные алканы обычно присутствуют в очень низких концентрациях, часто наблюдаются «нафтеновые горбы» в области  $n-C_{16}-C_{25}$  (см. рисунок 4.4.9). Значения отношения  $n-C_{27}/n-C_{17}$  составляют 0,07–0,49 (в среднем – 0,21). Значения коэффициента  $СРІ$ , как правило, на уровне 1. Значения отношения  $Pr/Ph$  изменяются от 0,6 до 1,6, в среднем составляя 1,0. Отношения  $Pr/n-C_{17}$  и  $Ph/n-C_{18}$  равны 0,2–1,0, в среднем оба составляя 0,4. В целом, по сравнению с хатыспытской свитой наблюдается повышенное содержание изопреноидных алканов – отношение  $\Sigma n-C_i/\Sigma iso-C_i$  понижено и составляет 3–8 (см. таблицу 4.4.1). В серии проб в следовых

количествах зафиксированы 12- и 13-монометилалканы (см. рисунок 4.4.9) [Мельник, Парфенова, 2021; Parfenova, Melnik, 2021].

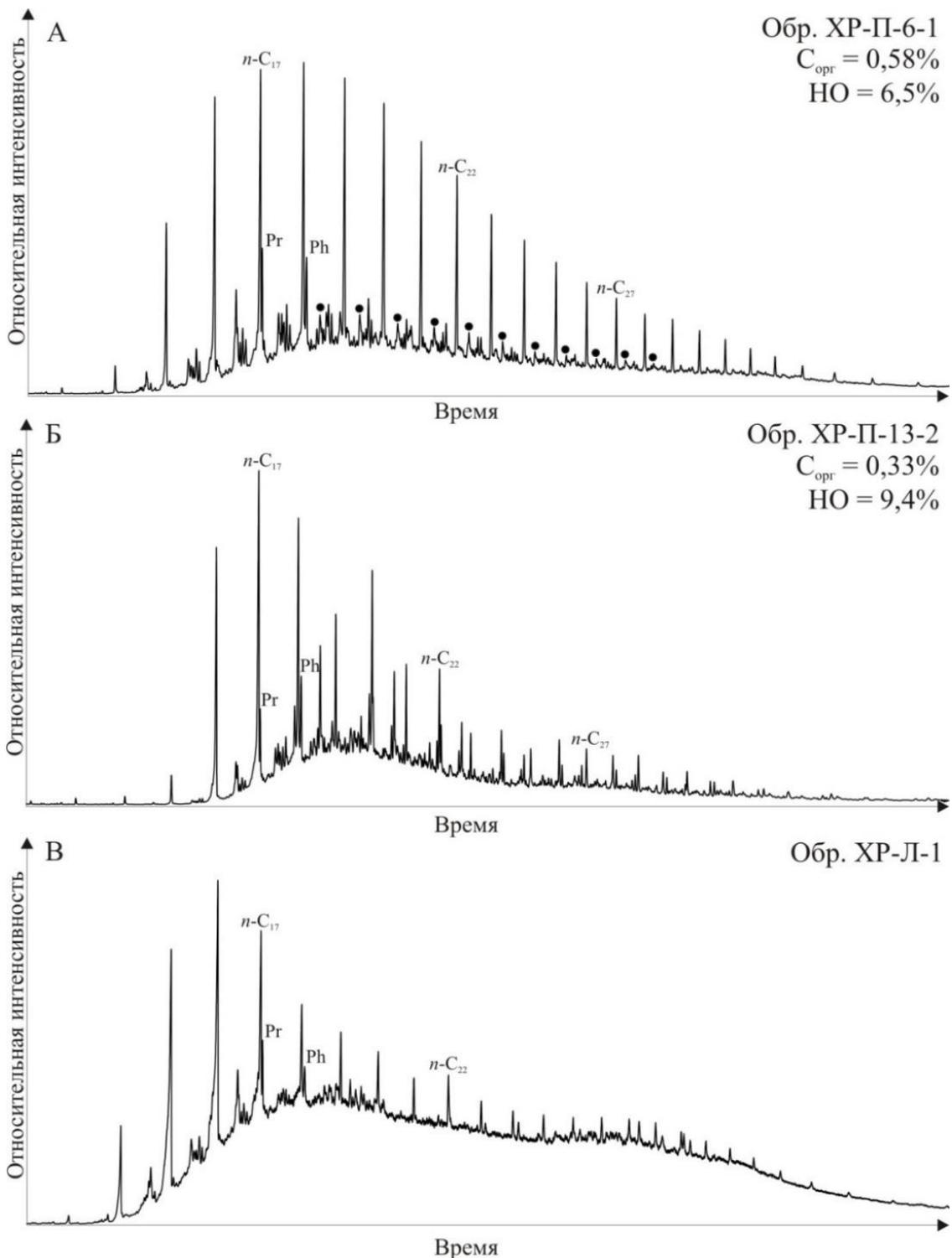


Рисунок 4.4.9 – Газожидкостные хроматограммы метано-нафтеновых фракций остаточных битумоидов средней подсвиты хараютэхской свиты (А, Б) и хлороформенного экстракта из породы с битумом верхней подсвиты хараютэхской свиты.

Условные обозначения: Pr – пристан; Ph – фитан;  $n-C_i$  – нормальные алканы; черные кружки – 12- и 13-монометилалканы

В пробах с высоким содержанием насыщенных УВ в групповом составе битумоидов как в обедненных, так и в обогащенных ОВ пород (всего 9 образцов), на масс-хроматограммах элюируются аномально низкие пики стерановых и терпановых УВ, иногда на уровне шума (Рисунок 4.4.10, А). В таких случаях расчет относительных содержаний индивидуальных соединений не проводился.

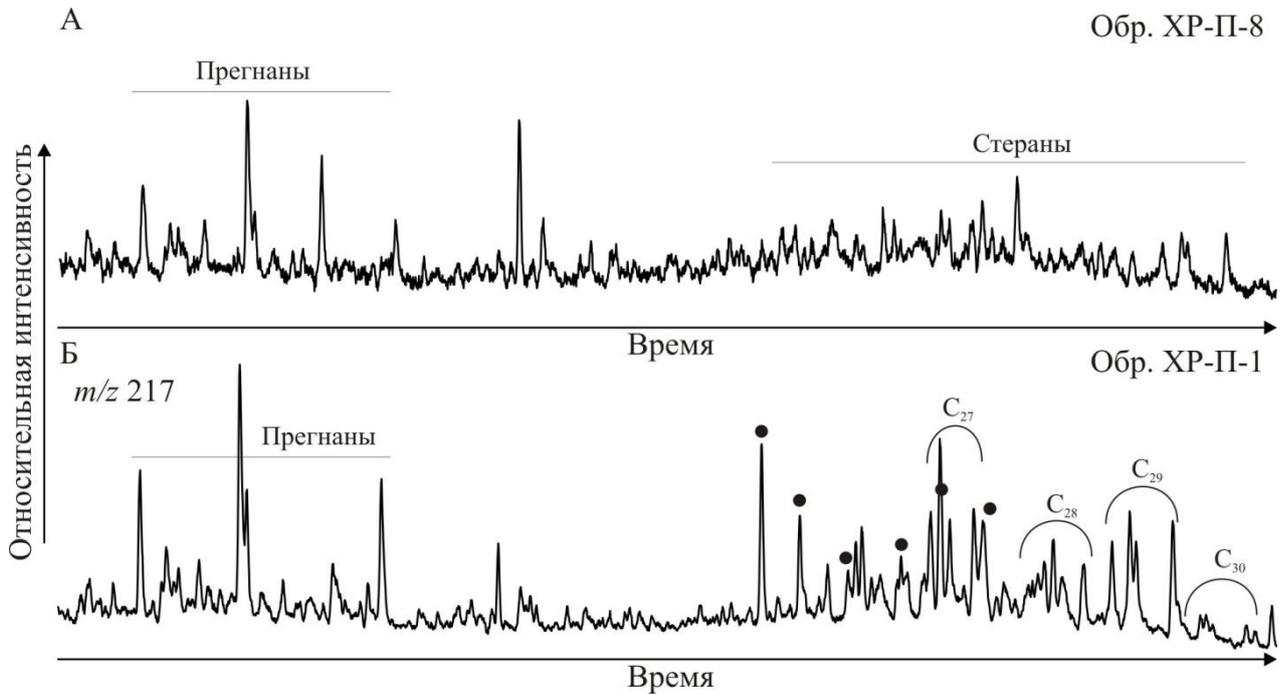


Рисунок 4.4.10 – Масс-хроматограммы по  $m/z$  217 метано-нафтеновых фракций битумоидов средней подсвиты хараютэхской свиты.

Условные обозначения:  $C_{27}$ – $C_{30}$  – регулярные стераны; черные кружки – диастераны

На масс-хроматограммах по  $m/z$  217 идентифицируются стераны  $C_{27}$ – $C_{30}$  и прегнаны  $C_{21}$ – $C_{22}$  (см. рисунок 4.4.10, Б). Относительное содержание  $C_{27}$  в среднем составляет 36%,  $C_{28}$  – 28%,  $C_{29}$  – 33%,  $C_{30}$  – 3% (см. таблицу 4.4.2, рисунок 4.4.4). В отличие от хатыспытской свиты, наблюдаются: близкие концентрации холестана и этилхолестана ( $C_{29}/C_{27} = 0,7$ – $1,4$ ) (см. рисунок 4.4.3, рисунок 4.4.4); повышенные концентрации диастеранов (в среднем  $\Sigma C_{27}$ – $C_{30} \beta\alpha/(\alpha\alpha+\beta\beta) = 0,6$ ); повышенные относительные содержания прегнанов (в среднем  $\Sigma C_{27}$ – $C_{30}/\Sigma C_{21}$ – $C_{22} = 1,5$ ) (см. рисунок 4.4.5). Отношения изомеров  $C_{29} 20S/(20S+20R)$  и  $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$  в среднем равны 0,4 и 0,3 соответственно (см. таблицу 4.4.2) [Мельник, Парфенова, 2021]. Известно, что с увеличением катагенеза ОВ

в группе стерановых УВ возрастают относительные концентрации прегнанов, диастеранов [Петров, 1984; Peters et al., 2005].

На масс-хроматограммах по  $m/z$  191 фиксируются терпановые УВ. По содержанию их гомологов ОВ средней подсвиты хараютэжской свиты отличается от ОВ хатыспытской (Рисунок 4.4.11). В среднем содержание гопанов составляет 20%, гомогопанов – 13%, моретанов – 2%, трицикланов – 62%, тетрацикланов – 3% (см. таблицу 4.4.3).

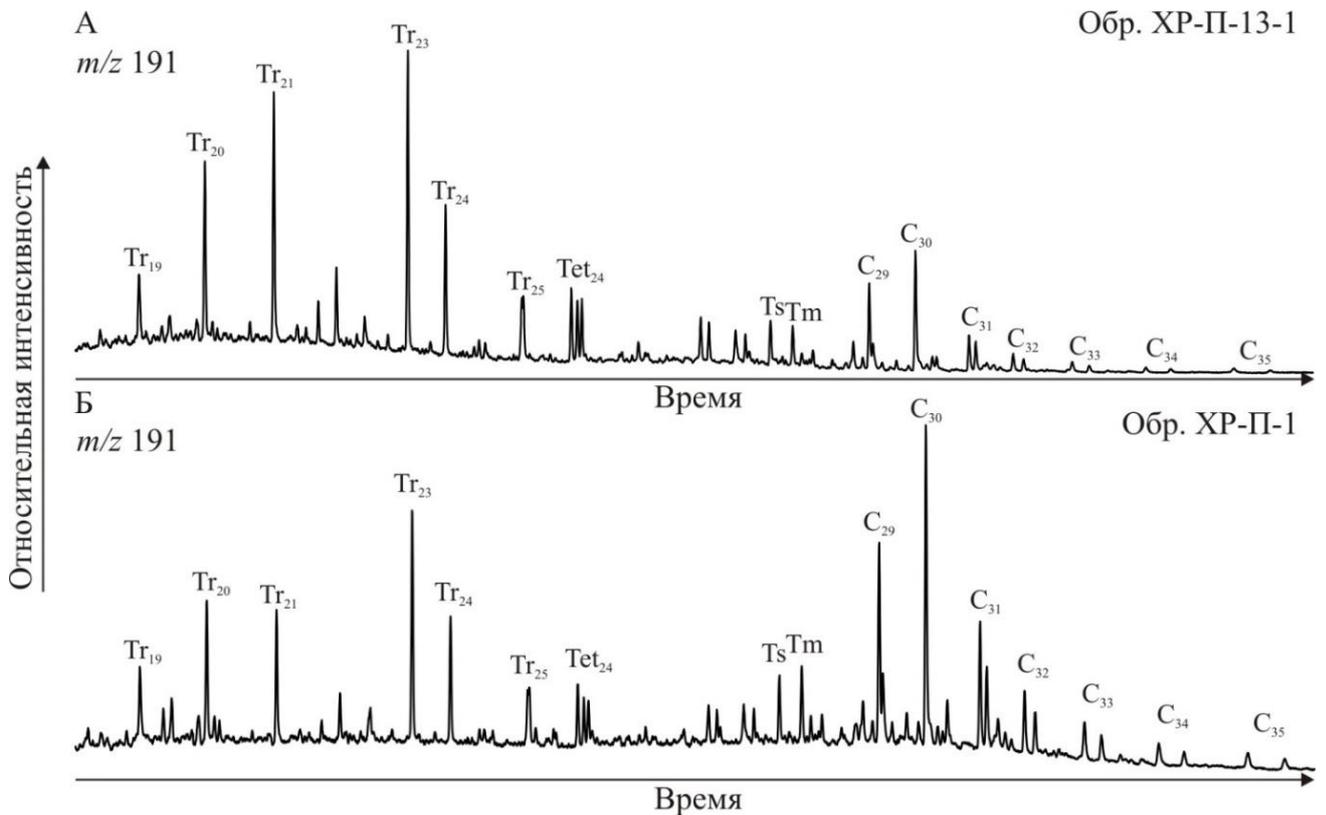


Рисунок 4.4.11 – Масс-хроматограммы по  $m/z$  191 метано-нафтеновых фракций битумоидов средней подсвиты хараютэжской свиты.

Условные обозначения:  $Tr_i$  – трицикланы;  $Tet_{24}$  – тетрациклан;  $Ts$  – триснорнеогопан;  $Tm$  – трисноргопан;  $C_i$  – гопаны и гомогопаны;  $C_{28}$  – 29,30-бисноргопан;  $Ga$  – гаммацеран

Вероятнее всего, высокие концентрации трицикланов и пониженные – гопанов и гомогопанов, моретанов, а в ряде проб – отсутствие полициклических УВ-биомаркеров на хроматограммах – связаны с высоким катагенезом ОВ средней подсвиты хараютэжской свиты. Известно, что конфигурация моретанов ( $\beta\alpha$ ) менее термодинамически устойчива, чем конфигурация «нефтяных» гопанов ( $\alpha\beta$ ), гопаны

и гомогопаны менее устойчивы к разрушению, чем трицикланы [Петров, 1984; Peters et al., 2005].

Отношение гопанов  $C_{29}/C_{30} - 0,65-1,10$ , гомогопанов  $C_{35}/C_{34} - 0,82-1,02$ , гомогопанов  $C_{32}/C_{31} - 0,5-0,7$ . Отношение  $Ts/Tm$  равно  $0,8-1,1$ . Среди трицикланов доминируют гомологи  $C_{20}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{24}$ , значения ТЦИ повышены и составляют  $0,7-1,4$ . Гаммацеран среди терпанов присутствует в незначительных концентрациях ( $0,1\%$  на сумму терпанов) (см. таблицу 4.4.3). На масс-хроматограммах по  $m/z$  177 в шести пробах зафиксированы деметилированные 25-норгопаны, в трех пробах – 25-нортрицикланы и 25-нортетрациклан  $C_{23}$  [Мельник, Парфенова, 2021; Parfenova, Melnik, 2021].

Насыщенные углеводороды хлороформенных экстрактов битумов верхней подсвиты хараютэхской свиты также изучались методами ГЖХ и ХМС. На всех газожидкостных хроматограммах наблюдаются высокие «нафтеносные горбы» [Петров, 1984]. Максимум распределения нормальных алканов приходится на  $n-C_{16}-C_{18}$  (см. рисунок 4.4.10, В). Значения отношений  $Pr/Ph$  повышены и составляют  $1,2-2,1$ . Значения индекса  $СPI$  на уровне  $1,0-1,2$ . Зарегистрированы стерановые УВ. Отношение гомологов  $C_{27} : C_{28} : C_{29}$  в среднем равно  $32\% : 24\% : 44\%$  (см. рисунок 4.4.4). Среди терпанов идентифицированы гопаны, тетрациклан  $C_{24}$  и трицикланы. Отношение гопанов  $C_{29}/C_{30}$  составляет  $1,1-12,1$ ,  $Ts/Tm - 1,26-1,35$ . Относительные концентрации гаммацерана составляют  $0,1\%$  на сумму терпанов. Во всех образцах по  $m/z$  177 зафиксированы деметилированные 25-норгопаны, три- и тетрацикланы [Мельник, 2021].

По составу стеранов и содержанию гаммацерана битумы верхней подсвиты хараютэхской свиты Хараулахского выступа отличаются от битумов Восточно-Анабарского и Центрально-Оленекского полей [Каширцев, 1988, 2003, 2004].

#### 4.5 Состав нафтено-ароматических фракций битумоидов

*Хатыспытская свита.* Установлено, что для нафтено-ароматических фракций битумоидов черных сланцев хатыспытской свиты характерно высокое содержание фенантрена и метилфенантронов (Ф) –  $71-73\%$ . Содержание

дибензотиофенов (ДБТ) – 16–19%, моноароматических стероидов (МАС) – <1%, триароматических стероидов (ТАС) – 9%. Отношение фенантронов к дибензотиофенам составляет 4–5, триароматических стероидов к моноароматическим стероидам – 13 (Таблица 4.5.1; Рисунок 4.5.1).

В автохтонных и параавтохтонных битумоидах карбонатных и карбонатно-кремнистых пород относительные содержания  $\Phi$  изменяются от 1 до 73% (в среднем равны 33%), ДБТ – от 0,2 до 41% (в среднем – 8%). Содержание МАС не высокое, в пределах 0,3–22% (в среднем – 9%), ТАС – значительно варьирует от 2 до 89%, в среднем составляя 50% (Рисунок 4.5.2). Отношения  $\Phi$ /ДБТ и ТАС/МАС широко изменяются в интервалах 1–52 и 2–29 соответственно (см. таблицу 4.5.1).

В параавтохтонных биодеградированных битумоидах, в целом, картина повторяется. Содержание  $\Phi$  составляет 3–42% (в среднем – 25%), ДБТ – 1–18% (в среднем 7%), МАС – 4–35% (в среднем – 12%, в двух образцах МАС не зарегистрированы), ТАС – 46–80% (в среднем 58%). Отношения  $\Phi$ /ДБТ изменяется от 1 до 10, ТАС/МАС – от 2 до 29 (см. таблицу 4.5.1, рисунки 4.5.1, 4.5.2, 4.5.3).

На тригонограмме состава нафтено-ароматических фракций видно, что для хатыспытской свиты основными компонентами являются триароматические стероиды и фенантроны (см. рисунок 4.5.3). Различный состав нафтено-ароматических фракций характерен как для автохтонных, так и для параавтохтонных и параавтохтонных биодеградированных битумоидов (см. рисунок 4.5.3). При этом относительные концентрации  $\Phi$ , ТАС и МАС не зависят от литологии пород, обогащенности пород  $S_{орг}$ ,  $S_{общ}$ , величин  $b_{хл}$  и  $\beta$ .

По преобладанию триароматических стероидов над моноароматическими, высокому содержанию дибензотиофенов ОВ хатыспытской свиты подобно аквагенному ОВ баженовской свиты Западной Сибири [Конторович и др., 2004] и куонамской свиты кембрия Сибирской платформы [Конторович и др., 2005].

Таблица 4.5.1 – Распределение и отношения ароматических углеводородов и дибензотиофенов битумоидов вендских отложений северо-востока Сибирской платформы

Свита		Хатыспытская			Хараютэхская (средняя подсвита)
Литология		Известковые аргиллиты (черные сланцы)	Карбонатные и глинисто-карбонатно- кремнистые породы		Карбонатные и карбонатно- кремнистые породы
Битумоиды		Автохтонные	Преимущественно автохтонные	Параавтохтонные биodeградированные	Остаточные
На 100%	Ф, %	$\frac{71-74}{73}$	$\frac{1-74}{33}$	$\frac{3-42}{25}$	$\frac{75-98}{87}$
	ДБТ, %	$\frac{16-19}{18}$	$\frac{0,2-41}{9}$	$\frac{1-18}{7}$	$\frac{2-24}{11}$
	МАС, %	0,7	$\frac{0,4-22}{9}$	$\frac{4-35}{12}$	$\frac{0,2-4^1}{2}$
	ТАС, %	9	$\frac{2-87}{50}$	$\frac{46-80}{58}$	$\frac{0,5-7^2}{2}$
Ф/ДБТ		$\frac{4-5}{4}$	$\frac{1-52}{7}$	$\frac{1-10}{5}$	$\frac{3-58}{16}$
ТАС/МАС		13	$\frac{2-29}{7}$	$\frac{2-15}{7}$	$\frac{0,7-2^1}{2}$
ДБТИ		0,5	$\frac{0,5-23}{3}$	$\frac{0,8-3}{2}$	$\frac{1-9}{3}$
4-МДБТ/1-МДБТ		$\frac{0,9-1,4}{1,2}$	$\frac{0,8-5}{1,9}$	$\frac{0,7-2}{1,6}$	$\frac{6,7-57,4 (131)^3}{33}$
4-МДБТ/ДБТ		1	$\frac{1-13 (28-68)^3}{4}$	$\frac{2-5}{3}$	$\frac{3-18 (43)^3}{10}$
ТАСИ		$\frac{0,44-0,45}{0,44}$	$\frac{0,06-0,64}{0,21}$	$\frac{0,08-0,24}{0,15}$	$\frac{0,34-0,76^2}{0,5}$

Примечание. <sup>1</sup> – для 7 образцов. <sup>2</sup> – для 10 образцов. <sup>3</sup> – в скобках указаны аномальные значения.

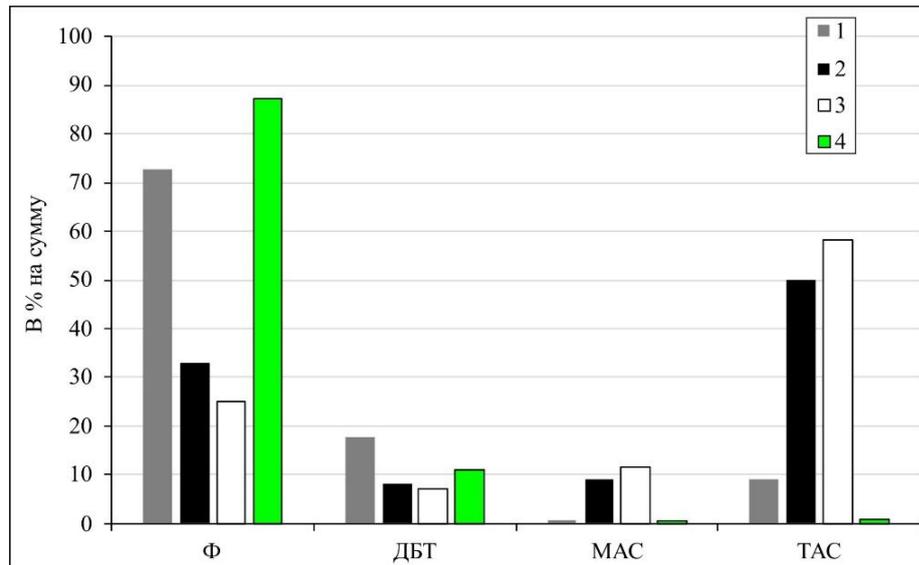


Рисунок 4.5.1 – Гистограмма средних содержаний ароматических соединений битумоидов вендских отложений северо-востока Сибирской платформы.

Условные обозначения: Ф – фенантрен и метилфенантрены; ДБТ – дибензотиофен и метилдибензотиофены; МАС – моноароматические стероиды; ТАС – триароматические стероиды. Битумоиды пород хатыспытской свиты: 1 – черных сланцев; 2 – карбонатных и глинисто-карбонатно-кремнистых с преимущественно автохтонным битумоидом; 3 – карбонатных и карбонатно-кремнистых с биodeградированным битумоидом; 4 – битумоиды пород средней подсвиты хараютэхской свиты

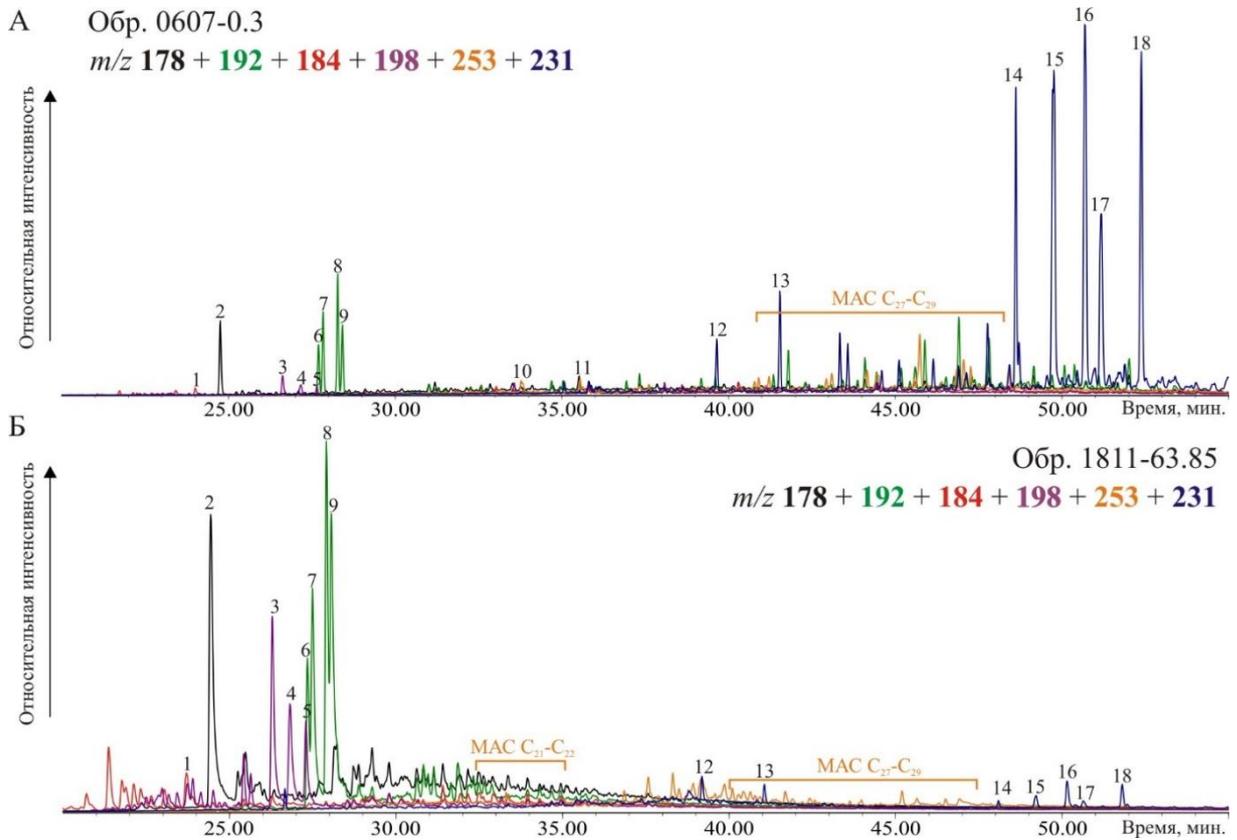


Рисунок 4.5.2 – Масс-хроматограммы нафтено-ароматических фракций битумоидов хатыспытской свиты с преобладанием ТАС (А) и с преобладанием Ф и ДБТ (Б).

Условные обозначения: 1 – ДБТ; 2 – Ф; 3 – 4-МДБТ; 4 – 2- и 3-МДБТ; 5 – 1-МДБТ; 6 – 3-МФ; 7 – 2-МФ; 8 – 9-МФ; 9 – 1-МФ; 10 – МАС C<sub>21</sub>; 11 – МАС C<sub>22</sub>; 12 – ТАС C<sub>20</sub>; 13 – ТАС C<sub>21</sub>; 14 – ТАС C<sub>26</sub>S; 15 – ТАС C<sub>26</sub>R и C<sub>27</sub>S; 16 – C<sub>27</sub>R; 17 – C<sub>28</sub>S; 18 – C<sub>28</sub>R

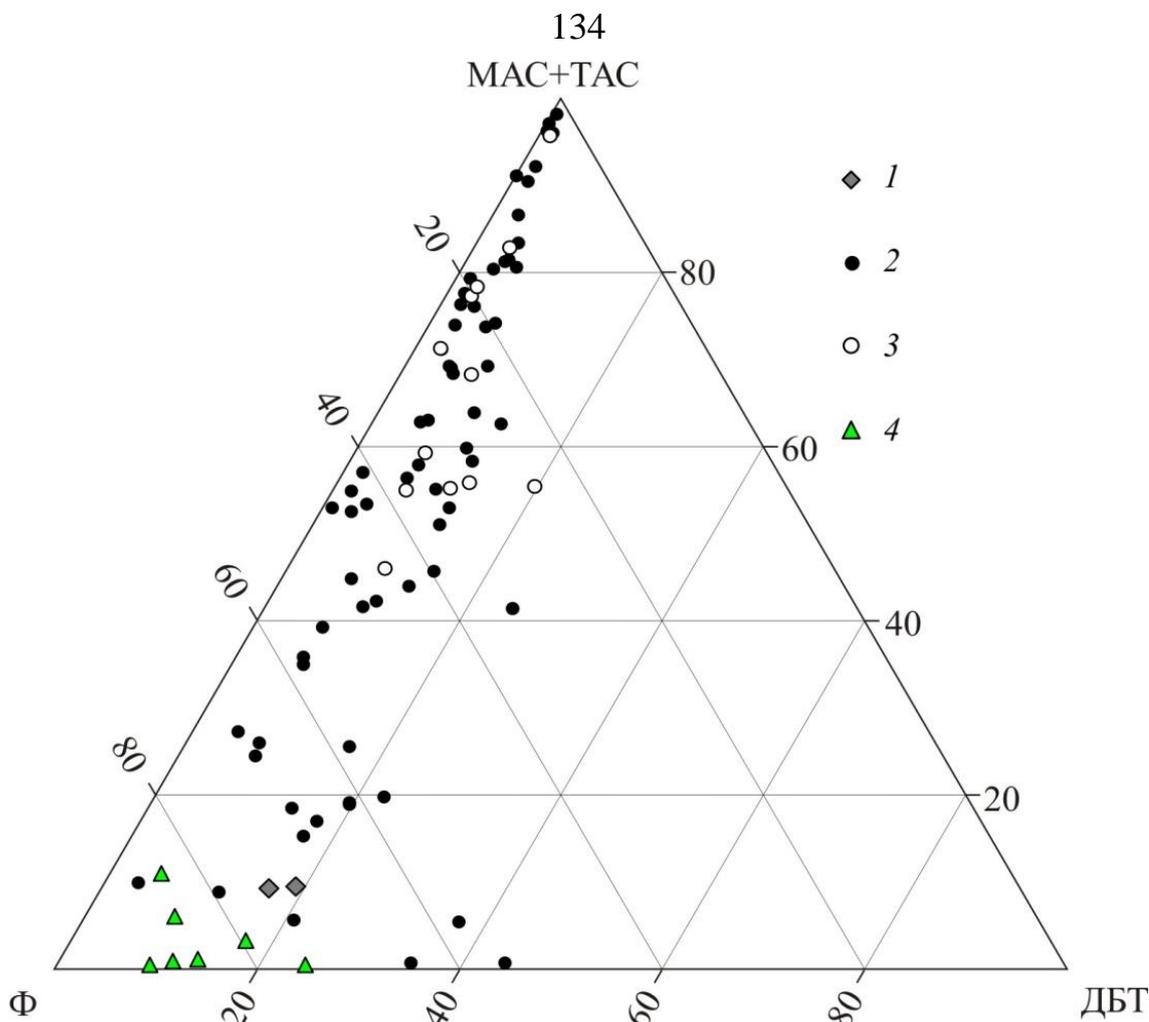


Рисунок 4.5.3 – Тригонограмма состава нафтно-ароматических фракций битумоидов вендских отложений северо-востока Сибирской платформы.  
Условные обозначения см. на рисунке 4.5.1

Ранее А.Э. Конторовичем с коллегами было выделено два типа распределения ароматических компонентов в ОВ юрских и меловых отложений. Первый, фиксируемый для большинства проб баженовской свиты (карбонатно-кремнисто-глинистые породы с высоким содержанием  $C_{орг}$  (обычно 9–10%)), характеризуется повышенным содержанием Ф (47%), ДБТ (24%), ТАС (22%), пониженным – МАС (7%). Второй фиксируется в трех «аномальных» образцах баженовской свиты, а также в образцах васюганской, тюменской, салатской свит, содержащих террагенное ОВ. Он характеризуется резким преобладанием Ф (93%), пониженным содержанием ДБТ (4%), низкими относительными концентрациями МАС и ТАС (1 и 2% соответственно) [Конторович и др., 2004]. Эту разницу в составе нафтно-ароматических фракций авторы связывали с природой ОВ – доминирование фенантронов, низкие концентрации ДБТ и стероидов

характерны для ОВ со значительным вкладом остатков высшей наземной растительности (III тип) [Конторович и др., 2004]. Позже, при анализе нафто-ароматических фракций битумоидов куонамской свиты было показано, что относительные концентрации Ф и ТАС в аквагенном ОВ варьируют [Конторович и др., 2005].

Новое исследование докембрийского ОВ хатыспытской свиты с привлечением представительной коллекции показало, что концентрации Ф, ДБТ, МАС и ТАС могут значительно меняться в аквагенном ОВ без привноса террагенного. При этом отношение ТАС/МАС всегда  $>1$  (см. таблицу 4.5.1, рисунки 4.5.1, 4.5.2, 4.5.3).

Анализ изменения содержаний ароматических соединений по разрезу показал, что в его нижней части (первая, вторая подсвиты и основание третьей подсвиты) повышено содержание ДБТ (часто  $>10\%$ , до  $37\%$ ). В верхней части разреза концентрации ДБТ редко превышают  $10\%$  (Рисунок 4.5.4). Заметных изменений содержаний Ф, МАС и ТАС снизу-вверх по разрезу не наблюдается.

Сопоставление данных по содержанию ДБТ с содержанием  $S_{орг}$  и  $S_{общ}$  в породах показало, что прямая корреляция отсутствует. Однако, по распределению в разрезе видно, что повышенные концентрации  $S_{общ}$  в породах и ДБТ в нафто-ароматических фракциях фиксируются в нижней части разреза хатыспытской свиты (см. рисунок 4.5.4). Распределение фигуративных точек на диаграмме ДБТ–НО показывает, что высоким содержанием ДБТ ( $>10\%$ ) характеризуется ОВ, как правило, пород преимущественно карбонатного состава (НО  $<20\%$ ), а также черных сланцев (Рисунок 4.5.5).

Детально проанализирован состав и распределение отдельных гомологов ароматических соединений. Изучено распределение 1-, 2-, 3-, 9-метилфенантронов (МФ). Как правило, концентрации метилфенантронов уменьшаются в ряду 9-МФ $>$ 1-МФ $>$ 2-МФ $>$ 3-МФ. Значения метилфенантронового индекса ( $MPI-1 = 1,5 \times (2-МФ + 3-МФ) / (Ф + 1-МФ + 9-МФ)$ ) по [Radke et al., 1982] составляют 0,28–0,79 (в среднем – 0,53). Рассчитанные значения отражательной способности витринита ( $R_0 = 0,60 \times MPI-1 + 0,40$  [Radke, Welte, 1983]) – 0,6–0,9% (Таблица 4.5.2).

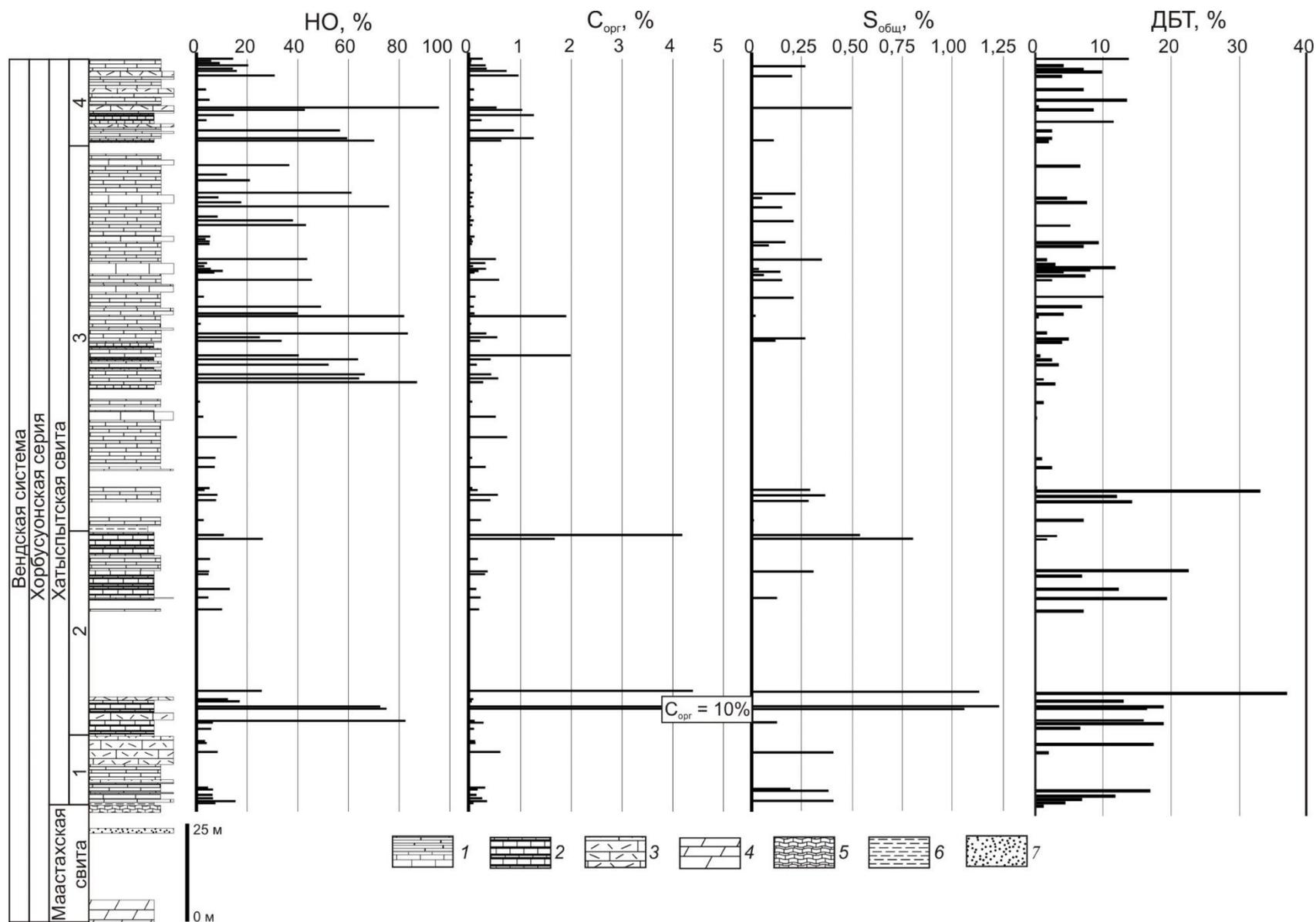


Рисунок 4.5.4 – Изменение содержаний NO,  $C_{\text{орг}}$ ,  $S_{\text{общ}}$  в породах и ДБТ во фракциях битумоидов по разрезу хатыспытской свиты. Условные обозначения: 1 – известняки; 2 – переслаивание известняков и аргиллитов; 3 – известняки обломочные; 4 – доломиты; 5 – доломиты микробиалитовые; 6 – аргиллиты; 7 – песчаники

Таблица 4.5.2 – Фенантроновые показатели зрелости органического вещества вендских отложений северо-востока Сибирской платформы

Свита	Хатыспытская		Хараютэхская (средняя подсвита)
Литология	Известковые аргиллиты (черные сланцы)	Карбонатные и глинисто-карбонатно- кремнистые породы	
Битумоиды	Автохтонные	Преимущественно автохтонные	Параавтохтонные биodeградированные
МФИ по [Петров, 1984]	0,60	$\frac{0,23-0,82}{0,57}$	$\frac{0,24-0,79}{0,64}$
ФИ по [Конторович и др., 2004]	$\frac{0,42-0,43}{0,42}$	$\frac{0,25-8,99}{1,00}$	$\frac{0,21-0,70}{0,50}$
MPI-1 по [Radke et al., 1982]	0,47	$\frac{0,28-0,79}{0,55}$	$\frac{0,21-0,69}{0,53}$
MPI-1 mod. по [Cassani et al., 1988]	0,52	$\frac{0,29-0,85}{0,59}$	$\frac{0,23-0,75}{0,58}$
PP-1 по [Alexander et al., 1986]	$\frac{0,71-0,73}{0,72}$	$\frac{0,45-2,70}{0,90}$	$\frac{0,53-2,02}{0,74}$
R <sub>o</sub> , % по [Radke, Welte, 1983]	0,68	$\frac{0,57-0,87}{0,73}$	$\frac{0,53-0,81}{0,72}$

*Примечание.* МФИ =  $(2-M\Phi+3-M\Phi)/(1-M\Phi+9-M\Phi)$ . ФИ =  $2-M\Phi/\Phi$ . MPI-1 =  $1,5 \times (2-M\Phi+3-M\Phi)/(\Phi+1-M\Phi+9-M\Phi)$ .  
 MPI-1 mod. =  $1,89 \times (2-M\Phi+3-M\Phi)/(\Phi+1,26 \times (1-M\Phi+9-M\Phi))$ . PP-1 =  $1-M\Phi/(2-M\Phi+3-M\Phi)$ . R<sub>o</sub> =  $0,6 \times MPI-1 + 0,4$  при R<sub>o</sub> = 0,65–1,35%;  
 R<sub>o</sub> =  $-0,6 \times MPI-1 + 2,3$  при R<sub>o</sub> = 1,35–2% [Radke, Welte, 1983]

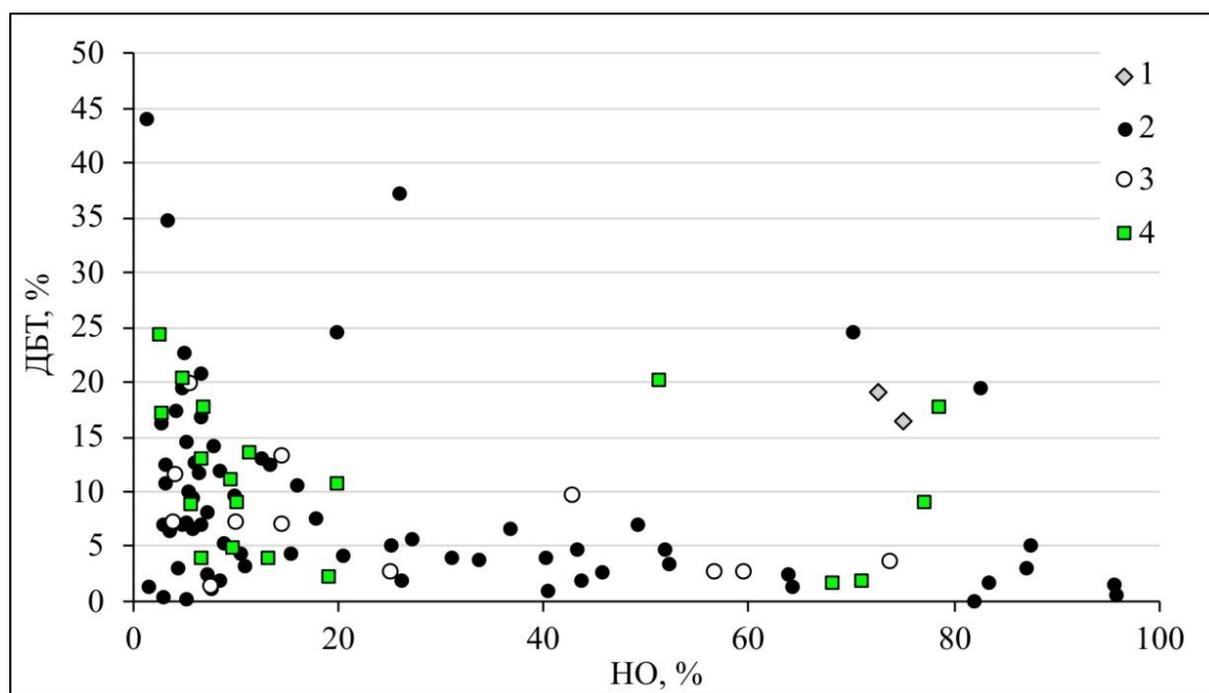


Рисунок 4.5.5 – Диаграмма содержания ДБТ в нефтено-ароматических фракциях и НО в породах.

Условные обозначения: см. на рисунке 4.5.1

Значения дибензотиофенового индекса (2+3-МДБТ/ДБТ) составляют 0,5 в черных сланцах и 0,5–8,1 в карбонатных и карбонатно-кремнистых породах. Отношение 4-метилдибензотиофена к 1-метилдибензотиофену лежит в пределах 0,8–2,4 (и в среднем равно 1,5) (см. таблицу 4.5.1) [Мельник, 2020; Melnik, Parfenova, 2021]. Распределение и отношения фенантроновых УВ и дибензотиофенов, расчетные значения  $R_o$  свидетельствуют о катагенезе ОВ хатыспытской свиты, соответствующем началу главной зоны нефтеобразования [Radke, Welte, 1983, Петров, 1984; Конторович и др., 2004]. Значения MPI-1 на уровне 0,3–0,7 и  $R_o$  на уровне 0,4–0,7% были получены ранее [Duda et al., 2016, 2020].

Ранее проводилось исследование фенантроновых УВ в битумоидах ОВ из отложений палеозоя и мезозоя и в нефтях на Сибирской платформе [Каширцев и др., 2018]. В битумоидах хатыспытской свиты были изучены фенантрен, метил-, диметил- и триметилфенантроны, а также, ретен, хризен, 1,1,7,8-тетраметил-1,2,3,4-тетрагидрофенантрен (ТМТГР) и другие. Авторами было показано, что ОВ хатыспытской свиты характеризуется максимальными концентрациями

1,7,8-триметилфенантрена в трехкомпонентной системе (ретен, 1,7,8-триметилфенантрен, TMTGP). Это отличает его от ОБ позднепермских отложений Виллойской синеклизы и позднеюрских отложений Лено-Анабарского прогиба, в котором фиксируются повышенные содержания ретена и TMTGP. Авторы предложили использовать распределение фенантrenoвых УВ как диагностический признак нефтидов, генерированных ОБ разной фациальной и возрастной принадлежности [Каширцев и др., 2018].

Настоящее исследование подтвердило наличие ретена (биомаркера, характерного для ОБ, связанного с высшей наземной растительностью [Peters et al., 2005; Каширцев и др., 2018]) в ОБ хатыспытской свиты в некоторых образцах. В ряде проб пик ретена по  $m/z$  219 и 234 превышает пики фенатрена ( $m/z$  178) и метилфенантrenoв ( $m/z$  192) (Рисунок 4.5.6).

Значения ТАС-индекса ( $\text{ТАС } C_{20}-C_{21}/(C_{20}-C_{21}+C_{26}-C_{28})$ ) составляют 0,06–0,53. С увеличением значений ТАС-индекса растет содержание ДБТ ( $R = +0,76$ ) (Рисунок 4.5.7), величины отношения прегнанов к сумме стеранов и прегнанов ( $R = +0,65$ ). Отношения гомологов ТАС, МАС и насыщенных стеранов связаны. С увеличением значений ТАС  $C_{28}/C_{26}$  и МАС  $C_{29}/C_{27}$  растут значения отношения стеранов  $C_{29}/C_{27}$  ( $R = +0,59$  и  $+0,64$  соответственно, Рисунок 4.5.8). Вероятно, распределение ТАС и МАС контролируется распределением насыщенных стеранов битумоидов хатыспытской свиты [Мельник, 2020; Melnik, Parfenova, 2021].

Связь ТАС-индекса и содержаний ДБТ была ранее установлена Т.М. Парфеновой и А.Э. Конторовичем с коллегами [Parfenova, Ivanova, 2007; Парфенова, 2008, 2015]. Авторы предположили, что прямая связь значений ТАС-индекса с содержанием ДБТ указывает на то, что ТАС  $C_{20}-C_{21}$ , образовывались за счет биodeградации стероидов в осадке. Ими также было показано, что значения ТАС-индекса возрастают с содержанием  $S_{\text{орг}}$  и  $S_{\text{общ}}$  в породах [Конторович и др., 2005; Парфенова, 2008, 2015]. Для хатыспытской свиты эта связь не выявлена.

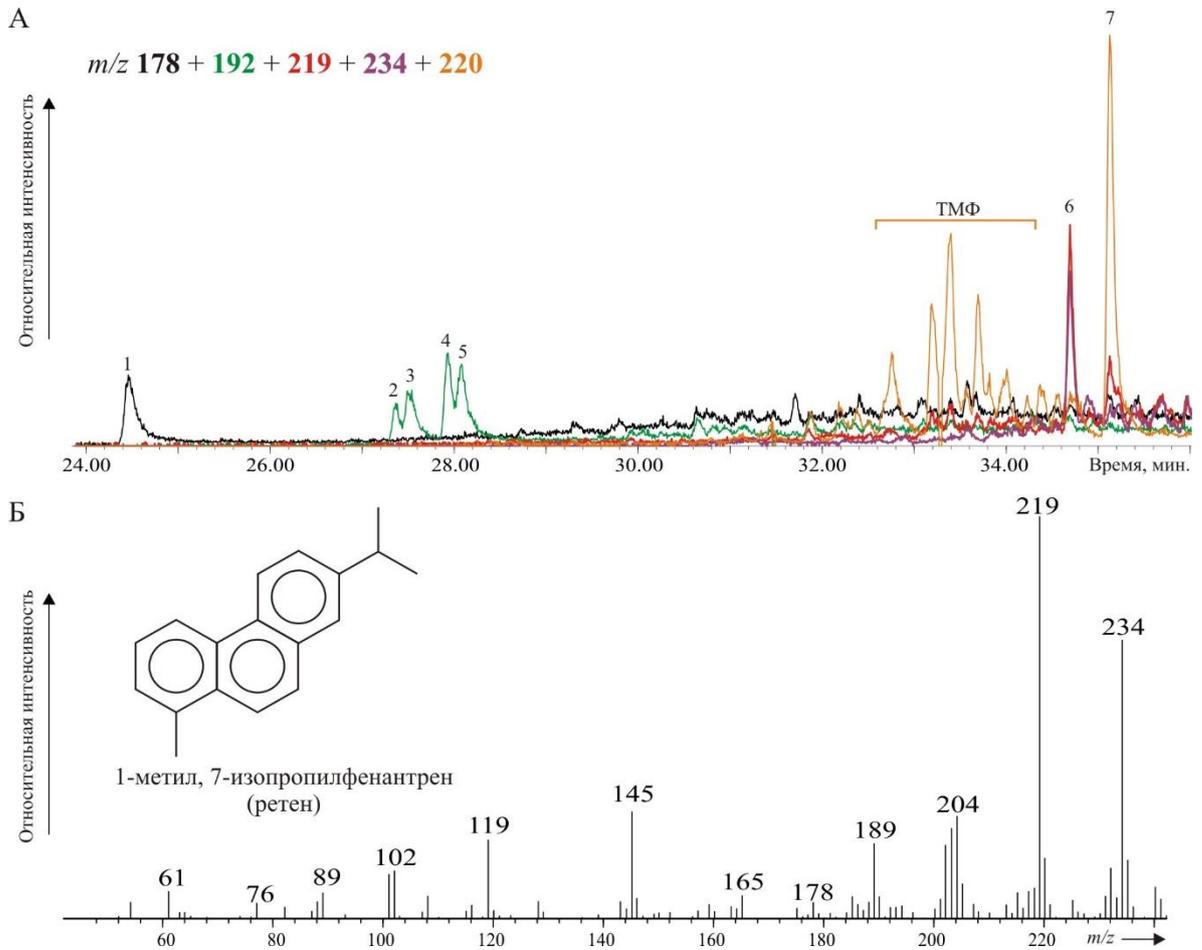


Рисунок 4.5.6 – Распределение феноантроновых УВ в нефтено-ароматической фракции битумоида хатыспытской свиты (А) и масс-спектр ретена (Б).  
Условные обозначения: 1 – феноантрен; 2 – 3-МФ; 3 – 2-МФ; 4 – 9-МФ; 5 – 1-МФ; 6 – ретен; 7 – 1,7,8-триметилфенантрен; ТМФ – триметилфенантрены

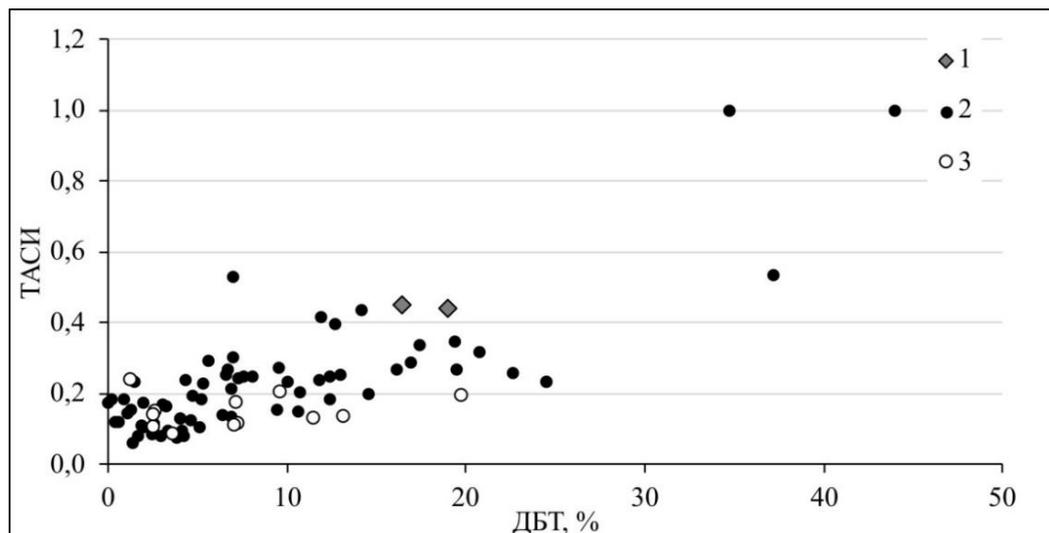


Рисунок 4.5.7 – Диаграмма ТАС-индекса и содержания ДБТ в нефтено-ароматических фракциях битумоидов пород хатыспытской свиты.

Условные обозначения: 1 – черные сланцы; 2 – карбонатные и глинисто-карбонатно-кремнистые породы с преимущественно автохтонным битумоидом; 3 – карбонатные и карбонатно-кремнистые породы с биодegradированным битумоидом

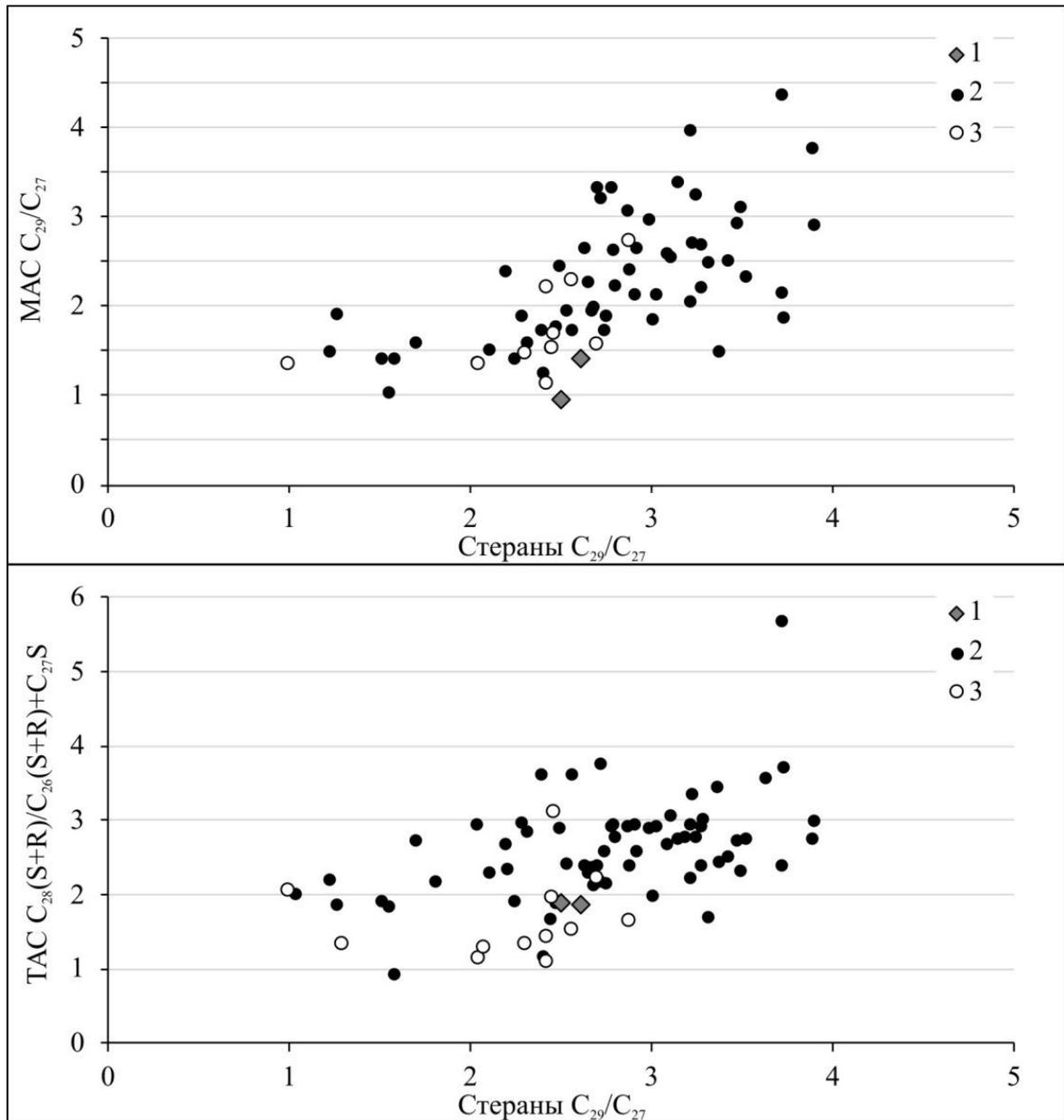


Рисунок 4.5.8 – Диаграммы отношения стеранов  $C_{29}/C_{27}$  и  $MAC\ C_{29}/C_{27}$ ,  $TAC\ C_{28}(S+R)/(C_{26}(S+R)+C_{27}S)$  нефтено-ароматических фракций битумоидов хатыспытской свиты. Условные обозначения: см. на рисунке 4.5.7

**Хараяутэхская свита.** Установлено, что основными компонентами в нефтено-ароматической фракции битумоидов средней подсвиты хараяутэхской свиты являются фенантрены. Их содержание составляет 75–98% (в среднем – 87%). Содержание дибензотиофенов изменяется от 2 до 24% и в среднем составляет 11%. В большинстве образцов достоверно идентифицировать моноароматические и триароматические стероиды не удалось. Отчетливый сигнал на хроматограммах получен в 7 пробах для МАС и в 10 для ТАС. В этих образцах содержания МАС <3%, ТАС <7% (см. таблицу 4.5.1, рисунки 4.5.1, 4.5.9). Отношение Ф/ДБТ

варьирует от 3 до 58, в среднем составляя 15, что выше, чем в ОВ хатыспытской свиты. Отношение ТАС/МАС, как правило,  $>1$  (см. таблицу 4.5.1).

Распределение метилфенантронов в ОВ средней подсвиты хараютэхской свиты отличается от распределения в ОВ хатыспытской свиты и, как правило, характеризуется уменьшением концентраций в ряду 2-МФ $>$ 3-МФ $>$ 9-МФ $>$ 1-МФ (см. рисунок 4.5.9). Это приводит к другим значениям фенантrenoвых показателей зрелости (см. таблицу 4.5.2). Сравнение с фенантrenoвыми отношениями в ОВ хатыспытской свиты показывает, что значения МРI-1, МРI-1 mod., МФИ,  $R_o$  выше (см. таблицу 4.5.2). Это, а также пониженные содержания ДБТ, МАС и ТАС, подтверждает более высокий катагенез ОВ средней подсвиты хараютэхской свиты.

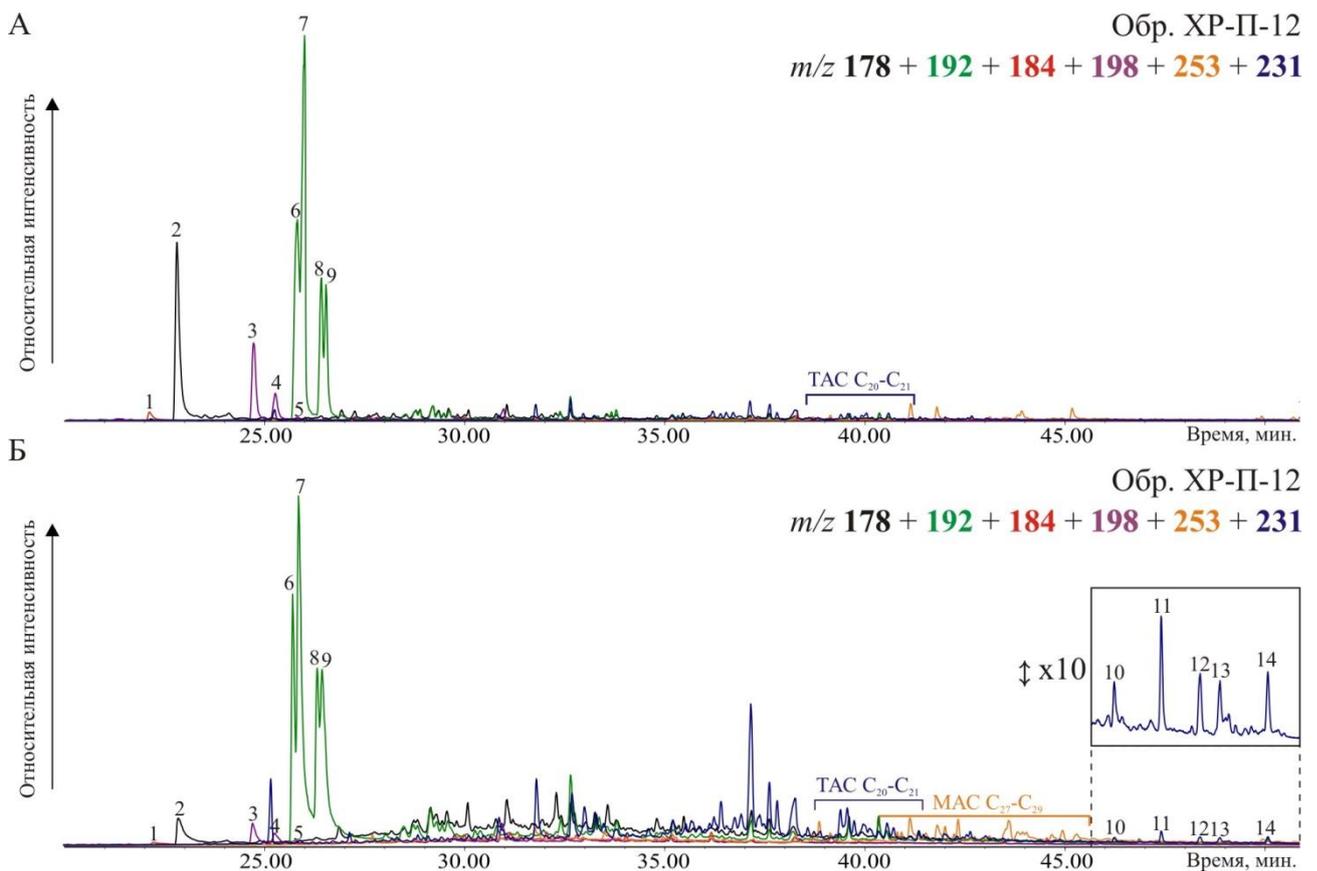


Рисунок 4.5.9 – Масс-хроматограммы нафтено-ароматических фракций битумоидов средней подсвиты хараютэхской свиты.

Условные обозначения: 1 – ДБТ; 2 – фенантрен; 3 – 4-МДБТ; 4 – 2- и 3-МДБТ; 5 – 1-МДБТ; 6 – 3-МФ; 7 – 2-МФ; 8 – 9-МФ; 9 – 1-МФ; 10 – ТАС  $C_{26}S$ ; 11 – ТАС  $C_{26}R$  и  $C_{27}S$ ; 12 –  $C_{27}R$ ; 13 –  $C_{28}S$ ; 14 –  $C_{28}R$

По распределению метилдибензотиофенов ОВ хараютэксской свиты отличается от ОВ хатыспытской свиты. Содержание МДБТ уменьшается в ряду 4-МДБТ>2+3-МДБТ>1-МДБТ (см. рисунок 4.5.9). Значения отношения 4-МДБТ/1-МДБТ изменяется от 7 до 56, в среднем составляя 33; 2+3-МДБТ/ДБТ – 1–9 (в среднем 3), 4-МДБТ/ДБТ – 3–43 (в среднем – 11) (см. таблицу 4.5.1). Значения ТАС-индекса равны 0,3–0,8 (в среднем – 0,5), что выше, чем в ОВ хатыспытской свиты (см. таблицу 4.5.1). Отношение ТАС/МАС обычно >1.

Анализ масс-хроматограмм по  $m/z$  281, 323, 366 позволил выявить в большинстве образцов четыре изомера моноароматических стероидов  $C_{27}$  необычного строения – метильный заместитель у атома С-17 отсутствует, а у С-23 – присутствует. Масс-спектр одинаков для всех четырех пиков и идентичен полученному ранее (Рисунок 4.5.10). Впервые эти УВ были обнаружены в ОВ каменноугольных и пермских отложений Хараулахского антиклинория, а также верхнего палеозоя из сверхглубокой скважины СВ-27 Вилюйской синеклизы; зрелость ОВ отвечает апокатагенезу [Каширцев и др., 2016, 2018]. Обнаружение этих биомаркеров в ОВ палеозойских отложениях на Сибирской платформе, катагенез которого соответствует градациям АК, позволило В.А. Каширцеву с коллегами предположить, что их появление связано с разрушением асфальтенов на этапе апокатагенеза [Каширцев и др., 2016, 2018].

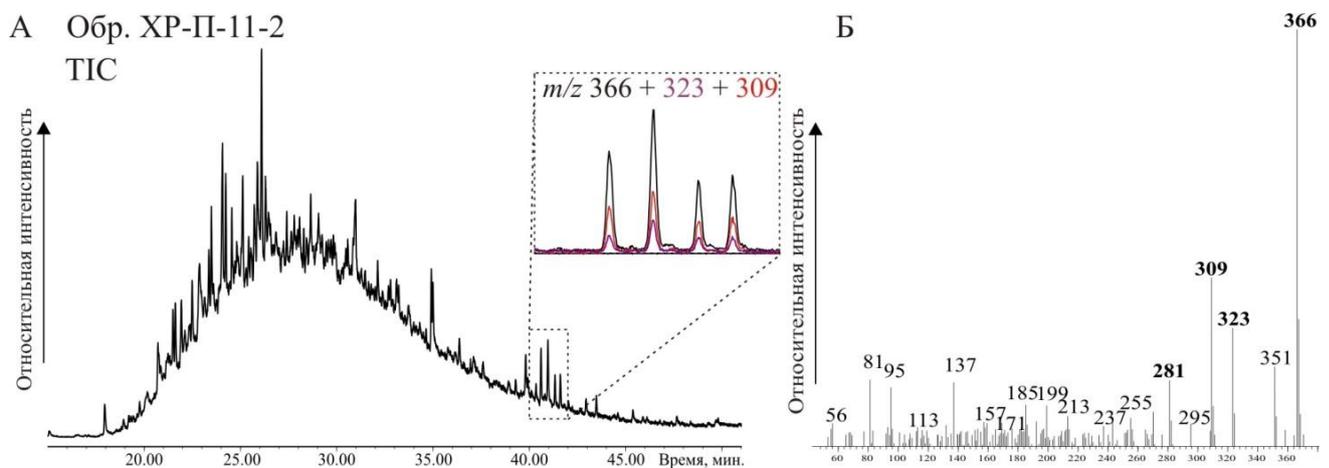


Рисунок 4.5.10 – Моноароматические стероиды (17-дезметил, 23-метил-) на хроматограммах по общему ионному току и  $m/z$  366, 323, 309 (А), и их масс-спектр (Б)

Сравнительный анализ состава и распределения ароматических соединений битумоидов хатыспытской свиты и средней подсвиты хараютэхской свиты показал отличия.

Для ОВ хатыспытской свиты в одних пробах характерно высокое содержание Ф (до 74%), в других – ТАС (до 87%), в некоторых фиксируются высокие концентрации МАС (до 35%) или ДБТ (до 41%). В нафтено-ароматических фракциях битумоидов средней подсвиты хараютэхской свиты доминируют фенатрены (до 98%), содержание МАС и ТАС низкое, часто пики гомологов стероидов на уровне шума (см. таблицу 4.5.1, рисунки 4.5.2, 4.5.9). Это связано с разным катагенезом ОВ двух свит.

Отношения фенантронов и дибензотиофенов, а также расчетные значения отражательной способности витринита согласуются с данными пиролиза и распределения насыщенных УВ и подтверждают катагенез ОВ хатыспытской свиты в разрезе на Оленекском поднятии на уровне начала главной зоны нефтеобразования. Катагенез ОВ средней подсвиты хараютэхской свиты отвечает глубинной зоне газообразования.

Показатели катагенеза ОВ – МФИ, MPI-1, MPI-1 mod.,  $R_o$  – демонстрируют наиболее контрастные значения для ОВ хатыспытской и хараютэхской свит (см. таблицу 4.5.2). Эти параметры являются информативными для диагностики температурной трансформации ОВ на высоких стадиях катагенеза.

Не смотря на низкие пики стероидов на масс-хроматограммах по  $m/z$  231 и 253 нафтено-ароматических фракций битумоидов средней подсвиты хараютэхской свиты, для серии проб, где они были достоверно установлены, рассчитано отношение ТАС/МАС [Конторович и др., 2004]. Его значения  $>1$  (кроме одного образца) (см. таблицу 4.5.1). Это свидетельствует о том, что оно информативно для диагностики аквагенного типа ОВ при высоком катагенезе.

Обнаруженные в большинстве образцов средней подсвиты хараютэхской свиты 17-дезметил, 23-метилстероиды (см. рисунок 4.5.10) позволяют предполагать, что эти соединения могут фиксироваться в ОВ не только в зоне апокатагенеза, но и в конце мезокатагенеза.

## **Глава 5. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ И ОБСТАНОВКИ НАКОПЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ВЕНДСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

Углеводороды метано-нафтеновых фракций битумоидов пород являются продуктами трансформации молекул, синтезированных живыми организмами. Биомаркеры ископаемого ОВ наследуют основные черты строения молекул живого вещества. Однако в зависимости от состава биосообществ (послуживших источником ОВ), условий их обитания, преобразования ОВ в диагенезе и катагенезе, состав и распределение индивидуальных биомаркеров может различаться. Поэтому исследование углеводородов-биомаркеров позволяет оценивать вклад различных биологических источников в рассеянное ОВ и реконструировать обстановки осадконакопления [Кальвин, 1971; Тиссо, Вельте, 1981; Петров, 1984; Peters, Moldowan, 1993]. При обсуждении результатов в этом разделе биodeградированные битумоиды, состав и содержание углеводородов которых изменено в гипергенезе, не рассматривались.

*Биологические предшественники рассеянного органического вещества вендских отложений северо-востока Сибирской платформы.* Распределение нормальных алканов с максимумом на  $n$ -C<sub>17</sub>, отмеченное в ОВ хатыспытской свиты и средней подсвиты хараютэхской свиты [Каширцев, 2003; Parfenova et al., 2009; Парфенова и др., 2010; Duda et al., 2016, 2020; Каширцев и др., 2019; Melnik et al., 2019; Мельник и др., 2023] указывает на бактериально-водорослевый генезис их ОВ [Gelpi et al., 1970; Blumer et al., 1971; Петров, 1984; Peters et al., 2005]. Присутствие пристана и фитана в ОВ свидетельствует о развитии фотосинтезирующих организмов (вероятно, зеленых водорослей и цианобактерий) в вендских морях хатыспытского и хараютэхского времени [Dean and Whitehead, 1961; Philp, 1985; Peters et al., 2005]. Изопреноидные алканы также могут образовываться из жирных кислот в мембранах архей [Peters et al., 2005].

Биологический источник 12- и 13-монометилалканов достоверно неизвестен. Есть сведения, что синтез их прекурсоров мог осуществляться цианобактериями [Thiel et al., 1999; Peters et al., 2005]. Редкое и в низких содержаниях обнаружение

этих углеводородов в ОВ хатыспытской свиты и средней подсвиты хараютэхской свиты свидетельствует о слабом развитии в вендский период на северо-востоке Сибирской платформы биоты, которая была, вероятно, характерна для центральных и южных районов Сибирской платформы, а также Омана, согласно многолетним исследованиям докембрийских и нижнепалеозойских нефтей и связанного с ними ОВ нефтематеринских пород [Петров, 1984; Конторович и др., 1996; 1999; 2004; Тимошина, 2004, 2005; Peters et al., 2005; Crosjean et al., 2009; Kelly et al., 2011; Craig et al., 2013; Дахнова и др., 2014; Иванова, 2016].

Идентифицированные в ОВ вендских отложений северо-востока Сибирской платформы стераны  $C_{27}$ – $C_{30}$  свидетельствуют о развитии эукариот в морях позднего докембрия на этой территории [Volkman, 2003; Peters et al., 2005]. Разные типы распределения стеранов  $C_{27}$ – $C_{29}$  в ОВ хатыспытской свиты (как правило,  $C_{29} > C_{27}$ , реже  $C_{29} \approx C_{27}$ ) и в ОВ средней подсвиты хараютэхской свиты ( $C_{29} \approx C_{27}$ ) могут быть связаны с отличиями в составах эукариотических сообществ [Мельник, Парфенова, 2021]. Имеется точка зрения, что доминирование среди стеранов этилхолестана  $C_{29}$  в ОВ позднедокембрийских отложений объясняется широким распространением зеленых водорослей в экосистемах эдиакарского периода [Brocks et al., 2017, 2018]. Сопоставление значений отношения  $C_{29}/C_{27}$  с биомаркерными показателями окислительно-восстановительных условий (отношение Pr/Ph, отношение гомогопанов  $C_{35}/C_{34}$ , гаммацерановый индекс, см. ниже) показало отсутствие корреляций. Можно предположить, что распределение стеранов в ОВ хатыспытской свиты не связано с обстановками осадконакопления.

Трицикланы в ОВ могут происходить из водорослей *Tasmanites* и остатков *Leiosphaeridia* [Greenwood et al., 2000; Dutta et al., 2006]. Гопаны и гомогопаны указывают на вклад бактериальных сообществ в органическое вещество [Петров, 1984; Уриссон, 1984; Peters et al., 2005]. Отношение стеранов и прегнанов к терпанам изменяется в пределах 0,2–0,6, что указывает на преобладание прокариотических сообществ над эукариотическими.

Гаммацеран формируется из тетрахиманола [Ten Haven et al., 1985]. Известные его биологические источники многочисленны, это: специфические

бактериальные сообщества, обитающие в условиях высокой солености вод; фотосинтезирующие пурпурные бактерии; морские и пресноводные инфузории; некоторые простейшие; папоротники и другие [Ten Haven et al., 1985; Fu Jiamo et al., 1986; Kleeman et al., 1990; Shinnighe Damste et al., 1995b; Peters et al., 2005 и другие]. Считается, что одним из главных источников тетрахиманола являются инфузории.

Для черных сланцев хатыспытской свиты характерно несколько особенностей состава насыщенных УВ: одни из самых низких значений отношения стеранов и прегнанов к терпанам (0,13–0,14); повышенное содержание изопреноидов во фракции алканов, в особенности пристана и фитана ( $Pr/n-C_{17}$  и  $Ph/n-C_{18}$  равны 0,41–0,42 и 0,55–0,56 соответственно;  $\sum n-C_i / \sum iso-C_i = 4,4–4,5$ , тогда как в среднем для хатыспытской свиты – 15). Таким образом, предполагается, что одним из основных биологических источников аномально обогащенных ОВ пород были фотосинтезирующие прокариоты – вероятнее всего, цианобактерии.

**Использование углеводов-биомаркеров для оценки условий осадконакопления.** Образование пристана и фитана из фитола происходит в разных условиях: пристан формируется в окислительных, фитан – в восстановительных, бескислородных. Поэтому отношение  $Pr/Ph$  используется для оценки окислительно-восстановительных условий при осадконакоплении. Использовать этот параметр следует с осторожностью, так как на него влияют такие факторы, как исходный тип ОВ (аквагенный или террагенный), катагенез ОВ и другие [Сафонова, 1980; Геохимия органического..., 1984; Петров, 1984; Peters et al., 2005].

Гопаны и гомогопаны образуются из политерпеноидов [Уриссон, 1984; Петров, 1984]. В аноксичных условиях, и особенно при сероводородном заражении придонных вод, образование низкомолекулярных гомологов гомогопанов затруднено [Peters and Moldowan, 1993; Sinninghe Damste et al., 1995a]. Поэтому гомогопаный индекс (гомогопаны  $C_{35} / \sum C_{31}–C_{35}$ ) [Peters, Moldowan et al, 1993] или отношение гомогопанов  $C_{35}/C_{34}$  [Каширцев, 2003] используется для оценки окислительно-восстановительных условий в водной среде и во время диагенеза.

Значения отношения  $C_{35}/C_{34} < 1$  свидетельствуют о слабо восстановительных обстановках (или субокислительных), а  $C_{35}/C_{34} > 1$  – о сильно восстановительных, аноксичных. Высокие значения  $C_{35}/C_{34}$  также могут быть связаны с сероводородным заражением придонных вод [Peters, Moldowan, 1993; Shinninghe Damste et al., 1995a; Peters et al., 2005].

Основным источником тетрахиманола в ископаемом ОВ являются инфузории, которые обитают на границе окисной и безокисной зон в стратифицированных морских бассейнах и питаются бактериями [Sinninghe Damste et al., 1995b]. Поэтому повышенные содержания гаммацераана (продукт трансформации тетрахиманола) в ископаемом ОВ используются как показатель стратификации водной толщи во время осадконакопления, которая может быть связана с гиперсолеными обстановками или температурным градиентом [Sinninghe Damste et al., 1995b; Peters et al., 2005].

**Обстановки формирования рассеянного органического вещества хатыспытской свиты.** Исследование углеводов-биомаркеров метано-нафтеновых фракций битумоидов хатыспытской свиты показало, что во всей коллекции значения отношений Pr/Ph и гомогопанов  $C_{35}/C_{34}$  изменяются в широких интервалах – 0,2–1,2 и 0,6–2,8 соответственно. Содержание гаммацераана варьирует от 0,1 до 9,9% на сумму терпанов, значения GI – от 0,07 до 4,93 (см. главу 4, таблицы 4.4.1, 4.4.3). Это свидетельствует о непостоянных условиях во время формирования осадков хатыспытской свиты, которые менялись от слабо восстановительных (или, вероятно, субокислительных) до сильно восстановительных, в некоторые периоды возникала стратификация водной толщи и сероводородное заражение придонных вод.

Высокие концентрации гаммацераана среди терпанов в ОВ хатыспытской свиты связывают с повышенной соленостью и стратификацией вод бассейна [Конторович и др., 1995; Каширцев, 2003; Парфенова и др., 2010; Duda et al., 2020]. В работе [Duda et al., 2020] авторы предполагают, что о повышенной солености вод также свидетельствуют и высокие значения гомогопанового индекса ( $C_{35}/\sum C_{31}-C_{35}$ ). В середине XX века В.С. Журавлевым и Д.С. Сороковым

на основании развития доломитов высказывалась точка зрения о том, что осадки маастахских, хатыспытских и туркутских отложений образовывались в обширном засолявшемся бассейне [Журавлев, Сороков, 1954]. Однако, минеральных (гипсы, ангидриты, галит) и геохимических (повышенные отношения Sr/Ca, Sr/Ba и другие) признаков повышенной солености вод в хатыспытском бассейне пока не обнаружено [Якшин, Воданюк, 1986; Мельников и др., 2005; Nagovitsin et al., 2015; Cui et al., 2016]. Вопрос о гиперсоленых обстановках в хатыспытском бассейне остается открытым.

В 1980-х Б. Дж. Хейзинга, изучая нефти из нефтематеринских пород формации Букомаци в Анголе (озерные нижнемеловые отложения), показал взаимосвязь гаммацеранового индекса и отношения пристана к фитану – с увеличением Pr/Ph, значения GI уменьшались [Peters et al., 2005]. Был сделан вывод, что эта зависимость отражает уменьшение содержания кислорода в придонных водах при развитии гиперсоленых условий в бассейне. Схожие результаты были получены при изучении углеводородов нефтей из пород третичного периода (побережье Китая) [Mann et al., 1987]. Изучение геохимии глинистых доломитов третичного возраста из бассейна Биянг (Китай) выявило низкие значения Pr/Ph и высокие GI, что было предложено интерпретировать как повышенную соленость вод бассейна во время осадконакопления [Junhong, Summons, 2001].

Для битумоидов хатыспытской свиты была построена диаграмма GI–Pr/Ph (Рисунок 5.1). Распределение фигуративных точек на ней отражает изменение условий осадконакопления во время формирования хатыспытской свиты и ее ОВ. На основании значений Pr/Ph, GI, а также C<sub>35</sub>/C<sub>34</sub>, были выделены три геохимические фации (см. рисунок 5.1) [Melnik et al., 2019].

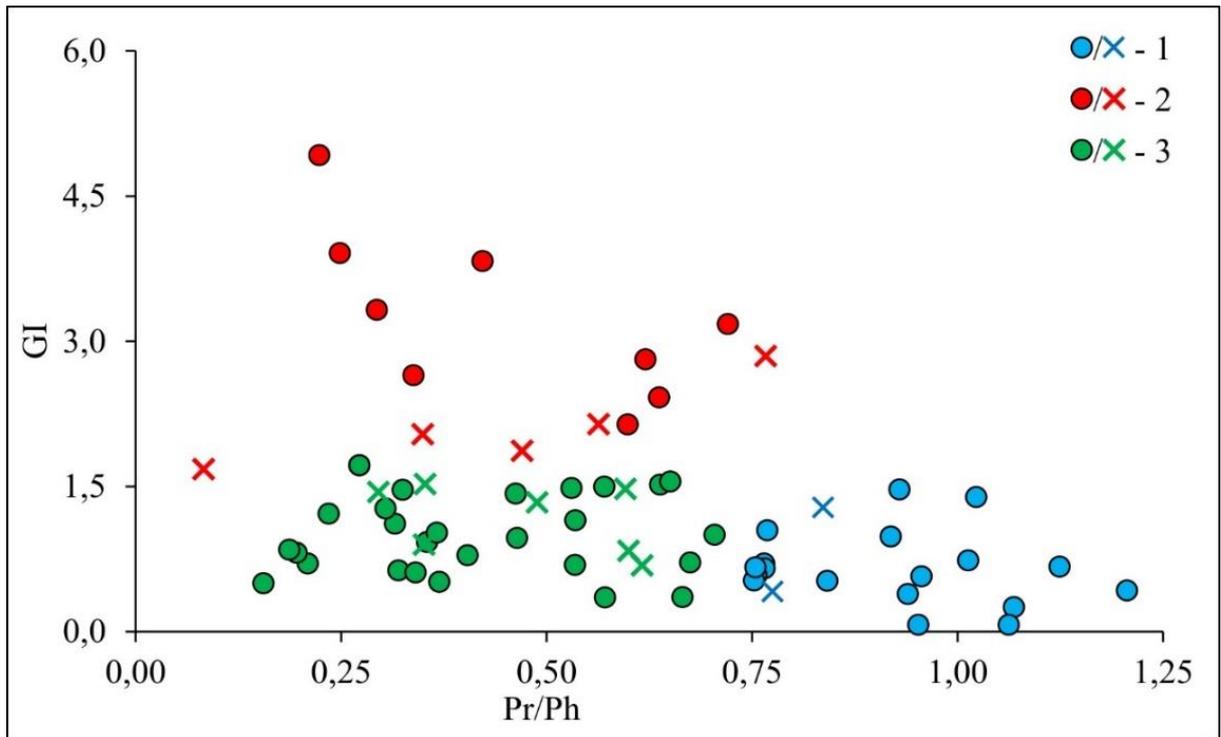


Рисунок 5.1 – Диаграмма GI–Pr/Ph для метано-нафтеновых фракций битумоидов хатыспытской свиты.

Условные обозначения: 1 – фация 1; 2 – фация 2; 3 – фация 3; кружками показаны автохтонные битумоиды, крестиками – параавтохтонные битумоиды

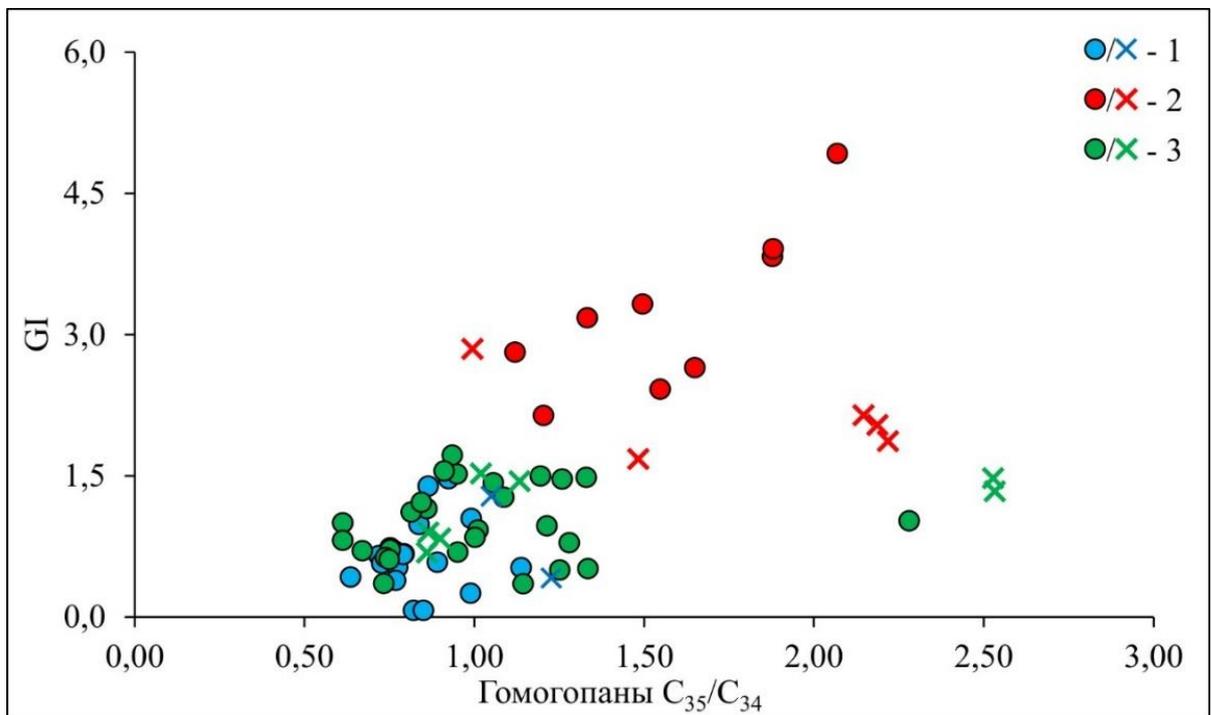


Рисунок 5.2 – Диаграмма GI–C<sub>35</sub>/C<sub>34</sub> для метано-нафтеновых фракций битумоидов хатыспытской свиты.

Условные обозначения: см. на рисунке 5.1

Фация 1 характеризуется величинами  $Pr/Ph > 0,75$ ,  $GI < 1,6$  (см. рисунок 5.1), отношением гомогпанов  $C_{35}/C_{34}$  как правило  $< 1$  (Рисунок 5.2). Фации 2 соответствуют значения  $Pr/Ph < 0,75$ ,  $GI > 1,6$  (см. рисунок 5.1),  $C_{35}/C_{34}$  обычно  $> 1$  (см. рисунок 5.2). Фация 3 выделяется в качестве переходной. Ей соответствуют значения  $Pr/Ph < 0,75$ ,  $GI < 1,6$  (см. рисунок 5.1). Величина отношения  $C_{35}/C_{34}$  для фации 3 изменяется от 0,6 до 2,5 и в среднем равны 1,1. Установлено, что гаммацерановый индекс увеличивается с ростом отношения гомогпанов  $C_{35}/C_{34}$  ( $R = +0,69$ ) (см. рисунок 5.2).

Предполагается, что осадки фации 1 отлагались в слабо восстановительных (возможно, субокислительных) условиях, о чем свидетельствуют повышенные значения  $Pr/Ph$ , а также без стратификации и сероводородного заражения придонных вод, на что указывают низкие содержания гаммацерана и отношение гомогпанов  $C_{35}/C_{34}$  ниже 1. Фация 2, напротив, соответствует сильно восстановительным условиям ( $Pr/Ph < 0,75$ ), стратификации водной толщи ( $GI > 1,6$ ), развитию аноксии (а также, вероятно, эвксинии) в придонных водах ( $C_{35}/C_{34} > 1$ ). Величины  $Pr/Ph < 0,75$  (до 0,2) позволяют предполагать, что переходная фация 3 отвечает восстановительным и сильно восстановительным условиям,  $GI < 1,6$  – указывают на отсутствие или слабо выраженную стратификацию вод бассейна. Высокие (до 2,5) значения отношения гомогпанов  $C_{35}/C_{34}$  при значениях  $GI < 1,6$  свидетельствуют о сильно восстановительных условиях и повышенном содержании сероводорода в осадке [Melnik et al., 2019].

Было проведено сопоставление величин  $Pr/Ph$ ,  $GI$  и  $C_{35}/C_{34}$  с содержанием  $HO$ ,  $S_{орг}$ ,  $S_{общ}$  в породах. Установлено, что высокие значения  $GI (> 1,7)$  и  $C_{35}/C_{34} (> 1,2)$ , как правило, характерны для пород с содержанием  $HO$  меньше 20% (Рисунок 5.3, Рисунок 5.4). Это может свидетельствовать о том, что в периоды развития сильно-восстановительных, эвксинных условий со стратификацией водной толщи происходило накопление осадков преимущественно карбонатного состава.

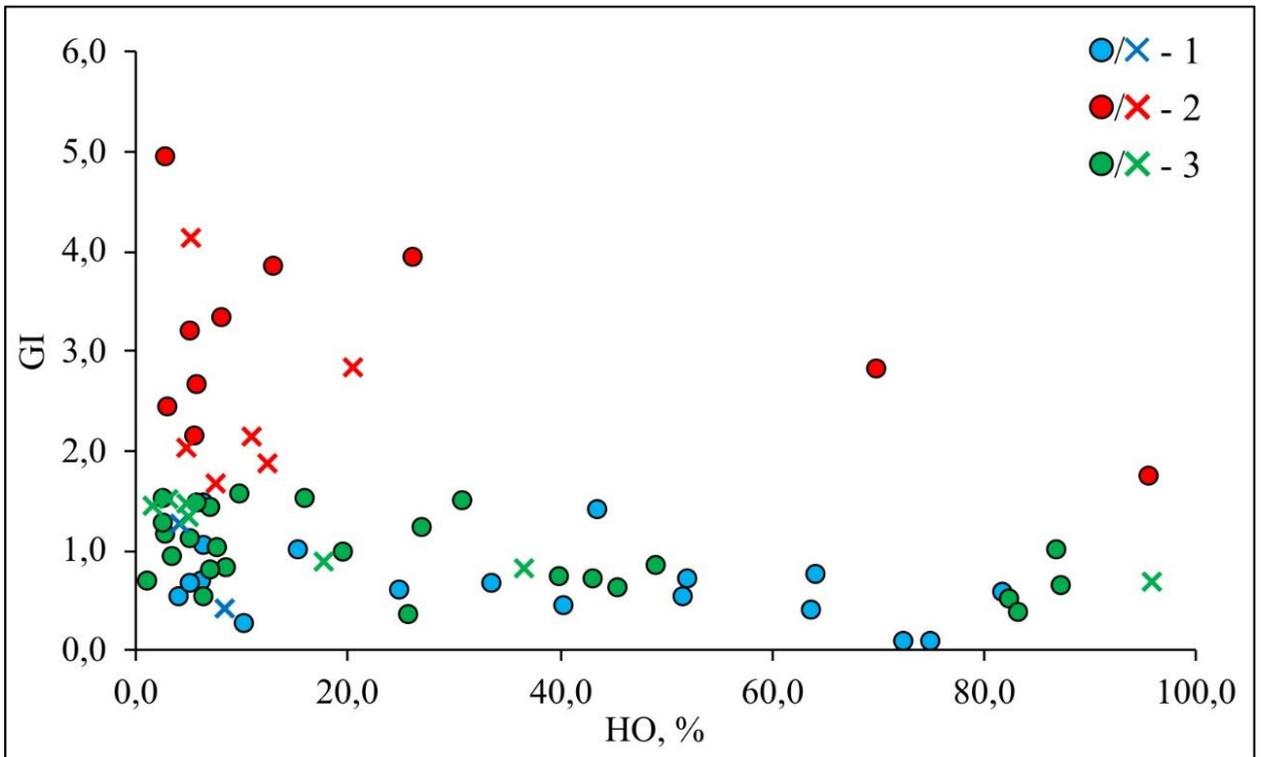


Рисунок 5.3 – Диаграмма GI–НО для пород хатыспытской свиты.  
Условные обозначения: см. на рисунке 5.1

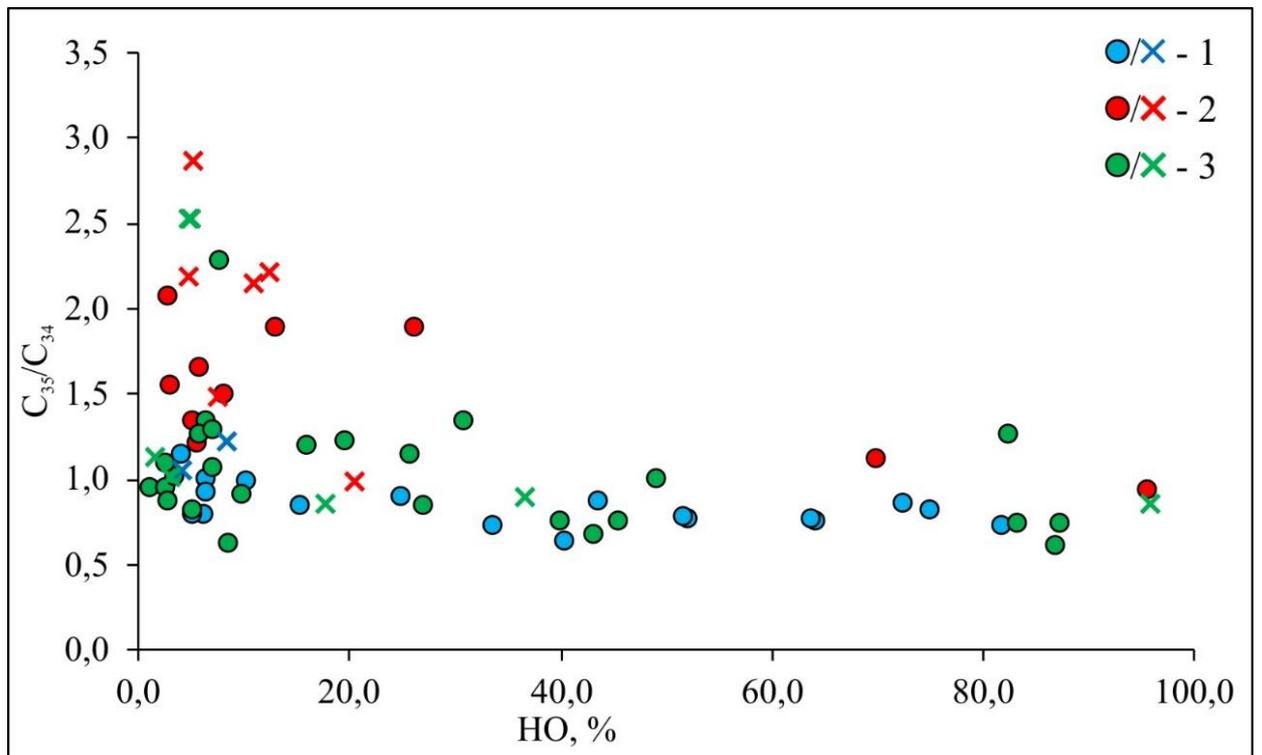


Рисунок 5.4 – Диаграмма  $C_{35}/C_{34}$ –НО для пород хатыспытской свиты.  
Условные обозначения: см. на рисунке 5.1

Величины Pr/Ph, GI и  $C_{35}/C_{34}$  не зависят от содержания  $C_{орг}$ ,  $S_{общ}$  в породах, а также от концентраций ДБТ. Можно отметить, что накопление маломощных интервалов черных сланцев ( $C_{орг} = 10,2\%$ ) в обнажении 0601 происходило в слабо восстановительных условиях, стратификация и сероводородное заражение придонных вод отсутствовали. Об этом свидетельствуют значения Pr/Ph = 1,0–1,1, GI < 0,1,  $C_{35}/C_{34} = 0,8–0,9$  (см. таблицы 4.4.1, 4.4.3, Рисунок 5.5). Вероятно, высокое количество захораниваемого ОВ в черных сланцах было обусловлено повышенной биопродуктивностью [Парфенова и др., 2020; Parfenova et al., 2021; Мельник, 2022; Мельник и др., 2023].

Установлено, что значения отношения стеранов и прегнанов к терпанам >0,3 характерны, как правило, для ОВ пород фации 1. Это может свидетельствовать о том, что широкое развитие сообщества эукариотических микроорганизмов получали только в слабо восстановительных и субокислительных условиях.

Изменение геохимических фаций вверх по разрезу следующее (см. Рисунок 5.5). Первая подсвита хатыспытской свиты сложена породами фации 1. Литолого-седиментологические исследования показывают, что первая подсвита накапливалась в обстановках средней части внешнего рампа [Рогов, 2018, 2022]. Молекулярные характеристики битумоидов указывают на слабо восстановительные условия накопления ОВ, отсутствие стратификации и сероводородного заражения вод. При переходе ко второй подсвите условия сменились на сильно восстановительные, возникла стратификация вод бассейна, и вероятнее всего, сероводородное заражение придонных вод. По седиментологическим реконструкциям предполагается, что вторая подсвита накапливалась в дистальных обстановках внешнего рампа, при этом по мере накопления подсвиты происходило смещение в более проксимальные обстановки внешнего рампа [Рогов, 2018, 2022]. По-видимому, условия, отвечающие второй геохимической фации, связаны с увеличением глубины бассейна.

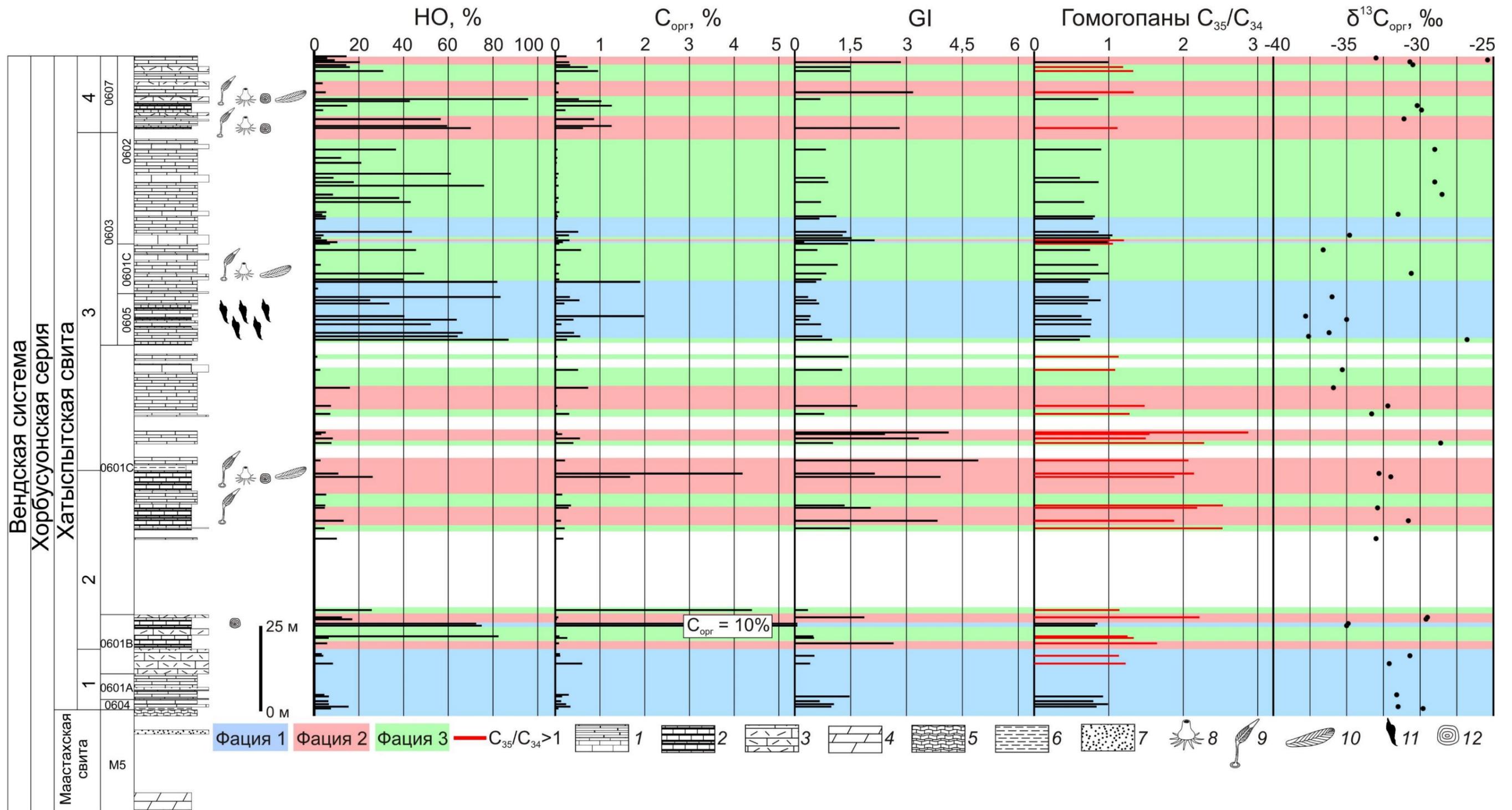


Рисунок 5.5 – Литолого-геохимическая характеристика сводного разреза хатыспытской свиты Оленекского поднятия.

Условные обозначения: 1 – известняки; 2 – чередование известняков и аргиллитов; 3 – известняки интракластовые; 4 – доломиты; 5 – доломиты микробилитовые; 6 – аргиллиты; 7 – песчаники. Отпечатки макроорганизмов (по материалам Grazhdankin et al., 2008, 2014; Cui et al., 2016; Vykova et al., 2017, 2020, Рогов, 2022): 8 – *Hiemalora*; 9 – *Khatyspytia*; 10 – *Charnia*; 11 – макроводоросли в органостенной сохранности; 12 – дисковидные отпечатки макроколоний прокариот

Как отмечено выше, формирование маломощного интервала черных сланцев происходило в слабо восстановительных условиях без стратификации и сероводородного заражения придонных вод, в сравнительно глубоководных обстановках [Гражданкин, Рогов, 2020; Парфенова и др., 2020; Parfenova et al., 2021; Рогов, 2022]. Ранее специалистами ИНГГ СО РАН было установлено, что отпечатки стеблевидных организмов в разрезе хатыспытской свиты простираются в северо-северо-западном направлении ( $334\text{--}337^\circ$ ), что свидетельствует о существовании направленных палеотечений [Гражданкин, Рогов, 2020, Рогов, 2022]. На этом основании можно предполагать более широкое распространение черносланцевых фаций в разрезе хатыспытской свиты к северо-северо-западу от Оленекского поднятия.

Сильно восстановительные условия со стратификацией водного столба и, вероятнее всего, развитием эксинии сохранялись при накоплении нижней части третьей подсвиты (см. рисунок 5.5). В третьей подсвите по геохимическим характеристикам резко выделяется часть разреза, вскрытая в обнажении 0605 – для нее характерны наименьшие значения GI и  $C_{35}/C_{34}$ , высокие – Pr/Ph (см. рисунок 5.5) [Melnik et al., 2019; Duda et al., 2019, 2020]. Формирование осадков верхней части третьей подсвиты и четвертой подсвиты происходило в чередующихся условиях от слабо восстановительных до сильно восстановительных. Вариации значений  $C_{35}/C_{34}$  от 0,7 до 1,3 свидетельствуют о периодическом сероводородном заражении придонных вод (см. рисунок 5.5). Значения GI обычно  $<1,5$  указывают на то, что стратификация вод была выражена слабо, она возникала в некоторые периоды во время накопления четвертой подсвиты [Melnik et al., 2019; Duda et al., 2019, 2020] (Рисунок 5.5).

Наличие серосодержащих соединений в нефтено-ароматических фракциях битумоидов хатыспытской свиты свидетельствует о процессах сульфатредукции в осадке при участии сульфатредуцирующих бактерий. Прямой связи между относительным содержанием ДБТ с отношением гомогпанов  $C_{35}/C_{34}$  и значениями GI не выявлено. Однако, как было показано ранее в главе 4, в породах из нижней части хатыспытской свиты фиксируются повышенные

и высокие концентрации ДБТ и  $S_{\text{общ}}$  (см. рисунок 4.5.4). По-видимому, активному внедрению серы в минеральное и органическое вещество способствовали эвксинные условия, которые сохранялись при накоплении второй подсвиты и нижней части третьей подсвиты (см. рисунок 5.5, фация 2).

Ранее исследователями из России и Китая проводилось изотопно-геохимическое исследование карбонатных пород хатыспытской свиты [Cui et al., 2016]. Ими было показано, что для нижней части разреза хатыспытской свиты характерны значения  $\delta^{34}S_{\text{pyr}} < 0\text{‰}$  (относительно стандарта CDT) и  $\Delta\delta^{34}S > 30\text{‰}$ , а также повышенное содержание карбонат-ассоциированной серы (до 2000 ppm). Это позволило авторам сделать вывод о распространении сильных эвксинных условий при накоплении нижней части изученного разреза, охватывающей большую часть второй подсвиты (45 м), в то время как верхняя часть изученного разреза (верхняя часть второй подсвиты, третья подсвита) формировалась в неэвксинных условиях [Cui et al., 2016]. Данные, полученные в настоящем исследовании, показывают, что эвксинные условия в средней части разреза хатыспытской свиты сохранялись в бассейне долины – и при накоплении верхней части второй подсвиты и нижней части третьей подсвиты (см. рисунок 5.5) [Melnik et al., 2019; Мельник, 2022].

Помимо изотопного состава серы X. Цуем с коллегами изучалось отношение  $Ce/Ce^* = [Ce]_{\text{PAAS}} / ([Pr]_{\text{2PAAS}} / [Nd]_{\text{PAAS}})$ , где Ce, Pr и Nd – редкоземельные элементы, а PAAS – постархейский австралийский глинистый сланец. Для хатыспытской свиты по всему разрезу характерны повышенные значения  $Ce/Ce^*$  ( $0,84 \pm 0,06$ ), что авторы предлагают интерпретировать как возможное развитие бескислородных условий при накоплении всего разреза свиты [Cui et al., 2016].

В недавнем исследовании геохимии пород хатыспытской свиты [Cherry et al., 2022] было показано, что значения отношения  $Ce/Ce^* > 0,9$ . Это было интерпретировано как развитие аноксии. Значения  $\delta^{238}U < 0,15\text{‰}$  в разрезе хатыспытской свиты и вышележащих вендских и кембрийских отложений авторы связывают с глобальным распространением эвксинных условий в позднем венде и раннем кембрии [Cherry et al., 2022].

Полученные в настоящем исследовании результаты – молекулярные характеристики метано-нафтенных и нафтенно-ароматических фракций битумоидов, обобщение с данными по содержанию  $\text{NO}$ ,  $C_{\text{орг}}$ ,  $S_{\text{общ}}$  в породах, и с результатами седиментологических исследований – показали большую дифференциацию окислительно-восстановительных условий, а также их связь с этапами развития хатыспытского осадочного бассейна [Melnik et al., 2019; Duda et al., 2019, 2020; Парфенова и др., 2020; Parfenova et al., 2021; Мельник, 2022].

Результаты настоящего исследования продолжили цикл работ по реконструкции обстановок обитания мягкотелых макроорганизмов в хатыспытской свите [Grazhdankin et al., 2008; Rogov et al., 2012; Cui et al., 2016; Duda et al., 2016, 2020; Vykova et al., 2017, 2020; Cherry et al., 2022]. Сопоставление геохимических фаций и уровней с многочисленными отпечатками биоты показало, что широкое развитие многоклеточных водорослей в обнажении 0605 [Vykova et al., 2020] приурочено к фациям, которые отражают слабо восстановительные (вероятно, субокислительные) условия, без стратификации и сероводородного заражения вод (геохимическая фация 1 (см. рисунок 5.5)) [Duda et al., 2020]. Для пород из обнажения 0605 характерен легкий и аномально легкий изотопный состав  $C_{\text{орг}}$  ( $\delta^{13}C_{\text{орг}}$  до  $-38\text{‰}$ ).

Основные уровни с отпечатками мягкотелой макробиоты (*Hiemalora*, *Khatyspytia grandis*, *Charnia masoni*) приурочены к интервалам пород, формировавшихся в сильно восстановительных условиях (в обнажениях 0601, 0603, см. рисунок 5.5), сильно восстановительных условиях со стратификацией водного столба и возможным сероводородным заражением придонных вод (в обнажениях 0601, 0607, 0602, см. рисунок 5.5). Это позволяет предполагать, что такие условия способствовали сохранению отпечатков эдиакарской биоты.

**Обстановки формирования рассеянного органического вещества средней подсвиты хараютэхской свиты.** Низкое содержание гаммацераана среди терпанов (до 0,1%), отношения гомогпанов  $C_{35}/C_{34}$  как правило до 0,96 (в одном образце – 1,02), изопреноидов  $\text{Pr}/\text{Ph} \geq 1$  свидетельствуют о том, что условия формирования ОБ средней подсвиты хараютэхской свиты отличались от условий, которые были

развиты в хатыспытском осадочном бассейне (см. таблицы 4.4.1, 4.4.3). Органическое вещество средней подсвиты хараютэхской свиты накапливалось в слабо восстановительных обстановках, стратификация водной толщи и сероводородное заражение придонных вод отсутствовали [Sinninghe Damste et al., 1995a, 1995b; Peters et al., 2005].

Установлено присутствие дибензотиофенов (иногда в высоких концентрациях – до 24% (см. таблицу 4.5.1)) в битумоидах средней подсвиты хараютэхской свиты. Однако связи концентраций ДБТ с содержанием НО и  $C_{org}$  в породах, а также величинами Pr/Ph,  $C_{35}/C_{34}$  не выявлены. Полученные результаты позволяют предполагать, что в осадках протекали процессы сульфатредукции. Однако, чем контролировалась интенсивность этих процессов, пока не установлено.

Для повышения достоверности реконструкции условий накопления осадков и ОВ средней подсвиты хараютэхской свиты на северо-востоке Сибирской платформы необходимо исследование пород и ОВ из разрезов, претерпевших меньший катагенез, и не подверженных влиянию интрузивных тел.

По молекулярному составу метано-нафтеновых фракций битумоидов можно предполагать, что источниками рассеянного ОВ хатыспытской и хараютэхской свит были эукариотические сообщества (вероятно, красные, зеленые, празиофитовые водоросли; протисты, например, инфузории) и прокариотические сообщества, а также археи. Прокариоты доминировали над эукариотами.

На основе значений Pr/Ph,  $C_{35}/C_{34}$  и GI были выделены геохимические фации. Фация 1 отвечает слабо восстановительным (возможно, субокислительным) условиям в водах. Фация 2, напротив, соответствует сильно восстановительным условиям, стратификации водной толщи, развитию аноксии (а также, вероятно, эвксинии) в придонных водах. Фация 3 отвечает переходным условиям. Стратификация вод, вероятно, отсутствовала, а в осадке были сильно восстановительные условия. Рассеянное ОВ средней подсвиты хараютэхской

свиты накапливалось в слабо восстановительных обстановках, стратификация водной толщи и сероводородное заражение придонных вод отсутствовали.

Сопоставление данных по органической геохимии и палеонтологии показывает, что макроводоросли получали широкое распространение в слабо восстановительных (возможно, субокислительных) условиях, когда стратификация вод и сероводородное заражение придонных вод отсутствовали. Отпечатки эдиакарской макрофауны зафиксированы в породах, осадки которых формировались в условиях, отвечающих геохимическим фациям 2 и 3.

## Глава 6. ОЦЕНКА ПОРОД ВЕНДА КАК ИСТОЧНИКА УГЛЕВОДОРОДОВ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

*Диагностика и оценка генерационных свойств потенциально нефтематеринских пород венда на северо-востоке Сибирской платформы.* При диагностике потенциально нефтематеринских пород опираются на следующие критерии: 1) обогащенность рассеянным ОВ; 2) предпочтительно сапропелевый (аквагенный) тип ОВ; 3) стадия катагенеза ОВ, соответствующая главной зоне нефтеобразования; 4) следы первичной миграции битумоидов; 5) корреляция атомно-молекулярного состава компонентов рассеянного ОВ потенциально нефтематеринских пород и нафтидов [Успенский, 1957; Неручев, 1962; Вассоевич, 1967; Конторович и др., 1967; Конторович, 1976; Тиссо, Вельте, 1981; Баженова и др., 1981].

*Хатыспытская свита.* Настоящее исследование и обобщение опубликованных данных (см. главу 4) показало, что породы свиты неравномерно обогащены рассеянным ОВ. Анализ материалов из отложений мощностью около 190 м показал, что в среднем содержание  $C_{орг}$  в породах составляет от 0,2 до 0,4% [Мельник и др., 2019, 2023]. В разрезе чередуются интервалы преимущественно карбонатных пород, обедненных ( $C_{орг} < 0,2\%$ ) и слабо обогащенных ОВ ( $C_{орг}$  до 0,4%), и интервалы глинисто-карбонатных, глинисто-кремнисто-карбонатных, карбонатно-кремнистых пород и силицитов, обогащенных ОВ ( $C_{орг}$  до 0,4–4,4%) (Рисунок 6.1). В естественных выходах встречаются маломощные прослои глинистых известняков и известковых аргиллитов (черных сланцев), аномально обогащенных ОВ ( $C_{орг}$  от 10 до 17% [Натапов, 1962; Баженова и др., 1981; Конторович и др., 1981]).

Предположение о более широком распространении черносланцевых фаций в разрезе хатыспытской свиты к северо-северо-западу от Оленекского поднятия (см. главу 5) согласуется с представлением о том, что максимальные значения  $C_{орг}$  в хатыспытской свите прогнозируются на территории, примыкающей к поднятию с севера [Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021].

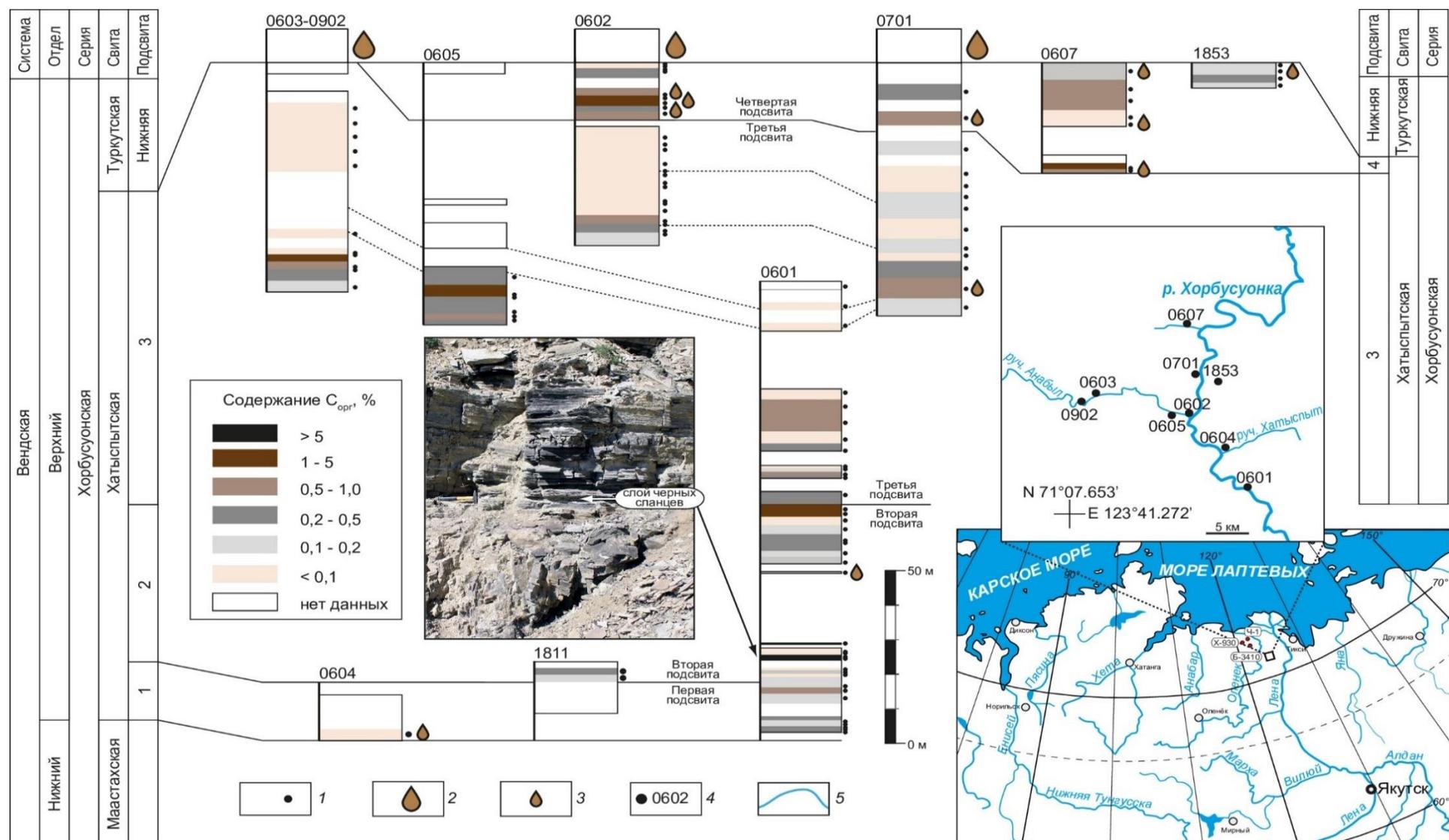


Рисунок 6.1 – Схема изменения содержания  $C_{орг}$  и распространение нафтидов в разрезах хатыспытской свиты на Оленекском поднятии [Мельник и др., 2023].

Условные обозначения: 1 – уровни отбора образцов; 2 – уровни макроскопических битумопроявлений в туркутской свите [Каширцев и др., 2019]; 3 – уровни микроскопических битумопроявлений в хатыспытской свите [Мельник и др., 2020; Мельник, 2022]; 4 – номер обнажения; 5 – гидрография; Б-3410 – скв. Бурская-3410; Х-930 – скв. Хастахская-930; Ч-1 – скв. Чарчкская-1

Последние работы по стратиграфии неопротерозойских отложений северо-востока Сибирской платформы показывают, что в скважинах Лено-Анабарского прогиба к северо-западу от Оленекского поднятия хатыспытская свита в разрезе венда не вскрывается [Nagovitsin et al., 2015]. По данным Т.К. Баженовой черные сланцы (мергели с содержанием  $C_{орг}$  16,3%) в хатыспытской свите также распространены в разрезах на р. Керсюке, примерно в 30–40 км к западу от разрезов на р. Хорбусуонка [Баженова и др., 2019]. До сих пор некоторые интервалы разреза хатыспытской свиты (например, мощностью около 20 м в разрезе 0601, в средней части второй подсвиты) остаются пересыпанными и неизученными (см. рисунок 6.1). Вполне вероятно, что в разрезе свиты могут быть встречены более мощные толщи черных сланцев. Этот вопрос остается дискуссионным. Необходимо бурение на территориях, прилегающих к Оленекскому поднятию, и поиск неизученных разрезов на дневной поверхности.

Выявлены зависимости выхода  $b_{хл}$  и величины  $S_1$  от содержания  $C_{орг}$  в породах, что характерно для потенциально нефтематеринских пород [Конторович, 1976; Меленевский, 1991].

Значения  $HI$ , как правило,  $>150$  мг УВ/г  $C_{орг}$ , достигают 622 мг УВ/г  $C_{орг}$ ,  $S_1+S_2$  в среднем – 5 мг УВ/г породы, 75 мг УВ/г породы в черных сланцах, распределения алкановых, стерановых и терпановых УВ в метано-нафтенных фракциях битумоидов и соединений в нафтенно-ароматических фракциях битумоидов (см. разделы 4.4, 4.5) характеризуют ОВ хатыспытской свиты как типовое аквагенное морское (II тип ОВ), обладающее высоким генерационным потенциалом. Карбонатные и карбонатно-кремнистые породы, по данным пиролиза, часто обладают низким генерационным потенциалом, реже – средним, редко – высоким (см. главу 4) [Kontorovich et al., 2009; Парфенова и др., 2010; Parfenova et al., 2011; Каширцев и др., 2019; Мельник и др., 2019, 2023; Melnik et al., 2019].

Результаты пиролиза пород (в среднем  $T_{max} \sim 435^\circ\text{C}$ ,  $HI \sim 149$ –622 мг УВ/г  $C_{орг}$ ,  $PI < 0,1$ ), преобладание (в среднем на уровне 60%) смол в групповом составе битумоидов черных сланцев, известняков и глинисто-

карбонатно-кремнистых пород, значения молекулярных параметров ( $СРІ \sim 1,1$ ;  $T_s/T_m \sim 0,5$ ;  $C_{29} 20S/(20S+20R) \sim 0,5$  и  $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta) \sim 0,4$ ;  $МРІ-1 \sim 0,3-0,8$ ;  $4-МДБТ/1-МДБТ \sim 1,2-1,9$ ), рассчитанная через отношение метилфенантронов отражательная способность витринита ( $R_o \sim 0,6-0,9\%$ ) (см. главу 4) свидетельствуют о том, что ОВ хатыспытской свиты на Оленекском поднятии достигло начала главной зоны нефтеобразования, его зрелость соответствует началу мезокатагенеза (градация  $МК_1^1$  по шкале А.Э. Конторовича) [Каширцев и др., 2019; Мельник, 2019, 2020; Melnik, Parfenova, 2021; Мельник и др., 2023]. Это подтверждает прежние результаты исследования ОВ хатыспытской свиты, в том числе элементного состава керогенов [Баженова и др., 1981, 2014; Kontorovich et al., 2009; Парфенова и др., 2010; Parfenova et al., 2011]. По современным представлениям на основе сейсмических данных, неопротерозойские отложения погружаются на глубину в западном (Суханская впадина), северном и восточном направлениях (Лено-Анабарский прогиб) от Оленекского поднятия [Конторович и др., 2014, 2020]. В этих районах катагенез ОВ может быть выше. Согласно структурным построениям, выполненным в СНИИГГиМС, катагенез ОВ вендских отложений в северной части Лено-Анабарского и Предверхоаянского краевого прогибов может достигать градаций апокатагенеза на современных глубинах 4000–4500 м [Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021].

На первичную миграцию битумоидов хатыспытской свиты на Оленекском поднятии указывают высокие значения  $\beta$  (до 20–50%),  $PI$  (до 0,14–0,22), повышенное содержание насыщенных и ароматических УВ в групповом составе ряда битумоидов известняков и пород смешанного состава (в сумме до 50–70%) (см. главу 4). Высокие «нафтеновые горбы» и пики терпанов, превышающие пики нормальных алканов на ГЖ-хроматограммах, а также обнаруженные на масс-хроматограммах по  $m/z$  177 деметилированные 25-норгопаны, -трицикланы и -тетрацикланы свидетельствуют о бактериальном окислении в гипергенезе УВ параавтохтонных битумоидов, не связанных с минеральной матрицей пород. Исследование шлифов пород под микроскопом позволило обнаружить в микротрещинах и кавернах карбонатных и карбонатно-кремнистых пород

битумоиды (Рисунок 6.2) [Мельник и др., 2020]. По распределению стеранов и терпанов, соотношениям изомеров и гомологов этих УВ установлено, что биодegradированные битумоиды генерировались рассеянным ОВ хатыспытской свиты (см. главу 4). Анализ распространения этих битумоидов в разрезе показал, что они чаще встречаются в верхних уровнях подсвит 3 и 4 хатыспытской свиты (см. рисунок 6.1) [Мельник и др., 2020, 2023; Мельник, 2022].

Эксперименты по биологическому окислению нефтей показывают, что первыми деградации подвергаются нормальные алканы, затем изопреноиды, после этого гопаны и гомогопаны, в конце тетрацикланы и трицикланы [Петров, 1984; Каширцев, 1988; Peters et al., 2005]. В метано-нафтеновых фракциях серии битумоидов хатыспытской свиты обнаружены и деметилированные терпаны, и алканы. Это, вероятно, свидетельствует о смешении битумов разных этапов генерации и заполнения порового пространства. Алканы и изопреноиды битумов первого этапа генерации были разрушены, терпаны подверглись деметилированию. Последующая генерация и миграция привели ко вторичному обогащению битумов алканами и изопреноидами [Мельник и др., 2020; Мельник, 2022].

В разрезе хатыспытской свиты ранее описывались макроскопические битумопроявления: *«Все известняки хатыспытской свиты имеют резкий сероводородный запах, явные признаки битуминозности (гнезда чистого битума, иногда до 20-30 см)...»* [Якшин, Воданюк, 1986, с. 27]; *«...нефтепроявления в большинстве своем приурочены к породам хатыспытской, туркутской и кессюсинской свит...»* [Граммберг, 1958, с. 174]; *«На территории Оленекского поднятия хатыспытская свита выведена на поверхность и содержит заметные нафтидопроявления»* [Баженова и др., 2014, с. 44]. Нафтидопроявления можно рассматривать как прямой признак нефтепроизводивших толщ [Неручев, 1962; Вассоевич, 1967; Конторович и др., 1967; Конторович, 1976].

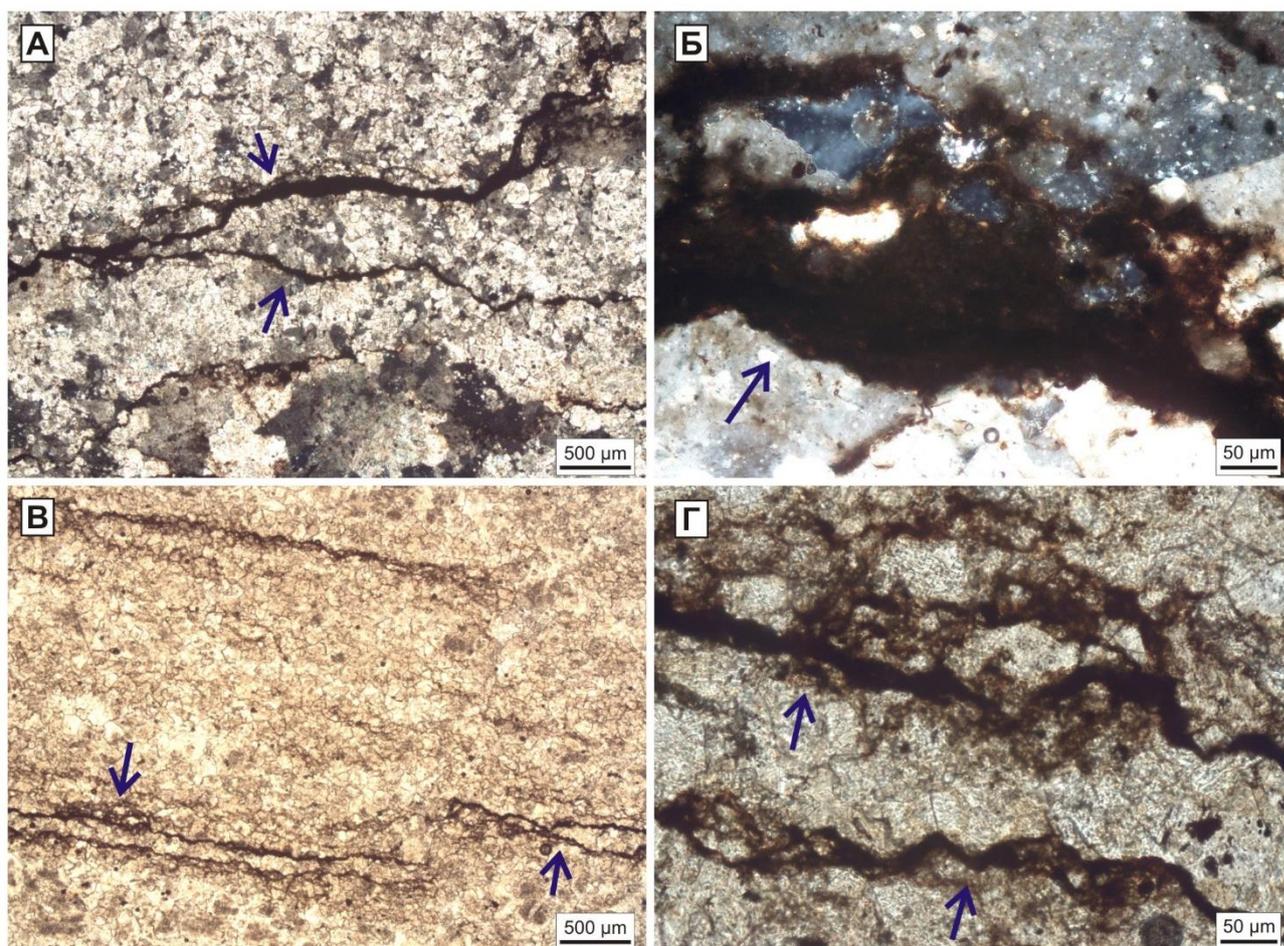


Рисунок 6.2 – Типовое распределение битумопроявлений в микротрещинах пород хатыспытской свиты [Мельник и др., 2020].

Фотографии шлифов, сделанные под микроскопом в проходящем свете:

А, Б – образца К602-42.9 (известняк); В, Г – образца К602-53.3 (известняк кремнистый)

Скопления битумов описывались в кавернозных доломитах туркутской свиты венда и в породах кессюсинской серии венда-нижнего кембрия на Оленекском поднятии (см. рисунок 6.1) [Гольдберг, 1981; Каширцев, 1988, 2003, 2004; Каширцев и др., 2010, 2019]. Исследования геохимии этих битумов, выполненное в ИНГГ СО РАН, показало преобладание стеранов  $C_{29}$  над  $C_{27}$ , высокие концентрации гаммацерана  $>3\%$ , значения  $\delta^{13}C_{org}$  от  $-32$  до  $-30\%$ , биodeградацию УВ метано-нафтеновых фракций [Парфенова и др., 2018].

Настоящее исследование атомно-молекулярного состава ОВ хатыспытской свиты позволило подтвердить связь между рассеянным ОВ и битумами Восточно-Анабарского и Центрально-Оленекского скоплений в туркутской, статороченской свитах и кессюсинской серии. Прослеживается единство атомно-молекулярного состава в ряду автохтонные битумоиды (изотопы углерода рассеянного ОВ пород)

→ параавтохтонные битумоиды → параавтохтонные биодegradированные битумоиды → битумы [Каширцев, 1988, 2003, 2004; Kontorovich et al., 2009; Парфенова и др., 2010, 2018; Parfenova et al., 2011; Каширцев и др., 2019; Мельник и др., 2020, 2023].

Вместе с тем, в серии проб карбонатных и карбонатно-кремнистых пород, обедненных и обогащенных ОВ, обнаружено новое распределение стеранов ( $C_{29} \approx C_{27}$ ). В некоторых образцах, в том числе в черных сланцах, аномально обогащенных ОВ, зафиксированы низкие концентрации гаммацераана (0,1% на сумму терпанов). В автохтонных и параавтохтонных битумоидах карбонатных и карбонатно-кремнистых пород идентифицированы 12- и 13-монометилалканы в следовых количествах (см. главу 4) [Мельник и др., 2019, 2020, 2023; Парфенова, Мельник, 2019; Парфенова и др., 2020; Мельник, 2022]. Эти особенности состава и распределения насыщенных УВ можно ожидать и в битумах (и, возможно, нефтях) на северо-востоке Сибирской платформы. Нафтидов, связанных с реализацией генерационного потенциала черными сланцами, пока не обнаружено.

Новое исследование подтвердило, что по геохимическим критериям хатыспытская свита является потенциально нефтематеринской, и позволяет предполагать, что ее породы генерировали нефть (на более погруженных территориях в Суханской впадине и Лено-Анабарском прогибе – нефть и газ) и были источником битумов в вендских и нижнекембрийских отложениях на северо-востоке Сибирской платформы [Каширцев и др., 2019; Мельник и др., 2019, 2020, 2023; Парфенова и др., 2020; Parfenova et al., 2021].

**Хараютэхская свита.** Настоящее исследование показывает, что большинство пород средней подсвиты хараютэхской свиты в разрезе устья ручья Бискеебит обогащены рассеянным ОВ. Современные концентрации  $C_{орг}$  в основном составляют 0,5–0,8%, достигая 2,6% (см. таблицу 4.1.1, рисунок 4.1.4). В устье ручья Бискеебит мощность разреза обогащенных ОВ пород средней подсвиты хараютэхской свиты составляет около 65 м [Мельник, Парфенова, 2021; Parfenova, Melnik, 2021]. Повышенное ( $>0,2\%$ ) содержание  $C_{орг}$  в породах

хараютэхской свиты было показано ранее по материалам из обнажений и из скважин [Баженова и др., 1981; Конторович и др., 1981; Бахтуров, 1987; Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021].

Дискуссионным остается вопрос о распространении обогащенных ОВ пород хараютэхской свиты по латерали. Согласно схематическим картам распределения  $C_{орг}$  в нефтегазоматеринских отложениях непского горизонта Сибирской платформы (построены специалистами ВНИГРИ и ВНИГНИ), концентрации  $C_{орг}$  в низовьях р. Лена в среднем составляют 0,1–0,3% и увеличиваются в северном направлении [Баженова и др., 1981, 2014]. Специалистами СНИИГГиМС было показано, что в разрезе на ручье Хатыстах концентрации  $C_{орг}$  составляют 0,41%, а в скважине Дьяппальская-1 – 1,09%, согласно построенным схематическим картам распределения  $C_{орг}$ , концентрации ОВ уменьшаются в северном направлении от разреза на ручье Бискеебит [Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021]. По данным С.Ф. Бахтурова (1987) западнее ручья Бискеебит, в долине ручья Нелегер средняя подсвета хараютэхской свиты сложена черными битуминозными известняками, часто доломитизированными, аргиллитами, обогащенными ОВ. Мощность этой части разреза здесь составляет 80 м.

Значения  $\delta^{13}C_{орг}$ , в среднем на уровне -31‰, максимум распределения *n*-алканов на  $C_{16}$ – $C_{18}$ , значения трицикланового индекса обычно  $\leq 1$ , высокие концентрации ДБТ в нафтено-ароматических фракциях, отношение ТАС/МАС  $> 1$  характеризуют ОВ средней подсветы хараютэхской свиты как типовое аквагенное морское (см. главу 4) [Мельник, Парфенова, 2021; Parfenova, Melnik, 2021].

Низкие значения  $b_{хл}$  (в среднем 0,009%) и  $\beta$  (в среднем 1,3%), отсутствие прямой связи  $b_{хл}$  и  $C_{орг}$  (типовой для потенциально нефтематеринских пород), низкий пик  $S_1$  и отсутствие пика  $S_2$  на большинстве пирограмм, отсутствие пиков стеранов и терпанов на масс-хроматограммах в серии проб, состав и распределение ароматических УВ (присутствие 17-дезметил, 23-метилстероидов, содержание фенантронов до 97%; MPI-1 = 0,3–0,8; 4-МДБТ/1-МДБТ в среднем 33;  $R_o$  в среднем 1,5% и до 2%) указывают на высокий катагенез ОВ средней подсветы хараютэхской свиты, за пределами

главной зоны нефтеобразования, реализацию исходно высокого генерационного потенциала и полное истощение ОВ (см. главу 4, таблицы 4.1.1, 4.5.1, 4.5.2, рисунок 4.2.5) [Мельник, Парфенова, 2021; Parfenova, Melnik, 2021].

Известно, что ОВ позднего докембрия, как правило, характеризуется распределением стеранов с преобладанием этилхолестана  $C_{29}$  [Петров, 1984; Конторович и др., 1996; Peters et al., 2005; Баженова и др., 2014; Дахнова и др., 2014; Иванова, 2016; Brocks et al., 2017, 2018]. По мнению некоторых исследователей, катагенез не влияет на соотношение насыщенных стеранов  $C_{27}$  и  $C_{29}$  [Lewan et al., 1986]. Однако исследования аквагенного и террагенного ОВ показывают, что с ростом катагенеза или на контактах с интрузивными телами относительные содержания стеранов  $C_{27}$  и  $C_{29}$  выравниваются [Каширцев, 2003; Yang et al., 2017; Конторович и др., 2020]. Таким образом, близкие содержания  $C_{27}$  и  $C_{29}$  в битумоидах средней подсвиты хараютэхской свиты также могут указывать на высокий катагенез ОВ.

Обобщая информацию по пиролитическим и битуминологическим характеристикам ОВ, распределению стеранов, составу и распределению ароматических УВ, можно судить о высоких грациях катагенеза ОВ средней подсвиты хараютэхской свиты –  $МК_3^1$ – $МК_3^2$  (по шкале А.Э. Конторовича (1976)). Породы подсвиты генерировали не только нефть, но и газ.

По данным специалистов ВНИГРИ катагенез ОВ на границе непского и тирского горизонтов в низовьях р. Лена соответствует грациям  $МК_4$ – $МК_5$  (по шкале Н.Б. Вассоевича) [Баженова и др., 1981, 2014]. Согласно оценкам специалистов СНИИГГиМС катагенез ОВ хараютэхской свиты в скважине Дьяппальская-1 и на ручье Хатыстах соответствует грациям  $МК_2$ – $МК_3$  (по шкале Н.Б. Вассоевича) [Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021]. Новые данные показывают, что уровень катагенеза в последней оценке занижен.

Высокий катагенез ОВ средней подсвиты хараютэхской свиты может быть обусловлен не только региональным погружением вендских отложений, но и магматизмом на этой территории в венде и кембрии [Шпунт и др., 1979, 1982], а также, вероятнее всего, горизонтальным сжатием протерозойских, палеозойских

и мезозойских отложений во время формирования Верхояно-Чукотской складчатой области и Предверхоянского краевого прогиба в мезозойскую эру. Ранее зависимость катагенеза ОВ верхнепалеозойских и мезозойских отложений надвиговых структур Предверхоянского прогиба от влияния деформаций осадочного чехла была показана А.Ф. Сафроновым, Б.А. Соколовым, И.Д. Поляковой с коллегами и другими [Сафронов, 1975; Соколов, Япаскурт, 1982; Полякова, Соболева, 1991; Найденев, 2021].

На основании низких значений  $b_{\text{хл}}$  (0,001–0,021%) и  $\beta$  (0,1–2,7%, в одном образце 7,1%),  $S_1$  (<0,3 мг УВ/г породы) можно отнести битумоиды средней подсвиты хараютэхской свиты к остаточным (по [Конторович, 1976]). Это свидетельствует о протекавших процессах первичной миграции битумоидов. Высокие «нафтенные горбы» на газожидкостных хроматограммах, деметилированные 25-норгопаны, -трицикланы и -тетрацикланы, повышенные до 1 в некоторых образцах значения  $Pr/n-C_{17}$  и  $Pr/n-C_{18}$  указывают на процессы биодеградации битумоидов, протекавшие в открытом поровом и трещинном пространстве пород на контакте битумоидов с водой [Петров, 1984; Peters et al., 2005]. Как и в ОВ хатыспытской свиты, присутствие алканов и деметилированных терпанов в метано-нафтенных фракциях указывает на то, что битумоиды были сформированы в результате нескольких этапов генерации, последующей миграции и окисления в гипергенезе.

Молекулярный состав хлороформных экстрактов из битумов в карбонатных породах верхней подсвиты хараютэхской свиты (максимум нормальных алканов на  $n-C_{17}-C_{19}$ , присутствие 12- и 13-монометилалканов в следовых количествах), распределение стеранов ( $C_{29} \approx C_{27}$ ) и терпанов (гомогопаны  $C_{35} < C_{34}$ ,  $Ga < 0,04\%$ ), (см. таблицы 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3) свидетельствуют о генетической связи между рассеянным ОВ средней подсвиты хараютэхской свиты и исследованными битумами [Мельник, 2021; Мельник, Парфенова, 2021; Parfenova, Melnik, 2021]. Результаты анализов изотопного состава битумов ( $\delta^{13}C_{\text{орг}} = -31,5 \dots -29,5\%$ ) и рассеянного ОВ хараютэхской свиты ( $\delta^{13}C_{\text{орг}} = -35,4 \dots -29\%$ ) подтверждают это предположение (см. таблицу 4.1.1).

По геохимическим критериям породы средней подсвиты хараютэхской свиты могут рассматриваться в качестве нефтегазоматеринских. Они погружались на глубины, превышающие главную зону нефтеобразования, и за свою геологическую историю полностью исчерпали генерационный потенциал. С генерацией нафтидов органическим веществом средней подсвиты хараютэхской свиты связаны битумы в карбонатных породах верхней подсвиты хараютэхской свиты и песчаниках тюсерской свиты кембрия на Хараулахском выступе [Мельник, 2021; Мельник, Парфенова, 2021; Parfenova, Melnik, 2021].

***Геохимические предпосылки и прогноз нефтегазоносности вендских и нижнекембрийских отложений северо-востока Сибирской платформы.***

На территориях, прилегающих к Оленекскому поднятию, ОВ хатыспытской свиты достигло начала главной зоны нефтеобразования (см. главу 4). Здесь в коллекторах могут быть сосредоточены нефти, в том числе окисленные до битумов. В Суханской впадине, где современная глубина кровли неопротерозойских отложений достигает 3 км [Конторович и др., 2014, 2020], катаганез выше, чем  $МК_1^1$ , и соответствует главной зоне нефтеобразования [Каширцев и др., 2019]. В Лено-Анабарском прогибе к северу от Оленекского поднятия, катагенез ОВ хатыспытской свиты может достигать градаций апокатагенеза (Рисунок 6.3) [Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021]. На этой территории ОВ генерировало не только нефти, но и газ [Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021; Мельник и др., 2023]. Известно, что из горизонтов венда и кембрия в Лено-Анабарском прогибе были получены притоки пластовой воды, предельно насыщенной газом, дебитом от 31–83 м<sup>3</sup>/сут. до 404 м<sup>3</sup>/сут. (венд в скв. Чарчыкская-1) и 782 м<sup>3</sup>/сут. (кембрий в скв. Чырчыкская-1) (см. главу 1) [Геологический..., 1988; Комплексный..., 2010; Лежнин и др., 2021; Найденов, 2021]. В коллекторах на севере Предверхоаянского и Лено-Анабарского прогибов из-за влияния магматизма и внедрения мощных силлов диабазов в отложения венда и кембрия, а также деформаций, вероятно, стоит ожидать скопления сильно окисленных битумов по типу тех, что описаны для разрезов на Чекуровской антиклинали ((см. главу 1), [Гольдберг, 1981; Каширцев, 1988]) (см. рисунок 6.3).

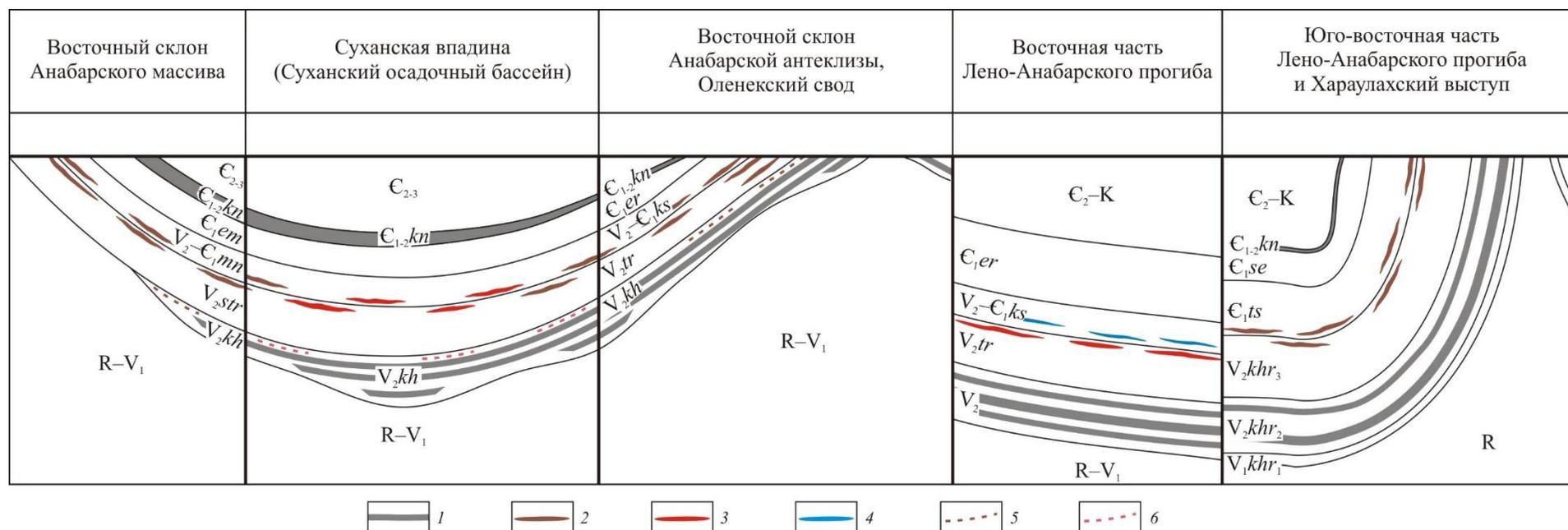


Рисунок 6.3 – Прогнозные схематические профили нефтегазоматеринских и нефтеносных комплексов венда и нижнего кембрия северо-востока Сибирской платформы.

Условные обозначения: 1 – уровни нефтегазоматеринских пород; 2 – установленные [Виноградов, 1962; Крылов и др., 1973; Иванов, 1979; Гольдберг, 1981; Каширцев, 1988, 2003; Каширцев и др., 2019] и предполагаемые скопления битумов; 3 – предполагаемые скопления нефти в Суханской впадине и Лено-Анабарском прогибе; 4 – предполагаемые скопления газа и газоконденсата в Лено-Анабарском прогибе; 5 – установленные рассеянные битумопроявления в породах хатыспытской свиты [Мельник и др., 2020; Мельник и др., 2023]; 6 – предполагаемые рассеянные нефтепроявления в породах хатыспытской свиты в Суханской впадине. Местные стратиграфические подразделения:  $V_2kh$  – хатыспытская свита;  $V_2khr$  – хараютэхская свита;  $V_2$  – глинисто-доломитовая толща;  $V_2-C_1mn$  – маныкайская свита;  $V_2-C_1ks$  – кессюсинская серия;  $C_1em$  – эмяксинская свита;  $C_1er$  – еркекетская свита;  $C_1ts$  – тюсерская свита;  $C_1se$  – сэктенская свита;  $C_{1-2}kn$  – куонамская свита

Сравнение оценок масштабов генерации и эмиграции нефти и газа из вендских нефтегазоматеринских пород северо-востока Сибирской платформы объемно-генетическим методом [Баженова и др., 1981, 2014; Соболев и др., 2019; Лежнин и др., 2021], показывает, что они существенно разнятся. Это, по-видимому, обусловлено недостатком первичной геологической информации (в первую очередь – скважинного материала), и соответственно, разным оконтуриванием области обогащенных ОВ пород венда.

Моделирование нефтегазоносных систем для количественной оценки масштабов генерации УВ требует создания структурно-литологической, геохимической и температурной моделей. Новые данные существенно дополняют представления о распространении в разрезах хатыспытской свиты и средней подсвиты хараютэхской свиты интервалов пород, обогащенных ОВ, их мощности, генерационный потенциал пород, природу и катагенез ОВ, и могут послужить основой для новых количественных оценок масштабов генерации жидких и газообразных УВ на этой территории, в том числе для создания геохимической модели при бассейновом моделировании [Каширцев и др., 2019; Мельник и др., 2020, 2023; Мельник, Парфенова, 2021; Parfenova, Melnik, 2021; Мельник, 2022]. Однако для создания непротиворечивых структурно-литологической и температурной моделей требуется детальное геолого-геохимическое и геофизическое изучение северо-востока Сибирской платформы для уточнения мощностей осадочных комплексов, реконструкции перерывов в осадконакоплении, длительности и глубины размывов.

Рассеянные нефтидопроявления в карбонатных и карбонатно-кремнистых породах хатыспытской свиты на Оленекском поднятии (см. рисунки 6.1, 6.2, 6.3) позволяют предполагать, что при благоприятных геологических условиях, скопления углеводородов будут обнаружены не только в вышележащих вендских и кембрийских отложениях, но и в разрезе самой хатыспытской свиты (главным образом, в ее верхних горизонтах) [Мельник и др., 2020; Мельник, 2022].

Скопления природных битумов на северо-востоке Сибирской платформы фиксируются в вендских и нижнекембрийских, верхнекембрийских, пермских

и мезозойских отложениях (см. раздел 1.5) [Граumberг, 1958, 1968; Иванов, 1979; Шпунт и др., 1979, 1982; Баженова и др., 1981; Геология нефти..., 1981; Гольдберг и др., 1981; Клубов, 1983; Каширцев, 1988, 2003, 2004; Каширцев и др., 2010, 2019]. Ниже рассмотрим вендско-нижнекембрийский комплекс.

На восточном склоне Анабарской антеклизы выделено Восточно-Анабарское битумное скопление (см. рисунок 6.3) [Гольдберг, 1981; Каширцев, 1988, 2003; Каширцев и др., 2019]. Битумы приурочены к вендским и кембрийским отложениям. Тип коллектора в вендских и кембрийских известняках и доломитах – трещинно-порово-кавернозный. Их фильтрационно-емкостные свойства характеризуются пористостью 3–5% и проницаемостью  $1-3 \times 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>. Сравнительно маломощные песчанистые интервалы нижнего кембрия (суммарно до 12 м) слагают коллектор порового типа и характеризуются пористостью на уровне 11–21%, проницаемостью  $25-3000 \times 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> [Данюшевская и др., 1969; Гольдберг, 1981].

Битумы на северо-западном склоне Оленекского поднятия (Центрально-Оленекское скопление) приурочены главным образом к трещиноватым и кавернозным доломитам туркутской свиты, а также к трещиноватым песчанистым известнякам и линзам песчаников кессюсинской серии [Иванов, 1979; Гольдберг, 1981; Каширцев, 1988, 2003; Каширцев и др., 2019]. Пористость песчаников составляет 4–10%, проницаемость –  $32-55 \times 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> [Гольдберг, 1981].

По данным В.А. Каширцева, в скважинах Чарчкская-1 и Хастахская-930 (см. рисунки 1.1.1, 6.1) битумопроявления встречены в вендских и кембрийских отложениях, где в породах отмечаются трещины, заполненные кальцитом и вязким битумом [Каширцев, 2003]. Из вендских отложений в Чарчкской скважине получен приток пластовых вод, предельно насыщенных газом, дебиты составляли до 404 м<sup>3</sup>/сут.

Анализ шлифов пород вендских отложений из керна скважин Чырчкская-1, Хастахская-930 и Бурская-3410, выполненный специалистами ИНГГ СО РАН [Вараксина, Шаваров, 2020], показал наличие многочисленных стилолитовых швов, каверн и трещин, заполненных битуминозным веществом,

при этом наиболее интенсивное битумонасыщение наблюдается в туркутской свите. Авторами также оценивались коллекторские свойства пород. Ими установлено, что пористость в карбонатных породах туркутской свиты обычно составляет около 5–7%, проницаемость – обычно не выше  $0,22 \times 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>, в некоторых образцах повышена до  $136–8000 \times 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>. Был сделан вывод, что верхневендские отложения на этой территории могут рассматриваться в качестве коллектора каверно-трещинного типа [Вараксина, Шаваров, 2020]. Маломощные прослои (от нескольких сантиметров до первых метров) песчаников в маастахской (венд) и маттайской (нижний кембрий) свитах характеризуются невысокими фильтрационно-емкостными свойствами (пористость 1–10%, проницаемость  $<1 \times 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>). Авторы предлагают относить их к коллекторам условно.

Природные битумы в разрезе венда и кембрия на Хараулахском выступе сосредоточены в карбонатных породах верхней подсвиты хараютэхской свиты (в кавернах) и в интервалах песчаников тюсерской свиты («*сплошное битумонасыщение*» по И.С. Гольдбергу (1981)), между которыми залегают пласты диабазов [Гольдберг, 1981; Каширцев, 1988].

В скважине Дьяппальская-1 битумопроявления в хараютэхской свите заметны только в микроскопическом масштабе. Анализ карбонатных пород в шлифах позволил оценить содержание битума в 3–7%, редко – в 10% («*битум желто-коричневый, аморфный, в виде прожилков; битум черный, метаморфизованный*») [Геологический..., 1988]. Как отмечает Л.Ф. Найденев (2021), при испытании вендских отложений в открытом стволе получен фильтрат бурового раствора, перебитый газом. В интервале 2595–2598 м по данным газового каротажа отмечались повышенные газопоказания до 1,2 абс. % при фоновом значении 0,2% [Геологический..., 1988]. Определение фильтрационно-емкостных свойств вендских и кембрийских пород в скважине Дьяппальская-1 и в разрезах Хараулахского выступа показало, что они характеризуются очень низкой пористостью (максимальные значения коэффициента пористости – 2%), и практически не проницаемы (коэффициент проницаемости –  $0,1 \times 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>) [Геологический..., 1988; Найденев, 2021].

Обобщая информацию по строению и характеристикам вендских и нижнекембрийских отложений, можно предполагать развитие карбонатных коллекторов трещинно-кавернозного и кавернозно-трещинного типов в туркутской свите на территориях, прилегающих к Оленекскому поднятию, в Лено-Анабарском прогибе, и в ее возрастных аналогах – старореченской свите на восточном склоне Анабарского массива и в Суханской впадине (см. рисунок 6.3). Роль флюидоупоров на этой территории могут играть аргиллиты и глинисто-карбонатные породы в разрезе кессюсинской серии.

Карбонатные коллекторы кавернозного типа в разрезе венда и венда-нижнего кембрия, вероятно, будут встречены на территории северной части Предверхоаянского краевого прогиба и в юго-восточной части Лено-Анабарского прогиба. Песчанистые коллектора порового типа в разрезе кессюсинской серии и ее возрастных аналогах могут быть распространены на территории всего северо-востока платформы. Однако, опираясь на опубликованные данные по геологии и стратиграфии этих отложений [Гольдберг, 1981; Мельников и др., 2005; Nagovitsin et al., 2015; Вараксина, Шаваров, 2020], можно предполагать, что их мощность и фильтрационно-емкостные свойства будут резко меняться по латерали. Практически непроницаемые глинисто-карбонатные и карбонатные породы кембрия [Найденов, 2021] могут выступать флюидоупором.

Результаты исследования и обобщение опубликованных данных показывает, что благоприятные геологические условия для реализации генерационного потенциала ОВ пород венда и формирования залежей углеводородов в вендских и нижнекембрийских отложениях, вероятно, будут установлены в Суханской впадине и Лено-Анабарском прогибе. Для уточнения оценки перспектив нефтегазоносности на территории Анабарской и Лено-Анабарской нефтегазоносных областей необходимо дальнейшее комплексное геолого-геохимическое и геофизическое изучение указанных структур [Каширцев и др., 2019; Мельник и др., 2020, 2023; Мельник, Парфенова, 2021; Parfenova, Melnik, 2021; Мельник, 2022].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации выполнен анализ распределения органического углерода и битумоидов пород в разрезах венда на северо-востоке Сибирской платформы, изучена природа органического вещества хатыспытской свиты и средней подсвиты хараютэхской свиты.

С применением современных физико-химических методов исследования на основе анализа представительной коллекции на породном (пиролиз, битуминология), молекулярном (газожидкостная хроматография, хромато-масс-спектрометрия) и атомном (изотопия углерода) уровнях оценен генерационный потенциал пород, выявлены особенности состава компонентов ОВ, реконструированы биологические источники и условия накопления, тип и катагенез ОВ вендских отложений Оленекского поднятия и Хараулахского выступа.

Показано, что состав и соотношения углеводородов битумоидов хатыспытской свиты контролировались, во-первых, обстановками осадконакопления в морском бассейне и составами биосообществ, во-вторых, условиями в осадках на этапе диагенеза. Предложены критерии для диагностики трех геохимических фаций. Первая характеризует слабо восстановительные (вероятно, субокислительные) условия, вторая – сильно восстановительные условия со стратификацией водного столба и сероводородным заражением придонных вод; третья выделяется в качестве переходной.

Установлено, что основными процессами, контролирующими современный состав и распределение насыщенных, ароматических УВ и дибензотиофенов битумоидов средней подсвиты хараютэхской свиты являются высокий катагенез (на уровне глубинной зоны газообразования) и гипергенез ОВ.

Выполнена оценка пород хатыспытской свиты и средней подсвиты хараютэхской свиты в качестве источника нефти и газа на северо-востоке Сибирской платформы. Показано, что они участвовали в нефтегазообразовании. На основе молекулярных характеристик битумоидов и изотопного состава  $C_{org}$  подтверждена генетическая связь между ОВ хатыспытской свиты и битумами

в туркутской свите и кессюсинской серии Центрально-Оленекского скопления, битумами в старореченской свите Восточно-Анабарского скопления, обоснована корреляция между ОВ средней подсвиты хараютэхской свиты и битумами в карбонатных породах верхней подсвиты хараютэхской свиты. Предполагается, что залежи нефти, связанные с реализацией генерационного потенциала пород венда, будут обнаружены в карбонатных и терригенных коллекторах вендских и палеозойских отложений в Суханской впадине, нефти и газа – в Лено-Анабарском прогибе.

Перспективы дальнейшей разработки темы: 1) исследование геохимии пород и ОВ вендских отложений из естественных обнажений (в бассейнах р. Керсюке к западу и р. Беркекит к востоку от р. Хорбусуонка) и скважин с применением современных методов и подходов, представленных в том числе в настоящей работе; 2) моделирование процессов генерации, миграции жидких и газообразных углеводородов породами венда; 3) уточнение количественной оценки нефтегазоносности осадочных комплексов северо-востока Сибирской платформы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасенков А.П. Уточнение палеогеографии севера Сибирской платформы с учетом новых данных / А.П. Афанасенков, А.В. Бордюг, А.М. Никишин, Н.В. Танинская, В.В. Шиманский, С.И. Бордунов // Геология нефти и газа. – 2018. – № 2. – С. 5-23. DOI: 10.31087/0016-7894-2018-2-5-23.
2. Бакин В.Е. Нефтегазоносность рифейских и вендских осадочных толщ Сибирской платформы / В.Е. Бакин, В.Н. Воробьев, В.М. Евтушенко, А.Э. Конторович, А.И. Ларичев, Н.В. Мельников, В.Д. Накаряков, Б.Л. Рыбьяков, В.С. Старосельцев // Нефтегазоносность Сибири и Дальнего Востока. Труды ИГиГ. – Вып. 513. – Новосибирск: Наука, 1981. – С. 25-42.
3. Баженова Т.К. Закономерности распространения вязких и твердых битумов Сибирской платформы / Т.К. Баженова, К.К. Макаров, Ю.И. Ипатов, Ю.М. Шуменова, Л.С. Беляева, Д.А. Биккенина // Закономерности формирования и размещения скоплений природных битумов. Труды ВНИГРИ. – 1979. – С. 97-115.
4. Баженова Т.К. Органическая геохимия палеозоя и допалеозоя Сибирской платформы и прогноз нефтегазоносности: монография / Т.К. Баженова, С.Н. Белецкая, Л.С. Беляева, Д.А. Биккенина, Н.Н. Гурко, А.В. Ивановская, Ю.И. Ипатов, У.О. Кичуева, К.К. Макаров, С.Г. Неручев, Г.М. Парпарова, Е.А. Рогозина, В.А. Рудаевская, И.Л. Соловьева, Е.М. Файззулина, А.И. Шапиро, В.К. Шиманский, Ю.М. Шуменкова, О.А. Арефьев, Н.Д. Гуляева, И.Б. Кулибакина, В.Т. Работнов, В.С. Прохоров, И.П. Шадский // Под ред. К.К. Макарова, Т.К. Баженовой. – Ленинград: Недра, 1981. – 211 с.
5. Баженова О.К. Генетические особенности нефтей верхнего протерозоя / О.К. Баженова, О.А. Арефьев, Б.А. Соколов // Доклады академии наук. – 1994. – Т. 337. – № 3. – С. 371-375.
6. Баженова О.К. Геология и геохимия нефти и газа / О.К. Баженова, Ю.К. Бурлин, Б.А. Соколов, В.Е. Хаин // Под ред. Б.А. Соколова. – Москва: МГУ, 2000. – 384 с.
7. Баженова Т.К. Верхний протерозой Сибирской платформы – основной источник нефтегазоносности ее домезозойского мегабассейна [Электронный

ресурс] / Т.К. Баженова, М.В. Дахнова, С.В. Можегова // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2011. – Т. 6. – № 2. – С. 1-21. Режим доступа: [https://ngtp.ru/rub/1/17\\_2011.pdf](https://ngtp.ru/rub/1/17_2011.pdf)

8. Баженова Т.К. Нефтематеринские формации, нефти и газы докембрия и нижнего-среднего кембрия Сибирской платформы: монография / Т.К. Баженова, М.В. Дахнова, Т.П. Жеглова, В.С. Лебедев, С.В. Можегова, В.Н. Ларкин, Е.С. Назарова, Г.С. Нечитайло, Э.М. Грайзер, С.М. Киселев, Ю.А. Киселева, Е.А. Горюнова, Л.С. Борисова // Под ред. А.И. Варламова, А.П. Афанасенков – Москва: ВНИГНИ, 2014. – 128 с.

9. Баженова Т.К. Нефтегазоматеринские формации древних платформ России и нефтегазоносность [Электронный ресурс] / Т.К. Баженова // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2016. – Т. 11. – № 4. – Режим доступа: [https://www.ngtp.ru/rub/1/45\\_2016.pdf](https://www.ngtp.ru/rub/1/45_2016.pdf)

10. Баженова Т.К. Связь изотопного состава углерода органического вещества с его историко-генетическими особенностями (Сибирская платформа) [Электронный ресурс] / Т.К. Баженова, С.И. Голышев, Н.Л. Падалко // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2019. – № 35. – 12 с. Режим доступа: [https://ngtp.ru/upload/iblock/b78/35\\_2019.pdf](https://ngtp.ru/upload/iblock/b78/35_2019.pdf).

11. Баженова О.К. Особенности состава биомаркеров докембрийского органического вещества Восточно-Европейской платформы / О.К. Баженова, О.А. Арэфьев // Геохимия. – 1998. – № 3. – С. 286-294.

12. Бакай Е.А. Литолого-геохимическая характеристика пермского нефтегазоносного комплекса Лено-Анабарского прогиба (на примере скважины Усть-Оленекская-2370) / Е.А. Бакай, М.Е. Смирнова, Н.И. Коробова, Д.В. Надежкин // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2016. – № 1. – С. 71-81.

13. Бахтуров С.Ф. Битуминозные толщи верхнего докембрия и кембрия нижнего течения р. Нелегер (Хараулах) / С.Ф. Бахтуров // Проблемы образования осадочных формации. Сборник научных трудов ИГиГ СО АН СССР. – Новосибирск, 1987. – С. 68-79.

14. Битерман И.М., Горшкова Е.Р. Новые данные по стратиграфии синийских отложений Оленекского и Куойско-Далдынского поднятий / И.М. Битерман, Е.Р. Горшкова // Совещание по стратиграфии отложений позднего докембрия Сибири и Дальнего Востока. Тезисы докладов. – Новосибирск, 1962. – С. 58-60.
15. Богородская Л.И. Кероген: Методы изучения, геохимическая интерпретация / Л.И. Богородская, А.Э. Конторович, А.И. Ларичев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005. – 254 с.
16. Борисова Л.С. Комплекс химических и физических методов получения и исследования компонентов органического вещества пород и нефтидов: Учебно-методическое пособие / Л.С. Борисова, Е.А. Фурсенко, Е.А. Костырева, И.Д. Тимошина. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2019. – 84 с.
17. Вараксина И.В. Литология и коллекторские свойства докембрийских отложений Лено-Анабарской нефтегазоносной области / И.В. Вараксина, Р.Д. Шаваров / Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 159-169.
18. Вассоевич Н.Б. Теория осадочно-миграционного происхождения нефти (исторический обзор и современное состояние) / Н.Б. Вассоевич // Известия АН СССР, серия геология. – 1967. – № 11. – С. 135-156.
19. Вассоевич Н.Б. Происхождение нефти / Н.Б. Вассоевич // Вестник МГУ. Серия. 4. Геология. – 1975. – № 5. – С. 3-23.
20. Вендская система. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование. Т.2. Стратиграфия и геологические процессы // Под ред. Б.С. Соколова, М.А. Федонкина. – Москва: Наука, 1985. – 238 с.
21. Виноградов В.А. Стратиграфия синийских отложений северо-западной части Якутской АССР / В.А. Виноградов, В.Я. Кабаньков, А.А. Красильщиков, Э.Н. Эрлих // Совещание по разработке стратиграфических схем Якутской АССР. Тезисы докладов. – Ленинград, 1961. – С. 21-23.

22. Виноградов В.А. Стратиграфия синийских и кембрийских отложений Северного Хараулаха / В.А. Виноградов // Сборник статей по палеонтологии и биостратиграфии. Труды НИИГА. – 1962. – Вып. 28. – С. 5-23.
23. Винокур Б.Г. «Холодная» и «ультразвуковая» экстракции битумоидов из пород / Б.Г. Винокур, А.Э. Конторович // Вопросы литологии и геохимии Сибири. Труды СНИИГГиМС. – 1967. – Вып. 46. – С. 195-206.
24. Вишневская И.А. Sr-изотопные характеристики Хорбусуонской серии венда Оленекского поднятия (северо-восток Сибирской платформы) / И.А. Вишневская, Б.Б. Кочнев, Е.Ф. Летникова, В.Ю. Киселева, Н.И. Писарева // Доклады РАН. – 2013. – Т. 449. – № 3. – С. 317-321.
25. Воданюк С.А. Проблемные вопросы стратиграфии вендских отложений бассейна р. Хорбусуонка (Оленекское поднятие) / С.А. Воданюк // Поздний докембрий и ранний палеозой Сибири. Сибирская платформа и ее южное складчатое обрамление. Сборник научных трудов. – Под ред. В.В. Хоментовского, В.Ю. Шенфиля. – ИГиГ СО АН СССР, Новосибирск, 1987. – С. 3-17.
26. Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода / Э.М. Галимов. – Москва: Недра, 1968. – 224 с.
27. Галимов Э.М. Природа биологического фракционирования изотопов / Э. М. Галимов. – Москва: Наука, 1981. – 247 с.
28. Геология нефти и газа Сибирской платформы: монография / А.С. Анциферов, В.Е. Бакин, И.П. Варламов, В.И. Вожов, В.Н. Воробьев, А.В. Гольберт, В.В. Гребенюк, М.П. Гришин, Т.И. Гурова, Д.И. Дробот, А.Э. Конторович, В.Л. Кузнецов, В.М. Лебедев, И.Г. Левченко, М.М. Мандельбаум, Н.В. Мельников, К.И. Микуленко, Г.Д. Назимков, В.Д. Накаряков, И.Д. Полякова, Б.Л. Рыбьяков, В.Е. Савицкий, В.В. Самсонов, О.Ф. Стасова, В.С. Старосельцев, В.С. Сурков, А.А. Трофимук, Э.Э. Фотиади, А.В. Хоменко // Под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука. – Москва: Недра, 1981. – 552 с.
29. Геохимия нефтегазоносных толщ кембрия Сибирской платформы // Под ред. А.Э. Конторовича. – Труды СНИИГГиМС. – 1972. – Вып. 139. – 111 с.

30. Геохимия органического вещества нефтегазоносных отложений Западной Якутии / под. ред. Е.И. Бодунова. – Новосибирск, Наука, 1984. – 113 с.
31. Гольдберг И.С. Основные закономерности размещения битумов на территории СССР / И.С. Гольдберг – Труды ВНИГРИ. – 1979. – С. 52-96.
32. Гольдберг И.С. Природные битумы СССР (закономерности формирования и размещения) / И.С. Гольдберг. – Ленинград: Недра, 1981. – 196 с.
33. Гордадзе Г.Н. Органическая геохимия углеводородов: Учебн. пособие для вузов: В 2 кн. Кн. 2 / Г.Н. Гордадзе, М.В. Гируц, В.Н. Кошелев. – Москва: РГУ, 2013. – 303 с.
34. Гражданкин Д.В. История развития верхневендского моря северо-востока Сибирской платформы / Д.В. Гражданкин, В.И. Рогов // Фундаментальные проблемы изучения вулканогенно-осадочных, терригенных и карбонатных комплексов: Материалы Всероссийского литологического совещания, посвященного памяти А.Г. Коссовской и И.В. Хворовой (г. Москва, 11-12 ноября 2020 г.). – Москва: ГЕОС, 2020. – С. 45-49.
35. Грамберг И.С. Геохимические исследования как один из методов поисков генетических признаков нефтематеринских толщ (на примере Арктических районов СССР) / И.С. Грамберг // Нефтегазоносность Севера Сибири. Труды. НИИГА. – 1958. – Вып. 92. – С. 171-182.
36. Грамберг И.С. К вопросу о дальнейшем направлении нефтепоисковых работ в основных перспективных районах севера Сибири / И.С. Грамберг, М.К. Калинин, П.С. Пук, Д.С. Сороков // Сб. статей по геологии и нефтегазоносности Арктики. Труды института геологии Арктики. – 1961. – Т. 123. Вып. 16. – С. 95-101.
37. Грамберг И.С. Нефтеносные формации северной части Средней Сибири / И.С. Грамберг // Геологическое строение и нефтегазоносность восточной части Сибирской платформы и прилегающих районов: материалы Всесоюзного совещания по оценке нефтегазоносности территории Якутии. – Москва: Недра, 1968. – С. 41-47.

38. Грамберг И.С. Основные проблемы нефтегазоносности Советской Арктики / И.С. Грамберг, В.Н. Соколов, Д.С. Сороков // Проблемы геологии полярных областей Земли: Сборник статей. – Ленинград, 1974. – С. 5-10.
39. Граусман В.В. а Отложения верхнего докембрия Оленекского поднятия по материалам глубокого бурения / В.В. Граусман // Тихоокеанская Геология. – 1995. – Т. 14. – № 4. – С. 133-136.
40. Граусман В.В. б Геологический разрез Усть-Оленекской скв. 2370 (инт. 3605-2700) В.В. Граусман // Тихоокеанская Геология. – 1995. – Т. 14. – № 4. – С. 137-140.
41. Гребенюк В.В. Прогноз зон нефтегазонакопления в северной части краевых депрессий Сибирской платформы / В.В. Гребенюк, А.Д. Луговцов, В.Я. Шерихора // Закономерности строения и локальный прогноз зон нефтегазонакопления на Сибирской платформе. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1985. – С. 104-117.
42. Губин И.А. К сейсмогеологической модели строения Анабаро-Оленекской зоны / И.А. Губин, В.А. Конторович // Георесурсы. – 2021. – Т. 23. – № 1. – С. 70-77.
43. Гусев А.И. Геология, угленосность и нефтеносность низовьев реки Оленек / А.И. Гусев // Труды НИИГА. – 1950. – Т. 1. – 100 с.
44. Данюшевская А.И. Геохимия органического вещества верхнепротерозойских и кембрийских отложений северо-востока Сибирской платформы / А.И. Данюшевская, Т.Н. Копылова, Д.С. Яшин, Г.Л. Арсеньева // Сборник статей по геохимии осадочных пород. Труды НИИГА. – 1969. – Т. 161. – Вып. 4. – С. 68-156.
45. Дахнова М.В. Генерационные характеристики ОВ и распределение биомаркеров в битумоидах нефтематеринских пород рифея, венда и кембрия Сибирской платформы / М.В. Дахнова, Т.П. Жеглова, С.В. Можегова // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5-6. – С. 953-961.

46. Демочкидов К.К. Основные черты геологического строения Лено-Оленекского района / К.К. Демочкидов // Сборник статей по геологии Арктики. Труды НИИГА. – Москва: Госгеолтехиздат, 1956. – Т. 89. – Вып. 6. – С. 22-37.
47. Жарков М.А. Особенности размещения черносланцевых формаций позднего докембрия и кембрия в Евразии / М.А. Жарков, С.Ф. Бахтуров // Геология и геофизика. – 1989. – № 4. – С. 3-10.
48. Журавлев В.С. Литолого-стратиграфическое подразделение кембрийских отложений Оленекского сводового поднятия / В.С. Журавлев, Д.С. Сороков // Сборник статей по геологии Арктики. Труды НИИГА. – 1954. – Т. 43. – Вып. 3. – С. 27-48.
49. Журавлева З.А. Онколиты и катаграфии рифея и нижнего кембрия Сибири и их стратиграфическое значение / З.А. Журавлева. – Труды ГИ АН СССР, 1964. – Вып. 114. – 100 с.
50. Иванов В.Л. Оленекское месторождение битумов / В.Л. Иванов. – Ленинград: Недра, 1979. – 104 с.
51. Иванова И.А. Геохимия органического вещества отложений Березовской впадины (Сибирская платформа) [Электронный ресурс] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2015. – Т.10. – №3. Режим доступа: [http://www.ngtp.ru/rub/1/27\\_2015.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/1/27_2015.pdf)
52. Иванова И.А. Геохимия органического вещества неопротерозоя Березовская впадина (сералахская свита, Сибирская платформа) / И.А. Иванова // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 9. – С. 1698-1706.
53. Изотопная масс-спектрометрия легких газообразующих элементов / Проблемы аналитической химии. Т. 15 // Под ред. В.С. Севастьянова. – Москва: ФИЗМАЛИТ, 2011. – 240 с.
54. Кабаньков В.Я. К вопросу о возрасте древних толщ северо-востока Сибирской платформы / В.Я. Кабаньков // Сборник статей по геологии Арктики. Труды НИИГА. – 1956. – Т. 89. – Вып. 6. – С. 38-41.

55. Кабаньков В.Я. Результаты геологоразведочных работ по поискам нефти в Лено-Оленекской области / В.Я. Кабаньков // Нефте-газоносность Севера Сибири. Труды НИИГА. – 1958. – Т. 92. – 120-133.
56. Кальвин М. Химическая эволюция / М. Кальвин. – Москва: Мир, 1971. – 238 с.
57. Карлова Г.А. Новые данные о переходных к кембрию отложениях бассейна р. Хорбусуонка (Оленекское поднятие) / Г.А. Карлова, С.А. Воданюк // Стратиграфия позднего докембрия и раннего палеозоя Сибири. Венд и рифей / Под ред. В.В. Хоментовского. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1985. – С. 3-13.
58. Карта нефтегазоносности территории Российской Федерации по состоянию на 01.01.2017 г. // Под ред. П.Н. Мельникова. – Москва: ВНИГНИ, 2021.
59. Каширцев В.А. О генезисе верхнепалеозойских нефтидов Лено-Оленекского междуречья / В.А. Каширцев, А.Н. Изосимова, О.Н. Чалая // Литология и геохимия осадочных толщ Якутии. – Новосибирск: Наука, 1975. – С. 114-130.
60. Каширцев В.А. Особенности молекулярного состава природных битумов Сибирской платформы / В.А. Каширцев // Геология и геофизика. 1984. – № 9. – С. 78-88.
61. Каширцев В.А. Природные битумы северо-востока Сибирской платформы / В.А. Каширцев. – Якутск, 1988. – 103 с.
62. Каширцев В.А. Биодеградация биомаркеров в природных битумах Оленекского поднятия / В.А. Каширцев, Р.П. Филп, Дж. Аллен, А. Гальвес-Синибальди, И.Н. Зуева, О.Н. Чалая, И.Н. Андреев // Геология и геофизика. – 1993. – № 6 – С. 44-55.
63. Каширцев В.А. Генетические семейства нефтидов востока Сибирской платформы / В.А. Каширцев, Р.П. Филп, О.Н. Чалая, И.Н. Зуева, Г.С. Трущелева // Отечественная геология. – 1997. – № 8. – С. 28-30.
64. Каширцев В.А. Органическая геохимия нефтидов востока Сибирской платформы: монография / В.А. Каширцев // Под ред. А.Э. Конторовича. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003. – 160 с.

65. Каширцев В.А. Генетические семейства верхнедокембрийских и кембрийских нефтей (нафтидов) на востоке Сибирской платформы / В.А. Каширцев // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45. – № 7. – С. 895-900.
66. Каширцев В.А. Геохимия нефтей востока Сибирской платформы / В.А. Каширцев, А.Ф. Сафронов, А.Н. Изосимова, О.Н. Чалая, И.Н. Зуева, Г.С. Трущелева, С.Х. Лифшиц, О.С. Карелина. – ЯНЦ СО РАН – Якутск, 2009а. – 180 с.
67. Каширцев В.А. Новый гомологический ряд молекул-биометок из вендских отложений Бирюсинского Присяянья / В.А. Каширцев, Ю.К. Советов, Е.А. Костырева, В.Н. Меленевский, А.Ю. Кучкина // Геология и геофизика. – 2009б. – Т. 50. – № 6. – С. 698-702.
68. Каширцев В.А., Месторождения природных битумов на северо-востоке Сибирской платформы (Российский сектор Арктики) / В.А. Каширцев, А.Э. Конторович, В.Л. Иванов, А.Ф. Сафронов // Геология и геофизика. 2010. – Т. 51. – № 1. – С. 93-105.
69. Каширцев В.А. Новые моноароматические стероиды в органическом веществе зоны апокатагенеза / В.А. Каширцев, А.Н. Фомин, Н.П. Шевченко, К.В. Долженко // Доклады РАН. – 2016. – Т. 469. – № 4. – С. 465-469.
70. Каширцев В.А. Биомаркеры-фенантрены в органическом веществе докембрийских и фаненрозойских отложений и в нефтях Сибирской платформы / В.А. Каширцев, Т.М. Парфенова, А.К. Головкин, Б.Л. Никитенко, И.Н. Зуева, О.Н. Чалая // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 10. – С. 1720-1729.
71. Каширцев В.А. Прямые признаки нефтегазоносности и нефтематеринские отложения Суханского осадочного бассейна Сибирской платформы / В.А. Каширцев, Т.М. Парфенова, С.А. Моисеев, А.В. Черных, Д.А. Новиков, Л.М. Бурштейн, К.В. Долженко, В.И. Рогов, Д.С. Мельник, И.Н. Зуева, О.Н. Чалая // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60 – № 10. – С. 1472-1487.
72. Клубов Б.А. Природные битумы Севера / Б.А. Клубов. – Москва: Наука, 1983. – 208 с.

73. Кодина Л.А. Формирование изотопного состава углерода органического вещества гумусового и сапропелевого типов в морских отложениях / Л.А. Кодина, Э.М. Галимов // Геохимия. – 1984. – №11. – С. 1742-1756.

74. Колосов П.Н. Новая находка *Beltanelliformis* в венде Хараулахских гор в Восточной Сибири / П.Н. Колосов // Наука и образование. – 2016. – № 3. – С. 13-16.

75. Комар В.А. Строматолиты верхнекембрийских отложений севера Сибирской платформы и их стратиграфическое значение / Комар В.А. – Труды ГИ АН СССР. – 1966. – Вып. 154. – 122 с.

76. Конторович А.Э. Нефтепроизводящие толщи и условия образования нефти в мезозойских отложениях Западно-Сибирской низменности // А.Э. Конторович, Н.М. Бабина, Л.И. Богородская, Б.Г. Винокур, Ю.Г. Зимин, М.М. Колганова, Л.Ф. Липницкая, А.Д. Луговцов, В.М. Мельникова, Г.М. Парпарова, Е.А. Рогозина, О.Ф. Стасова, П.А. Трушков, А.С.Фомичев. – Новосибирск: СНИИГГиМС. Серия Нефтяная геология. – 1967. – Вып. 50. – 223 с.

77. Конторович А.Э. Геохимические методы количественного прогноза нефтегазоносности / А.Э. Конторович // Труды СНИИГГиМС. – 1976. – Вып. 229. – 250 с.

78. Конторович, А. Э. Исторический подход при количественной оценке перспектив нефтегазоносности / А. Э. Конторович // Труды СНИИГГиМС. – 1977. – Вып. 250. – С. 46-57.

79. Конторович А.Э. Закономерности накопления органического вещества на территории Сибирской платформы в докембрии и кембрии / А.Э. Конторович, В.М. Евтушенко, Н.Ф. Ивлев, А.И. Ларичев // Литология и геохимия нефтегазоносных толщ Сибирской платформы. – Москва: Наука, 1981. – С. 19-42.

80. Конторович А.Э. Закономерности фракционирования изотопов углерода в седикахитах / А.Э. Конторович, Л.И. Богородская, С.И. Голышев // Геология и геофизика. – 1985а. – Т. 26. – № 9. – С. 34-42.

81. Конторович А.Э. Распределение стабильных изотопов углерода в седикахитах различной генетической природы / А.Э. Конторович,

Л.И. Богородская, С.И. Голышев // Геология и геофизика. – 1985б. – Т. 26. – № 7. – С. 3-11.

82. Конторович А.Э. Изотопный состав углерода рассеянного органического вещества и битумоидов и некоторые спорные вопросы теории образования нефти / А.Э. Конторович, И.А. Верховская, И.Д. Тимошина, А.С. Фомичев // Геология и геофизика. – 1986. – № 5. – С. 3-13.

83. Конторович А.Э. Генетические связи органического вещества баженовской свиты и нефтей Среднего Приобья / А.Э. Конторович, О.Ф. Стасова, В.Е. Андрусевич, Дж.М. Молдован, К.Е. Петерс, Д.Дж. Демейсон, Б.Дж. Хьюзинге // Междунар. симп. "Бассейны черносланц. седиментации и связанные с ними полез. ископаемые" (Новосибирск, 5-9 августа, 1991 г.). – Новосибирск, 1991. – 137с.

84. Конторович А.Э. Нефтегазоносные бассейны и регионы Сибири. Выпуск 5. Тунгусский бассейн: монография / А.Э. Конторович, В.С. Старосельцев, Сурков В.С., А.В. Хоменко, А.С. Ефимов, С.А. Кашенко, А.И. Ларичев, Н.В. Мельников, В.А. Крилин, В.Д. Накаряков, В.Г. Сибгатуллин // Под ред. А.Э. Конторовича. – Новосибирск, 1994а. – 91 с.

85. Конторович А.Э. Нефтегазоносные бассейны и регионы Сибири. Вып. 4. Лено-Виллюйский бассейн / А.Э. Конторович, В.В. Гребенюк, Г.С. Фрадкин, В.Е. Бакин, Т.А. Дивина, А.М. Зотеев, В.Д. Матвеев, А.И. Матвеев, К.И. Микуленко, И.Д. Полякова, А.Ф. Сафронов, Е.И. Соболева, В.Б. Хмелевский // Под ред. А.Э. Конторовича. – Новосибирск, 1994б. – 108 с.

86. Конторович А.Э. Биогопаны в отложениях докембрия северо-востока Сибирской платформы / А.Э. Конторович, В.А. Каширцев, Р.П. Филп // Доклады РАН. – 1995. – Т. 345. – № 1. – С. 106-110.

87. Конторович А.Э. Глобальные закономерности нефтегазоносности докембрия Земли / А.Э. Конторович, А.А. Трофимук, А.К. Башарин, С.Ю. Беляев, Г.С. Фрадкин // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37. – № 8. – С. 6-42.

88. Конторович А.Э. Осадочно-миграционная теория нефтидогенеза: состояние на рубеже XX и XXI вв., пути дальнейшего развития / А.Э. Конторович // Геология нефти и газа. – 1998. – № 10. – С. 8-16.

89. Конторович А.Э. Разновозрастные очаги нефтидообразования и нефтидонакопления на Северо-Азиатском кратоне / А.Э. Конторович, С.Ф. Бахтуров, А.К. Башарин, С.Ю. Беляев, Л.М. Бурштейн, А.А. Конторович, В.А. Кринин, А.И. Ларичев, Году Ли, В.Н. Меленевский, И.Д. Тимошина, Г.С. Фрадкин, А.В. Хоменко // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 11 – С. 1676-1693.

90. Конторович А.Э. Осадочно-миграционная теория нефтидогенеза / А.Э. Конторович // ТЭК: Топливо-энергетический комплекс. – 2000. – № 3. – С. 47-49.

91. Конторович А.Э. Фенантрены, ароматические стераны и дибензотиофены в юрских отложениях Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна и их значение для органической геохимии / А.Э. Конторович, В.Н. Меленевский, Е.Н. Иванова, А.Н. Фомин // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45. – № 7 – С. 873-883.

92. Конторович А.Э. Ароматические углеводороды-биомаркеры и дибензотиофены в битумоидах куонамской свиты (северо-восток Сибирской платформы) / А.Э. Конторович, Т.М. Парфенова, Е.Н. Иванова // Доклады РАН – 2005. – Т. 402. – № 6. – С. 804-806.

93. Конторович А.Э. Предъенисейская нефтегазоносная провинция – новый перспективный объект поисков нефти и газа в Сибири / А.Э. Конторович, В.А. Конторович, Ю.Ф. Филиппов, С.Ю. Беляев, Л.М. Бурштейн, В.И. Вальчак, А.А. Евграфов, А.С. Ефимов, В.А. Каштанов., А.А. Конторович, В.Н. Петров, А.В. Хоменко // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2006. – № 5–6. – С. 9-23.

94. Конторович А.Э. Литология и органическая геохимия венда Предъенисейской субпровинции (по результатам бурения скв. Восток-3) / А.Э. Конторович, Е.А. Костырева, С.В. Сараев, В.Н. Меленевский, А.Н. Фомин // Геология и геофизика. – 2011. – Т.52 – № 9. – С. 1213-1221.

95. Конторович А.Э. Насыщенные углеводороды-биомаркеры верхнего протерозоя Алданской антеклизы / А.Э. Конторович, И.Д. Тимошина, Е.А. Фурсенко // Геология нефти и газа. – 2014. – № 1. – С. 139-143.
96. Конторович А.Э. Закономерности преобразования террагенного органического вещества в мезо- и апокатагенезе / А.Э. Конторович, К.В. Долженко, А.Н. Фомин // Геология и геофизика. – 2020. – Т. 61. – № 8. – С. 1093-1108.
97. Конторович В.А. Структурно-тектоническая характеристика и модель геологического строения неопротерозойско-фанерозойских отложений Анабаро-Ленской зоны / В.А. Конторович, А.Э. Конторович, И.А. Губин, А.М. Зотеев, В.В. Лапковский, Н.А. Малышев, М.В. Соловьев, Г.С. Фрадкин // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 8. – С. 1253-1274.
98. Конторович В.А. Структурно-тектоническая характеристика Лено-Анабарского региона / В.А. Конторович, А.Э. Конторович, С.А. Моисеев, М.В. Соловьев // Геология нефти и газа. – 2014. – № 1. – С. 74-82.
99. Конторович В.А. Геологическое строение и сейсмогеологическая характеристика континентальной окраины Сибирской платформы и шельфа моря Лаптевых [Электронный ресурс] / В.А. Конторович, А.Ю. Калинин, Л.М. Калинина, М.В. Соловьев // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2020. – Т. 15. – № 4. Режим доступа: [https://www.ngtp.ru/upload/iblock/07a/39\\_2020.pdf](https://www.ngtp.ru/upload/iblock/07a/39_2020.pdf)
100. Конторович В.А. Сейсмогеологическая и структурно-тектоническая характеристика континентальной окраины сибирской платформы (Хатангско-Ленское междуречье) / В.А. Конторович, А.Э. Конторович, А.Ю. Калинин, Л.М. Калинина, В.В. Лапковский, Б.В. Лунев, С.А. Моисеев, М.В. Соловьев // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 8. – С. 1153-1171.
101. Конторович В.А. Сейсмогеологическая характеристика и стратификация геологического разреза в арктических регионах Сибирской платформы и на шельфе моря Лаптевых / В.А. Конторович, А.Э. Конторович // Доклады РАН. Науки о Земле. – 2021. – Т. 496. – № 1. – С. 94-100.

102. Конторович В.А. Структурно-тектоническая характеристика Лено-Анабарского региона / В.А. Конторович, А.Э. Конторович, С.А. Моисеев, М.В. Соловьев // Геология нефти и газа. – 2014. – № 1. – С. 74-82.

103. Копылова Т.Н. О химическом составе битумов пермских и кембрийских отложений Оленекского поднятия / Т.Н. Копылова // Сборник статей по геологии и нефтегазоносности Арктики. – Труды НИИГА. – 1962. – С. 103-109.

104. Коробов М.Н. Нижний кембрий Хараулаха / М.Н. Коробов // Известия АН СССР. Серия геология. – 1963. – № 4. – С. 35-51.

105. Кочнев Б.Б. Об арктической границе Сибирской платформы в кембрии / Б.Б. Кочнев, В.И. Паверман, Г.А. Карлова // Тектоника и геодинамика континентальной и океанической литосферы: общие и региональные аспекты: Материалы XLVII Тектонического совещания. – Москва: ГЕОС, 2015. – Т. 1 – С. 226-230.

106. Кочнев Б.Б. Венд востока Лено-Анабарского прогиба (северо-восток Сибирской платформы): новые изотопно-геохимические и геохронологические данные, возраст и корреляция / Б.Б. Кочнев, А.Б. Кузнецов, Б.Г. Покровский, В.И. Паверман // Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики: Материалы LII Тектонического совещания. – Москва: ГЕОСМ, 2020. – Т. 1 – С. 349-353.

107. Кочнев Б.Б. Sr-изотопная хеостратиграфия и Pb-Pb возраст карбонатных отложений рифея Хараулахского поднятия (северо-восточная окраина Сибирской платформы) / Б.Б. Кочнев, А.Б. Кузнецов, Д.Р. Ситкина, А.Ю. Крамчанинов // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 3. – С. 466-478. DOI: 10.15372/GiG2019141

108. Кочнев Б.Б. С- и Sr-изотопная хеостратиграфия переходных отложений верхнего протерозоя–нижнего кембрия Лено-Анабарского прогиба (северо-восток Сибирской платформы) / Б.Б. Кочнев, Б.Г. Покровский, А.Б. Кузнецов // Геодинамика и тектонофизика. – 2023. – Т. – 14. – № 3. – 0698. DOI:10.5800/GT-2023-14-3-0698.

109. Крылов И.Н. Рифейские отложения низовьев р. Лена / И.Н. Крылов, И.Г. Шаповалова, П.Н. Колосов, М.А. Федонкин // Советская геология. – 1971. – № 7. – С. 85-95.
110. Лежнин Д.С. Перспективы нефтегазоносности и освоения углеводородного сырья Хатангско-Оленекского междуречья / Д.С. Лежнин, Д.В. Миляев, П.Н. Соболев, Д.И. Душенин, А.А. Самохин // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2020. – № 3. – 110-122.
111. Лежнин Д.С. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Рифей-Палеозойских отложений Хатангско-Ленского междуречья / Д.С. Лежнин, А.П. Афанасенков, П.Н. Соболев, Л.Ф. Найденов // Геология нефти и газа. – 2021. – № 4. – С. 7-28.
112. Леонов Б.Н. Особенности тектонического развития Оленекского поднятия в позднем докембрии / Б.Н. Леонов, И.М. Битерман, Л.М. Натапов // Доклады Академии наук СССР. – 1965. – Т. 161. – № 5. – С. 1173-1176.
113. Лопатин Н.В. Пиролиз в нефтегазовой геохимии / Н.В. Лопатин, Т.П. Емец. – Москва: Наука, 1987. – 144 с.
114. Лучинина В.А. Биостратиграфия верхнего венда–нижнего кембрия разреза р. Сухариха (Сибирская платформа) / В.А. Лучинина, И.В. Коровников, Д.П. Сипин, А.В. Федосеев // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 8. – С. 1346-1358.
115. Меленевский В.Н. Методические рекомендации по применению пиролитических методов моделирования в органической геохимии // В.Н. Меленевский – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1991. – 50 с.
116. Мельник Д.С. Геохимия насыщенных углеводородов-биомаркеров рассеянного органического вещества хатыспытской свиты неопротерозоя (северо-восток Сибирской платформы) / Д.С. Мельник, Т.М. Парфенова, В.И. Рогов // Актуальные проблемы геологии нефти и газа Сибири: Материалы 2-й Всероссийской научной конференции молодых ученых и студентов, посвященной 85-летию акад. А.Э. Конторовича (г. Новосибирск, 12-13 марта 2019 г.) – ИПЦ НГУ, Новосибирск, 2019. – С. 96-99.

117. Мельник Д.С. Биодegradированные рассеянные битумы в породах хатыспытской свиты венда (неопротерозоя) на северо-востоке Сибирской платформы / Д.С. Мельник, Т.М. Парфенова, В.И. Рогов // Георесурсы. – 2020. – Т. 22. – № 2. – С.37-44.

118. Мельник Д.С. Геохимия ароматических углеводородов и дибензотиофенов битумоидов хатыспытской свиты (неопротерозой, Сибирская платформа) / Д.С. Мельник // Химия нефти и газа: Материалы XI международной конференции, посвященной 50-летию Института химии нефти СО РАН (г. Томск, 28 сентября - 2 октября 2020 г.) – ИОА СО РАН, Томск, 2020. – С. 25-25.

119. Мельник Д.С. Геохимия битумов из пород верхней подсвиты хараютэхской свиты венда (северо-восток Сибирской платформы) / Д.С. Мельник // Материалы 59-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2021: Геология (г. Новосибирск, 12-23 апреля 2021 г.). – ИПЦ НГУ, Новосибирск, 2021. – С. 79-79.

120. Мельник Д.С. Органическая геохимия потенциально нефтегазопроизводящих пород средней подсвиты хараютэхской свиты неопротерозоя (северо-восток Сибирской платформы) / Д.С. Мельник, Т.М. Парфенова Новые идеи в геологии нефти и газа. Новая реальность - 2021: Сборник научных трудов (по материалам Международной научно-практической конференции) (г. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 27-28 мая 2021 г.). – Перо, Москва, 2021. – С. 277-280.

121. Мельник Д.С. Органическая геохимия пород хатыспытской свиты венда (неопротерозоя) Оленекского поднятия (архивные и новые данные) / Д.С. Мельник // Успехи органической геохимии: Материалы 2-й Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых, посв. 120-летию со дня рожд. чл.-корр. АН СССР Н.Б. Вассоевича и 95-летию со дня рожд. засл. геолога РСФСР, проф. С.Г. Неручева (г. Новосибирск, 5-6 апреля 2022 г.) – ИПЦ НГУ, Новосибирск, 2022. – С. 156-160.

122. Мельник Д.С. Новые находки биодеградируемых нафтидов в породах хатыспытской свиты венда Оленекского поднятия / Д.С. Мельник // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2022. – № 2. – С. 48-56.

123. Мельник Д.С. Органическая геохимия карбонатных пород, силицитов и черных сланцев хатыспытской свиты венда (эдиакария) северо-востока Сибирской платформы / Д.С. Мельник, Т.М. Парфенова, Д.В. Гражданкин, В.И. Рогов // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64 – № 6 – С. 841-857. DOI: 10.15372/GiG2022154.

124. Мельников Н.В. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления: монография / Н.В. Мельников, М.С. Якшин, Б.Б. Шишкин, А.О. Ефимов, Г.А. Карлова, Л.И. Килина, Л.Н. Константинова, Б.Б. Кочнев, Б.Г. Краевский, П.Н. Мельников, К.Е. Наговицин, А.А. Постников, Л.В. Рябкова, А.А. Терлеев, Е.М. Хабаров // Под ред. Н.В. Мельникова. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2005. – 428 с.

125. Метелкин Д.В. Тектоническая эволюция Сибирского палеоконтинента от неопротерозоя до позднего мезозоя: палеомагнитная запись и реконструкции / Д.В. Метелкин, В.А. Верниковский, А.Ю. Казанский // Геодинамика и тектоника. – 2012. – Т. 53. – №. 7. – С. 883-899. DOI: [10.1016/j.rgg.2012.05.006](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.05.006).

126. Метелкин Д.В. К проблеме палеогеографических реконструкций и структуры геомагнитного поля на границе докембрия-палеозоя на примере новых палеомагнитных данных по Оленекскому поднятию (Сибирский кратон) / Д.В. Метелкин, Е.В. Виноградов, В.В. Щербакова, В.А. Верниковский, С.М. Захаров, К.Е. Наговицин // Доклады РАН. Науки о Земле. – 2022. – Т. 506. – № 2. – С. 135-141.

127. Миссаржевский В.В. Древнейшие скелетные окаменелости и стратиграфия пограничных толщ докембрия и кембрия / В.В. Миссаржевский. – Труды ГИН. – 1989. – Вып. 443. – 237 с.

128. Найденов Л.Ф. Перспективы нефтегазоносности осадочного чехла и прогноз ловушек углеводородов в северных и центральных районах

Предверхоанского краевого прогиба / Л.Ф. Найденов // Геология нефти и газа. – 2021. – № 6. – С. 25-36.

129. Натапов Л. М. Отложения типа доманиковой формации на северо-востоке Сибирской платформы / Л.М. Натапов // Советская геология. – № 11. – 1962. – С. 110-112.

130. Натапов Л.М. Перспективы северо-восточной части Сибирской платформы и северной части Предверхоанского прогиба на нефть и газ / Л.М. Натапов, Б.Н. Леонов, И.М. Битерман // Геологическое строение и нефтегазоносность восточной части Сибирской платформы и прилегающих районов: материалы Всесоюзного совещания по оценке нефтегазоносности территории Якутии. – Москва: Недра, 1968. – С. 299-305.

131. Неручев С.Г. Нефтепроизводящие свиты и миграция нефти / С.Г. Неручев. – Москва: Гостоптехиздат, 1962. – 224 с.

132. Неручев С.Г. Вклад А.Э. Конторовича в теорию нефтегазообразования / С.Г. Неручев // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 4. – С. 363-372.

133. Неручев С.Г., Климова Л.И. О возможности биогенного накопления в осадках Р, V, U и некоторых других элементов и определении аэробных окислительных потерь органического вещества / С.Г. Неручев, Л.И. Климова // Накопление и преобразование сидикахитов. – Ленинград. Наука, 1979. – С. 58-64.

134. Никишин А.М. Тектоническая история Сибирской платформы в вендефанерозе / А.М. Никишин, Соборнов К.О., Прокопьев А.В., Фролов С.В. // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2010. – № 1. – С. 3-16.

135. Парфенова Т.М. Нафтидопроявление в породах малокуонамского горизонта среднего кембрия как доказательство первичной миграции нефти в куонамской свите (северо-восток Сибирской платформы) / Т.М. Парфенова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2005. – № 7. – С. 26-30.

136. Парфенова Т.М. Органическая геохимия углеродистых пород куонамского комплекса отложений нижнего и среднего кембрия (восток

Сибирской платформы) / Т.М. Парфенова. – Автореферат дисс. на соискание учен. степени канд. геол.-минерал. наук // Новосибирск, 2008. – 20 с.

137. Парфенова Т.М. Геохимия органического вещества Хатыспытской свиты (венд, северо-восток Сибирской платформы) / Т.М. Парфенова, Б.Б. Кочнев, К.Е. Наговицин, Е.Н. Иванова, В.А. Каширцев, А.Э. Конторович // Успехи органической геохимии: Материалы Всерос. науч. конф. (11-15 октября 2010 г.). – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2010. – С. 265-268.

138. Парфенова Т.М. Новые находки нефтидопроявлений в породах среднего кембрия на северо-востоке Сибирской платформы [Электронный ресурс] / Т.М. Парфенова, В.А. Каширцев, И.В. Коровников // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2014. – Т. 9. – № 2. – С. 1-22. Режим доступа: [https://www.ngtp.ru/rub/1/25\\_2014.pdf](https://www.ngtp.ru/rub/1/25_2014.pdf)

139. Парфенова Т.М. Геохимия стеранов и стероидов битумоидов инниканской свиты кембрия (юго-восток Сибирской платформы) [Электронный ресурс] / Т.М. Парфенова // Химия нефти и газа: Материалы IX Международной конференции (г.Томск, 22-25 сентября 2015 г.). – Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2015. – С. 69-74. Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_42928858\\_29258706.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_42928858_29258706.pdf)

140. Парфенова Т.М. Нефтидопроявления в вендских и кембрийских отложениях в зоне вечной мерзлоты (северо-восток Сибирской платформы) / Т.М. Парфенова, Д.С. Мельник, В.А. Каширцев, В.И. Рогов, Б.Б. Кочнев, К.Е. Наговицин, Д.В. Гражданкин // Дегазация Земли: геология и экология - 2018: Международная конференция (г. Москва, 24-26 апреля 2018 г.). – Москва, 2018. – С. 1-4.

141. Парфенова Т.М. Закономерности распределения биомаркеров в органическом веществе хатыспытской свиты венда (северо-восток Сибирской платформы) / Т.М. Парфенова, Д.С. Мельник // Геохимия нефти и газа, нефтематеринских пород, угля и горючих сланцев: Материалы Всероссийской научной конференции (г. Сыктывкар, 14-16 октября 2019 г.). – ИГ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, 2019. – С. 76-77.

142. Парфенова Т.М., Мельник Д.С., Коровников И.В. Геохимические предпосылки нефтеносности пород инниканской свиты нижнего и среднего кембрия на юго-востоке Сибирской платформы / Т.М. Парфенова, Д.С. Мельник, И.В. Коровников // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2022. – № 11с. – С. 64-71.
143. Петров А.А. Углеводороды нефти / А.А. Петров – Москва: Наука, 1984. – 263 с.
144. Поляков А.А. Новые данные о геологическом строении Оленекского месторождения битумов и перспективах нефтегазоносности прилегающей территории [Электронный ресурс] / А.А. Поляков, В.Н. Блинова, В.А. Каширцев, М.Е. Смирнова // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2011. – Т. 6. – № 3. Режим доступа: [https://www.ngtp.ru/rub/9/33\\_2011.pdf](https://www.ngtp.ru/rub/9/33_2011.pdf)
145. Полякова И.Д. Геохимия нафтидов северо-востока Сибирской платформы, условия их формирования и разрушения / И.Д. Полякова, О.Ф. Стасова // Геохимические и гидрогеологические предпосылки поисков нефти и газа в Сибири. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1983. – С. 70-82.
146. Полякова И.Д. Катагенез органического вещества в отложениях Предверхоянского краевого прогиба / И.Д. Полякова, Е.И. Соболева // Геохимия нефтегазоносных отложений Сибири. – Новосибирск, 1991. – С. 58-68.
147. Полякова И.Д. Структура и нефтегазовый потенциал Лаптевоморского региона / И.Д. Полякова, Г.Ч. Борукаев // Литология и полезные ископаемые. – 2017. – № 4. – С. 322-339. DOI: 10.7868/S0024497X17040036
148. Постникова И.Е. Литолого-геохимические предпосылки нефтегазоносности докембрийских отложений Пачелмского авлакогена / И.Е. Постникова, О.К. Баженова, Т.А. Коцарева // Геология нефти и газа. – 1998. – № 1. – С. 26-33.
149. Решения Всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири (Верхний протерозой и нижний палеозой) // Под ред. В.И. Краснова, В.Е. Савицкого, Ю.И. Тесакова, В.В. Хотентовского. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1983. – 215 с.

150. Решения Четвертого Межведомственного регионального стратиграфического совещания по уточнению и дополнению стратиграфических схем венда и кембрия внутренних районов Сибирской платформы. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1989. – 64 с.

151. Рогов В.И. Время формирования первой биостратиграфической зоны венда в сибирском гипостратотипе / В.И. Рогов, Г.А. Карлова, В.В. Марусин, Б.Б. Кочнев, К.Е. Наговицин, Д.В. Гражданкин // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 4. – С. 735-747.

152. Рогов В.И. Условия и обстановки осадконакопления хатыспытской свиты гипостратиграфического разреза венда Сибири / В.И. Рогов // Литология и я: от идеи до выводов: Материалы 3-й Всероссийской школы студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по литологии. – ИГГ УрО РАН, Екатеринбург, 2018. – С. 109-113.

153. Рогов В.И. Верхневендская карбонатная платформа оленекского поднятия (на примере туркутской свиты хорбусуонской серии) / В.И. Рогов, Г.А. Карлова // Фундаментальные проблемы изучения вулканогенно-осадочных, терригенных и карбонатных комплексов: Материалы Всероссийского литологического совещания, посвященного памяти А.Г. Коссовской и И.В. Хворовой (г. Москва, 11-12 ноября 2020 г.). – Москва: ГЕОС, 2020. – С. 193-196.

154. Рогова В.И. Строение и обстановки формирования хатыспытского лагерштетта в контексте геологической истории верхнего венда северо-западного склона Оленекского поднятия Сибири / Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. – Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2022. – 192 с.

155. Розен О.М. Определение минерального состава осадочных пород по химическим анализам / Розен О.М., Нистратов Ю.А. // Советская геология. – 1984. – Т. 3. – С. 76-83.

156. Розен О.М. Программа MINLITH для расчета минерального состава осадочных пород: достоверность результатов в применении к отложениям древних

платформ / Розен О.М., Аббясов А.А., Мигдисов А.А., Ярошевский А.А. // Геохимия. – 2000. – № 4. – С. 431-444.

157. Руководство по газовой хроматографии // Под ред. Э. Лейбница, Х.Г. Штруппе в 2-х т. – Москва, Мир, 1988. – 479 с.

158. Савицкий В.Е. Кембрий Сибирской платформы (Юдомо-Оленекский тип разреза. Куонамский комплекс отложений) / В.Е. Савицкий, В.М. Евтушенко, Л.И. Егорова, Ю.Я. Шабанов // Труды СНИИГГиМСа. – 1972. – Вып. 130. – 200 с.

159. Сафонова Г.И. Реликтовые структуры в углеводородах нефтей различных стратиграфических подразделений / Г.И. Сафонова. – Москва, Недра, 1980. – 260 с.

160. Сафронов А.Ф. Геология и перспективы нефтегазоносности северной части Предверхоаянского прогиба / А.Ф. Сафронов. – Новосибирск, Наука, 1974. – 112 с.

161. Сафронов А.Ф. Перспективы нефтегазоносности арктической части территории Западной Якутии / А.Ф. Сафронов, В.С. Ситников, В.А. Каширцев, К.И. Микуленко // Российская Арктика. Геологическая история. Минерагения. Геоэкология. – ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, 2002. – С. 347–353.

162. Сафронов А.Ф. История формирования Оленекского месторождения природных битумов / А.Ф. Сафронов, А.И. Сивцев // Геология нефти и газа. – 2018. – № 1. – С. 115-120.

163. Соболев П.Н. Новые данные по геохимии нафтидов и органического вещества неопротерозойских отложений зоны сочленения Предпатомского прогиба и Непско-Ботуобинской антеклизы (Сибирская платформа) / П.Н. Соболев, И.А. Кожевых // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2013. – № 2. – С. 77-85.

164. Соболев П.Н. Новые данные о перспективах нефтегазоносности Алдано-Майской впадины / П.Н. Соболев, О.В. Шиганова, С.В. Дахан, А.Р. Ахмедова // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 3-4. – С. 643-656.

165. Соболев П.Н. Геохимические критерии нефтегазоносности рифей-палеозойских отложений Лено-Анабарского регионального прогиба и

сопредельных территорий / П.Н. Соболев, Д.С. Лежнин, И.А. Панарин, Е.Н. Гаврилова, А.М. Пименова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2019. – № 8. – С. 62-74.

166. Соколов Б.С. Органический мир Земли на пути к фанерозойской дифференциации / Б.С. Соколов // Вестник АН СССР. – 1976. – № 1. – С. 126-143.

167. Соколов Б.А. Нефтегазоносность западной периферии Верхоянского складчатого сооружения и сопряженной окраины Сибирской платформы / Б.А. Соколов, О.В. Япаскурт // Геология нефти и газа. – 1982. – № 6. – С. 10-15.

168. Сороков Д.С. Перспективы нефтегазоносности Лено-Оленекского района / Д.С. Сороков // Сборник статей по геологии и нефтегазоносности Арктики. – Труды НИИГА. – 1961. – Т. 123. – Вып. 16. – С. 102-108.

169. Старосельцев В.С. Углеводородное сырье битуминозных пород Сибирской платформы / В.С. Старосельцев, А.С. Ефимов, П.Н. Соболев // Геология нефти и газа. – 2013. – № 5. – С. 73-80.

170. Стратиграфический словарь: Верхний докембрий (Северная Евразия в границах бывшего СССР) // Москва: Наука, 1994. – 351 с.

171. Ступакова А.В. Нефтегазоносные бассейны Российской Арктики / А.В. Ступакова, С.И. Бордунов, Р.С. Сауткин, А.А. Сулова, К.А. Перетолчин, С.А. Сидоренко // Геология нефти и газа. – 2013. – № 3. – С. 30-47.

172. Ступакова А.В. Бассейновый анализ для поиска крупных и уникальных месторождений в Арктике / А.В. Ступакова, А.А. Сулова, М.А. Большакова, Р.С. Сауткин, И.А. Санникова // Георесурсы. – 2017. – Спецвыпуск. Часть 1. – С. 19-35.

173. Тектоническая схема Сибирской платформы // Под ред. А.Э. Конторовича. – Новосибирск: ИГиГ СО РАН, 2002.

174. Тимошина И.Д. Геохимия органического вещества нефтепроизводящих пород и нефтей верхнего докембрия юга Восточной Сибири / И.Д. Тимошина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал "Гео", 2005. – 166 с.

175. Тимошина И.Д. Геохимия органического вещества нефтепроизводящих пород и нефтей верхнего докембрия юга Восточной Сибири / И.Д. Тимошина // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45. – № 7. – С. 901-910.

176. Тимошина И.Д. Геохимия органического вещества неопротерозоя на юго-востоке Сибирской платформы / И.Д. Тимошина, Л.Н. Болдушевская // Георесурсы. – 2020. – Т. 22. – № 4. – С. 41-54.
177. Тиссо Б. Образование и распространение нефти / Б. Тиссо, Д. Вельте – Москва: Мир, 1981. – 502 с.
178. Уриссон Г. Микробное происхождение горючих ископаемых / Г. Уриссон, П. Альбрехт, М. Ромер // В мире науки. – 1984. – № 10. – С. 18-26.
179. Успенский В.А. Классификация рассеянного органического вещества под углом зрения диагностики нефтематеринских отложений / В.А. Успенский // Материалы методического совещания работников научно-исследовательских лабораторий геолого-разведочных организаций. – Ленинград: ВНИГРИ, 1957. – С. 229-249.
180. Филиппов Ю.П. Геологическая модель Предъенисейского верхнепротерозой-палеозойского осадочного бассейна на юго-востоке Западно-Сибирской провинции / Ю.П. Филиппов // Геология нефти и газа. – 2018. – № 4. – С. 53-62. DOI: 10.31087/0016-7894-2018-4-53-62.
181. Филипцов Ю.А. Оценка катагенеза и нефтегазогенерационных свойств органического вещества отложений рифея и венда Байкитской и Катангской нефтегазоносных областей / Ю.А. Филипцов, Ю.В. Петришина, Л.И. Богородская и др. // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 9. – С. 1362-1374.
182. Филипцов Ю.А. Прогноз геологического строения и перспектив нефтегазоносности вендских отложений Курейской синеклизы / Ю.А. Филипцов, Н.В. Мельников, А.С. Ефимов и др. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2014. – Т. 17. – № 1. – С. 12-18.
183. Хабаров Е.М. Седиментология и изотопная геохимия рифейских карбонатных отложений Хараулахского поднятия севера Восточной Сибири / Е.М. Хабаров, О.П. Изох // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – №. 5-6. – С. 797-820. DOI: [10.15372/GiG20140507](https://doi.org/10.15372/GiG20140507)
184. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000) / В.Е. Хаин // Москва: Научный мир, 2001. – 606 с.

185. Хант Дж. Геохимия и геология нефти и газа / Дж. Хант // Под ред. А.Я. Архипова, Н.Б. Вассоевича. – Москва: Мир, 1982. – 706 с.
186. Хмельницкий Р.А. Хромато-масс-спектрометрия / Р.А. Хмельницкий, Е.С. Бродский // Москва: Химия, 1984. – 211 с.
187. Хоментовский В.В. Венд / В.В. Хоментовский // Труды института геологии и геофизики. – 1976. – Вып. 243. – 272 с.
188. Чалая О.Н. Основы хроматографии / О.Н. Чалая, В.А. Каширцев // Якутск: Изд-во Якутского университета, 1997. – 155 с.
189. Чахмахчев В.А. Геохимические исследования и методы при поисках и разведке нефти и газа. Учебное пособие / В.А. Чахмахчев // Москва: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2002. – 222 с.
190. Шаповалова Е.Н. Хроматографические методы анализа. Методическое пособие для специального курса / Е.Н. Шаповалова, А.В. Пирогов // Москва: МГУ, 2007. – 109 с.
191. Шапорина М.Н. Геолого-геофизические особенности строения Предверхоянского краевого прогиба и прилегающих территорий по данным нового сейсморазведочного речного профиля МОГТ-2D и переинтерпретации архивных материалов / М.Н. Шапорина, Е.В. Могисян, О.Г. Садур, В.Н. Беспечный // Геология нефти и газа. – 2021. – № 5. – С. 55-73.
192. Шенфиль В.Ю. Поздний докембрий Сибирской платформы / В.Ю. Шенфель. – Новосибирск: Наука, 1991. – 185 с.
193. Шпунт Б.Р. Протерозой северо-восточной окраины Сибирской платформы: монография / Б.Р. Шпунт, И.Г. Шаповалова, Э.А. Шамшина, К.А. Лазебник, В.Т. Саввинов, Э.Д. Пермяков, Э.Я. Келле, Е.В. Янковский // Под ред. К.Б. Мокшанцева. – Новосибирск: Наука, 1979. – 202 с.
194. Шпунт Б.Р. Поздний докембрий севера Сибирской платформы / Б.Р. Шпунт, И.Г. Шаповалова, Э.А. Шамшина – Новосибирск: Наука, 1982. – 226 с.
195. Юдович Я.Э. Геохимия фосфора / Я.Э. Юдович, М.П. Кетрис, Н.В. Рыбина // Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2020. – 512 с.

196. Якшин М.С. Венд Оленекского поднятия / М.С. Якшин // Поздний докембрий и ранний палеозой Сибири. Сибирская платформа и ее южное складчатое обрамление. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1987. – С. 18-30.
197. Якшин М.С., Воданюк С.А. Хорбусуонская серия бассейна р. Хорбусуонки (Оленекское поднятие) / М.С. Якшин, С.А. Воданюк // Поздний докембрий и ранний палеозой Сибири. Стратиграфия и палеонтология. – Новосибирск: ИГиГ, 1986. – С. 21-31.
198. Ahr W. The carbonate ramp: an alternative to the shelf / W. Ahr // Trans. Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. – 1973. – V. 23. – P. 221-225.
199. Alexander R. Heating rate effects on aromatic maturity indicators / R. Alexander, M.G. Strachan, R.I. Kagi, W. Van Bronswijk // Organic Geochemistry. – 1986. – №10. – P. 997-1003.
200. Bacon, C.A. The petroleum potential of onshore Tasmania: a review / C.A. Bacon, C.R. Calver, C.J. Boreham, D.E. Leaman, K.C. Morrison, A.T. Revill, J.K. Volkman // Geological Survey Bulletin. Mineral Resources Tasmania. – 2000. – V. 71. – 93 p.
201. Behar F. Rock-Eval 6 Technology: Performances and Developments / F. Behar, V. Beaumont, H.L. De B. Penteado // Oil & Gas Science and Technology. – Rev. IFP. – 2001. – V. 56. – № 2. – P. 111-134.
202. G.M. Bhat / G.M. Bhat, J. Craig, M. Hafiz, N. Hakhoo, J.W. Thurow, B. Thusu, A. Cozzi // Geological Society, London, Special Publications. – 2012. – V. 366. – P. 1-17. DOI: 10.1144/SP366.15
203. Blumer M. Hydrocarbons of marine phytoplankton / M. Blumer, R.R.L. Guillard, T. Chase // Marine Biology. – 1971. – V. 8. – P. 183-189.
204. Bobrovskiy I. Molecular fossils from organically preserved Ediacara biota reveal cyanobacterial origin for *Beltanelliformis* / I. Bobrovskiy, J. Hope, A. Krasnova, A. Ivantsov, J.J. Brocks // Nature Ecology & Evolution. – 2018. – № 2. – P. 437-440. DOI: 10.1038/s41559-017-0438-6

205. Bobrovskiy I. Guts, gut contents, and feeding strategies of Ediacaran animals / I. Bobrovskiy, A. Nagovitsyn, J.M. Hope, E. Luzhnaya, J.J. Brocks // *Current biology*. – 2022. – V. 32. – № 24. – P. 5382-5389.e3. DOI: 10.1016/j.cub.2022.10.051.
206. Bowring S.A. Calibrating rates of early Cambrian evolution / S.A. Bowring, J.P. Grotzinger, C.E. Isachsen, A.H. Knoll, S.M. Pelechaty, P. Kolosov // *Science*. – 1993. – V. 261. – P. 1293-1298.
207. Bray E.E. Distribution of n-paraffins as a clue to recognition of source beds / E.E. Bray, E.D. Evans // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1961. – V. 22. – № 1. – P. 2-15.
208. Brocks J.J. The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals / J.J. Brocks, A.J.M. Jarrett, E. Sirantoine, C. Hallmann, Y. Hoshino, T. Liyanage // *Nature*. – 2017. – V. – 548. – P. 578-581.
209. Brocks J.J. The transition from a cyanobacterial to algal world and the emergence of animals / J.J. Brocks // *Emerging Topics in Life Sciences*. – 2018. – V. 2(2). – P. 181-190. DOI: [10.1042/ETLS20180039](https://doi.org/10.1042/ETLS20180039).
210. Bykova N. A geochemical study of the Ediacaran discoidal fossil *Aspidella* preserved in limestones: Implications for its taphonomy and paleoecology / N. Bykova, B.C. Gill, D. Grazhdankin, V. Rogov, S. Xiao // *Geobiology*. – 2017. – V. 15. – № 4. – P. 572-587.
211. Bykova N. Seaweeds through time: Morphological and ecological analysis of Proterozoic and early Paleozoic benthic macroalgae / N. Bykova, S.T. LoDuca, Q. Ye, V. Marusin, D. Grazhdankin, S.H. Xiao // *Precambrian Research*. – 2020. – V. 350. – P. 1-20.
212. Cassani F. Methylphenanthrene maturity index of marine source rock extracts and crude oils from the Maracaibo Basin / F. Cassani, O. Gallango, S. Talukdar, C. Vallejos, U. Ehrmann // *Organic Geochemistry*. – 1988. – №13. – P. 73-80.
213. Chayka I. An explosive volcanism on the eve of the Cambrian "explosion" (~540 My ago) in the northeast of Siberia / I. Chayka, D. Grazhdankin, V. Rogov, A. Izokh // 8th International Maar Conference (Petropavlovsk-Kamchatsky, 24-30 August 2020): Abstract. – Petropavlovsk-Kamchatsky, 2020. – P. 9-10.

214. Craig J. Global Neoproterozoic petroleum systems: the emerging potential in North Africa / J. Craig, J. Thurow, B. Thusu, A. Whitham, Y. Abutarruma // Geological Society London Special Publications. – 2009. – V. 326. – № 1. – P. 1-25.
215. Craig J. The palaeobiology and geochemistry of Precambrian hydrocarbon source rocks / J. Craig, U. Biffi, R.F. Galimberti, K.A.R. Ghori, J.D. Gorter, N. Hakhoo, D.P. Le Heron, J. Thurow, M. Vecoli // Marine and Petroleum Geology. – 2013. – V. 40. – P. 1-47.
216. Cui H. Redox-dependent distribution of early macro-organisms: Evidence from the terminal Ediacaran Khatyspyt Formation in Arctic Siberia / H. Cui, D.V. Grazhdankin, S. Xiao, S. Peek, V.I. Rogov, N.V. Bykova, N.E. Sievers, X.-M. Liu, A.J. Kaufman // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2016. – V. 461. – P. 122-139.
217. Dean R.A. The occurrence of phytane in petroleum / R.A. Dean, E.V. Whitehead // Tetrahedron Letters. – 1961. – V. 2. – № 21. – P. 768-770.
218. Delpomdor F. Facies and micromorphology of the Neoproterozoic Upper Diamictite Formation in the Democratic Republic of Congo: New evidence of sediment gravity flow / F. Delpomdor, L. Tack, A. Preat // Geologica Belgica. – 2017. – V. 20. – P. 1-11.
219. Duda J.-P. Geobiology of a palaeoecosystem with Ediacara-type fossils: The Shibantan Member (Dengying Formation, South China) // J.-P. Duda, M. Blumenberg, V. Thiel, K. Simon, M. Zhu, J. Reitner // Precambrian Research. – 2014. – V. 255. – P. 48-62. DOI: 10.1016/j.precamres.2014.09.012.
220. Duda J.-P. Opening up a window into ecosystems with Ediacara-type organisms: preservation of molecular fossils in the Khatyspyt Lagerstätte (Arctic Siberia) / J.-P. Duda, V. Thiel, J. Reitner, D. Grazhdankin // Palaontologische Zeitschrift. – 2016. – V. 90. – № 4. – P. 659-671.
221. Duda J.-P. Reading the Siberian record: unravelling the geobiology of the Ediacaran Khatyspyt lagerstätte (Arctic Siberia, Russia) [Электронный ресурс] / J.-P. Duda, V. Rogov, D. Melnik, G. Love, M. Blumenberg, D. Grazhdankin // 29th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG-2019) (Gothenburg, Sweden,

- September, 1-6, 2019): Book of abstract, Gothenburg, 2019 – 2 p. Режим доступа: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.201903056>
222. Duda J.P. Understanding the geobiology of the terminal Ediacaran Khatyspyt Lagersttte (Arctic Siberia, Russia) // J.P. Duda, G.D. Love, V.I. Rogov, D.S. Melnik, M. Blumenberg, D.V. Grazhdankin // *Geobiology*. – 2020. – V. 18. – № 6. – P. 643-662.
223. Dutta S. New insights into the relationship between Tasmanites and tricyclic terpenoids / S. Dutta, P.F. Greenwood, R. Brocke, R.G. Schaefer, U. Mann // *Organic Geochemistry*. – 2006. – V. 37. – P. 117-127.
224. Eglinton G. Hydrocarbons of Biological Origin from a One-Billion-Year-Old Sediment / G. Eglinton, P.M. Scott, T. Belsky, A.L. Burlingame, M. Calvin // *Science*. – 1964. – V. 145. – P. 263-264. DOI: 10.1126/science.145.3629.263.
225. Eglinton G. Chemical Fossils / G. Eglinton, M. Calvin // *Scientific American*. – 1966. – V. 216. – P. 32-43. DOI: [10.1038/scientificamerican0167-32](https://doi.org/10.1038/scientificamerican0167-32).
226. Fang X. Formation and evolution of the Ediacaran to Lower Cambrian black shales in the Yangtze Platform, South China / X. Fang, L. Wu, A. Geng, Q. Deng // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2019. – V. 527. – P. 87-102. DOI: [10.1016/j.palaeo.2019.04.025](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.04.025).
227. Fu Jiamo Guoying S. Peculiarities of salt lake sediments as potential source rocks in China / Guoying S. Fu Jiamo, P. Pingan, S.C. Brassell, G. Eglinton, J. Jigang // *Advances in Organic Geochemistry*. – 1986. – P. 119-127.
228. Galimov E.M. Isotope organic geochemistry / E.M. Galimov // *Organic Geochemistry*. – 2006. – V. 37. – P. 1200-1262. DOI: [0.1016/j.orggeochem.2006.04.009](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.04.009).
229. Gelpi E. Hydrocarbons of geochemical significance in microscopic algae // E. Gelpi, H. Schneider, J. Mann, J. Oró // *Phytochemistry*. – 1970. – V. 9. – № 3. – P. 603-612.
230. Grazhdankin, D.V. Carbonate-hosted Avalon-type fossils in arctic Siberia / D.V. Grazhdankin, U. Balthasar, K.E. Nagovitsin, B.B. Kochnev // *Geology*. – 2008. – V. 36. – P. 803-806.

231. Grazhdankin D. Patterns of Evolution of the Ediacaran Soft-Bodied Biota / D. Grazhdankin // *Journal of Paleontology*. – 2014. – V. 88. – № 2. – P. 269-283. DOI: [10.1666/13-072](https://doi.org/10.1666/13-072)
232. Grazhdankin D. Patterns of distribution in the Ediacaran biotas: facies versus biogeography and evolution / D. Grazhdankin // *Paleobiology*. – 2004. – V. 30. – № 2. – P. 203-221. DOI: 10.1666/0094-8373(2004)030<0203:PODITE>2.0.CO;2
233. Grazhdankin D. Underground Vendobionta from Namibia / D. Grazhdankin, A. Seilacher // *Palaeontology*. 2002. – V. 45. – № 1. – P. 57-78.
234. Grazhdankin D. A re-examination of the Nama-type Vendian organism *Rangea schneiderhoehni* // *Geological Magazine*. – 2005. – V. 142. – № 5 – P. 571-582. DOI: 10.1017/S0016756805000920.
235. Grazhdankin D.V. Quo vadis, Tommotian? / D.V. Grazhdankin, V.V. Marusin, O.P. Izokh, G.A. Karlova, B.B. Kochnev, G.E. Markov, K.E. Nagovitsin, Z. Sarsembaev, S. Peek, H. Cui, A.J. Kaufman // *Geological Magazine*. – 2020. – V. 157(1). – P. 22-34. DOI: 10.1017/S0016756819001286.
236. Greenwood P.F. Tricyclic terpenoid composition of tasmanites kerogen as determined by pyrolysis GC-MS / P.F. Greenwood, K.R. Arouri, S.C. George // *Geochimica Cosmochimica Acta*. – 2000. – V. 64. – P. 1249-1263.
237. Grosjean E. Origin of petroleum in the Neoproterozoic–Cambrian South Oman Salt Basin / E. Grosjean, G.D. Love, C. Stalvies, D.A. Fike, R.E. Summons // *Organic geochemistry*. – 2009. – V. 40. – №1. – P. 87-110.
238. Hoefs J. *Stable Isotope Geochemistry*. 6th Edition / J. Hoefs. – 2018. – 285 p.
239. Izokh O. Sedimentary and diagenetic environments of the terminal Ediacaran Khatyspyt Formation (Arctic Siberia) / O. Izokh, V. Rogov, E. Podugolnikova, D. Grazhdankin // 35th IAS Meeting of Sedimentology Virtual Meeting Prague, Czech Republic (21-25 June 2021): Book of abstracts. – Olomouc, 2021 – P. 218-218.
240. Junhong C. Complex patterns of steroidal biomarkers in Tertiary lacustrine sediments of the Biyang Basin, China / C. Junhong, Summons R.E. // *Organic Geochemistry*. – 2001. – V. 32. – P.115-126.

241. Kashirtsev V.A. Overview of Natural Bitumen Fields of the Siberian Platform, Olenek Uplift, Eastern Siberia, Russia / V.A. Kashirtsev, F.J. Hein // *Heavy-oil and Oil-sand Petroleum Systems in Alberta and Beyond: AAPG Studies in Geology*. – 2013. – V. 64. – P. 509-529.

242. Kaufman A.J. The effect of seawater redox stratification on early metazoans from the terminal Ediacaran Khatyspyt Formation of Arctic Siberia / A.J. Kaufman, H. Cui, S. Peek, V. Rogov, D. Grazhdankin, S. Xiao // *GSA 2013 Annual Meeting in Denver: 125th Anniversary of GSA (Denver, Colorado, 27-30 October 2013)* – 2013.

243. Kelly A.E. Hydrocarbon biomarkers of Neoproterozoic to Lower Cambrian oils from eastern Siberia / A.E. Kelly, G.D. Love, J.E. Zumberge, R.E. Summons // *Organic Geochemistry*. – 2011. – V. 42. – P. 640-654.

244. Kelly A.E. Hydrocarbon Biomarkers for Biotic and Environmental Evolution through the Neoproterozoic-Cambrian Transition / A.E. Kelly // *PhD Thesis Massachusetts Institute of Technology*. – 2009. – 154 p.

245. Kiselev A.I. The Early Paleozoic basite magmatism in the northeastern Siberian Craton / A.I. Kiselev, B.B. Kochnev, V.V. Yarmolyuk, V.I. Rogov, K.N. Egorov // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2016. – V. 7(2). P. 233-250. DOI:10.5800/GT-2016-7-2-0204.

246. Kleemann G. Tetrahymanol from the phototrophic bacterium *Rhodospseudomonas palustris*: first report of a gammacerane triterpene from a prokaryote / G. Kleemann, K. Poralla, G. Englert, H. Kjösen, S. Liaaen-Jensen, S. Neunlist, M. Rohmer // *Journal of General Microbiology*. – 1990. – V. 136. – P. 2551-2553.

247. Knoll A.H. Integrated approaches to terminal Proterozoic stratigraphy: An example from the Olenek Uplift, northeastern Siberia / A.H. Knoll, J.P. Grotzinger, A.J. Kaufman, P. Kolosov // *Precambrian Research*. – 1995. – V. 73. – P. 251-270.

248. Kodner R.B. Sterols in red and green algae: quantification, phylogeny, and relevance for the interpretation of geologic steranes / R.B. Kodner, A. Pearson, R.E. Summons, A.H. Knoll // *Geobiology*. – 2008. – V. 6. – P. 411-420.

249. Kontorovich A. Organic geochemistry of the Vendian Khatyspyt Formation (northeast of the Siberian Platform) / A. Kontorovich, T. Parfenova, V. Kashirtsev, N.

Aksenova, E. Zubova, E. Ivanova, N. Yudina // 24th International Meeting on Organic Geochemistry (Bremen, Germany, 6-11 September, 2009): Book of Abstracts. – Bremen, Germany, 2009. – P. 174-174.

250. Lewan M.D. Effects of thermal maturation on steroid hydrocarbons as determined by hydrous pyrolysis of Phosphoria Retort Shale / M.D. Lewan, M. Bjoray, D.L. Dolcater // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1986. – V. 50. – P. 1977-1987.

251. Mann A.L. Geochemical characteristics of lacustrine source rocks: a combined palynological / molecular study of a Tertiary sequence from offshore Chin / A.L. Mann, N.S. Goddwin, Lowe S. // *Proceedings of the Indonesian Petroleum Association, Sixteenth Annual Convention*. – 1987. – V. 1. – P. 241-258.

252. Marusin V.V. Enigmatic large-sized tubular fossils from the Terreneuvian of Arctic Siberia / V.V. Marusin, D.V. Grazhdankin // *PalZ = Palaontologische Zeitschrift*. – 2018. – V. 92. – № 4. – P. 557-560. DOI: 10.1007/s12542-018-0420-x.

253. Melnik D. Deposition of the Khatyspyt facies, Northeastern Siberia [Электронный ресурс] / D. Melnik, T. Parfenova, D. Grazhdankin, V. Rogov // 29th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG-2019) (Gothenburg, Sweden, September, 1-6, 2019): Book of abstract – Gothenburg, 2019. – P. 1-2. Режим доступа: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902903>

254. Melnik D.S. Aromatic hydrocarbons and dibenzothiophenes from the Late Neoproterozoic Khatyspyt Formation (Siberian Platform) / D.S. Melnik, T.M. Parfenova // 30th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG-2021) (Montpellier, France, 12-17 September 2021) – Montpellier, 2021. – P. 1-2.

255. Nagovitsin, K.E. Revised Neoproterozoic and Terreneuvian stratigraphy of the Lena-Anabar Basin and north-western slope of the Olenek Uplift, Siberian Platform / K.E. Nagovitsin, V.I. Rogov, V.V. Marusin, G.A. Karlova, A.V. Kolesnikov, N.V. Bykova, D.V. Grazhdankin // *Precambrian Research*. – 2015. – V. 270. – P. 226–245.

256. Parfenova T.M. Saturated and triaromatic steroids of aquagene organic matter of the Cambrian Kuonamka formation (eastern Siberian platform) / T.M. Parfenova, Y.N. Ivanova // The 23th International meeting on organic geochemistry

(Torquay, England, 9-14 September 2007). Book of abstracts. – Torquay, England, 2007. –P. 491-492.

257. Parfenova T. Carbonaceous rocks of the Neoproterozoic (Vendian) Khatyspyt Formation as a possible source of oils in the northeastern Siberian Platform / T. Parfenova, V. Kashirtsev, L. Borisova, E. Ivanova, B. Kochnev, K. Nagovitsyn, V. Melenevsky // The 25th International Meeting on Organic Geochemistry (Interlaken, Switzerland, 18th-23th September 2011): Book of Abstracts. – 2011. – P. 435-435.

258. Parfenova T. Deposition of black shales of the Ediacaran Khatyspyt Formation in Siberia / T. Parfenova, V. Kashirtsev, D. Melnik, D. Grazhdankin // 35th IAS Meeting of Sedimentology Virtual Meeting Prague, Czech Republic (21-25 June 2021): Book of abstracts – Olomouc, 2021. – P. 347-347.

259. Pehr K. Ediacara biota flourished in oligotrophic and bacterially dominated marine environments across Baltica / K. Pehr, G.D. Love, Kuznetsov A., V. Podkovyrov, C.K. Junium, L. Shumlyanskyy, T. Sokur, A. Bekker // Nature Communications. – 2018. – V. 9. – № 1807. – 10 p. DOI: 10.1038/s41467-018-04195-8.

260. Pelechaty S.M. Evaluation of  $\delta^{13}\text{C}$  chemostratigraphy for intrabasinal correlation: Vendian strata of northeast Siberia / S.M. Pelechaty, Kaufman A.J., J.P. Grotzinger // GSA Bulletin. – 1996a. – V. 108. – № 8. – P. 992-1003.

261. Pelechaty S.M. Chemostratigraphic and Sequence Stratigraphic Constraints on Vendian-Cambrian Basin Dynamics, Northeast Siberian Craton / S.M. Pelechaty, J.P. Grotzinger, V.A. Kashirtsev, V.P. Zernovsky // The Journal of Geology. – 1996b. – V. 4. – P. 543-563.

262. Peters K.E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis / K.E. Peters // AAPG Bulletin. – 1986. – V.70. – № 3. – P. 318-329.

263. Peters K.E. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments / K.E. Peters, J.M. Moldowan – New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993. – 345 p.

264. Peters K.E. The biomarker guide / K.E. Peters, C.C. Walters, J.M. Moldowan – 2nd ed. – New York, Cambridge University Press. – 2005. – 1155 p.

265. Philp R.P. Biological markers in fossil fuel production / R.P. Philp // *Mass Spectrometry Review*. – 1985. – V. 4. – P. 1-54.
266. Radke M. Geochemical study on a well in the Western Canada Basin: relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter / M. Radke, D.H. Welte, H. Willsch // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1982a. – №46. – P. 1-10.
267. Radke M. The MP Index (MPI): a maturity parameter based on aromatic hydrocarbons / M. Radke, D.H. Welte // *Advances in organic geochemistry, 1981: proceedings of the 10th International Meeting on Organic Geochemistry, University of Bergen, Norway, 14-18 September 1981*. – 1983. – P. 504-512.
268. Retallack G.J. Ediacaran life of land / G.J. Retallack // *Nature*. – 2013. – V. 493. – P. 89-92. DOI:10.1038/nature11777
269. Rogov V.I. The oldest evidence of bioturbation on Earth / V.I. Rogov, V. Marusin, N.V. Bykova, Y. Goy, K.E. Nagovitsin, B.B. Kochnev, G. Karlova, D.V. Grazhdankin // *Geology*. – 2012. – V. 40. – P. 395-398.
270. Shi C. Hydrocarbon generation capability of Sinian–Lower Cambrian shale, mudstone, and carbonate rocks in the Sichuan Basin, southwestern China: Implications for contributions to the giant Sinian Dengying natural gas accumulation / C. Shi, J. Cao, X. Tan, B. Luo, W. Zeng, H. Hong, X. Huang, Y. Wang // *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* – 2018. – V. 102. – P. 817-853.
271. Sinninghe Damsté J.S. a Early diagenesis of bacteriohopanepolyol derivatives: Formation of fossil homohopanoids / J.S. Sinninghe Damsté, A.C.T. Van Duin, D. Hollander, M.E.L. Kohnen, J.W. De Leeuw // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1995. – V. 59. – P. 5141-5157.
272. Sinninghe Damsté J.S. b Evidence for gammacerane as an indicator of water-column stratification / J.S. Sinninghe Damsté, F. Kenig, M.P. Koopmans, J. Köster, S. Schouten, J.M. Hayes, J.W. Leeuw // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1995. – V. 59. – P. 1895-1900.
273. Sokolov B.S. The Vendian as the terminal system of the Precambrian / B.S. Sokolov, M.A. Fedonkin // *Episodes*. – 1984. – V. 7. – P. 12-19.

274. Ten Haven H.L. Organic geochemical studies of a Messinian evaporitic basin, northern Apennines (Italy) I: hydrocarbon biological markers for a hypersaline environment / H.L. Ten Haven, J.W. De Leeuw, P.A. Schenck // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1985. – V. 49 – P. 2181-2191.

275. Thiel V. Mid-chain branched alkanolic acids from “living fossil” demosponges: a link to ancient sedimentary lipids? / V. Thiel, A. Jenisch, G. Wörheide, A. Löwenberg, J. Reitner, W. Michaelis // *Organic Geochemistry*. – 1990. – V. 30. – P. 1-14.

276. Volkman J.K. A Review of Sterol Markers for Marine and Terrigenous Organic Matter / J.K. Volkman // *Organic Geochemistry*. – 1986. – V. 9. – P. 83-99. [DOI: 10.1016/0146-6380\(86\)90089-6](https://doi.org/10.1016/0146-6380(86)90089-6).

277. Volkman J. Sterols in microorganisms / J. Volkman // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2003. – V. 60. – P. 495-506.

278. Weber B. Precambrian–Cambrian trace fossils from the Yangtze Platform (South China) and the early evolution of bilaterian lifestyles / B. Weber, M. Steiner, M.-Y. Zhu // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2007. – V. 254. – P. 328-349.

279. Yang, Y.F. Thermal Effect on the Distribution of Regular Sterane and Geological Significance / Y.F. Yang, M. Zhang, J.L. Chen X.H. Chen // *Open Journal of Yangtze Gas and Oil*. – 2017. – V. 2. – P. 249-259. [DOI: 10.4236/ojogas.2017.24020](https://doi.org/10.4236/ojogas.2017.24020)

280. Zeng J. Composition and pore characteristics of black shales from the Ediacaran Lantian Formation in the Yangtze Block, South China / J. Zeng, W. Jia, P. Peng, C. Guan, C. Zhou, X. Yuan, S. Chen, C. Yu // *Marine and Petroleum Geology*. – 2016. – V. 76, – P. 246-261.

***Фондовые материалы:***

281. Геологический отчет о результатах параметрического бурения на Дьяппальской и Говоровской площадях по объекту: «Обобщение и анализ геологических материалов по площадям параметрического и поискового бурения на территории ЯАССР. В 3-х книгах. Книга 2 / Л.В. Баташанова, В.В. Граусман,

В.П. Жерновский, В.С. Ситников, Е.А. Сергеева, А.С. Филиппов. – Якутск, Союзгеолфонд, 1988. – 258 с.

282. Комплексный анализ и обобщение геолого-геофизических данных по Анабаро-Ленской зоне Сибирской платформы, прогноз нефтегазоносности и разработка рекомендаций по лицензированию недр. В 6-ти книгах / Конторович А.Э., Моисеев С.А., Каширцев В.А. и др. – ИНГГ СО РАН, Новосибирск, 2010.

**СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА**

Рисунок 1.1.1 – Схема изученности вендских отложений на северо-востоке Сибирской платформы.

Рисунок 1.1.2 – Схема геолого-геофизической изученности севера Сибирской платформы (по: [Конторович и др., 2021], с дополнениями).

Рисунок 1.1.3 – Опорный разрез верхнепротерозойско-нижнепалеозойских отложений Лено-Анабарской НГО [Конторович и др., 2021].

Рисунок 1.1.4 – Сейсмогеологический разрез по композитным профилям Reg1 (А), Reg\_2 АХС-Л-А (Б) [Конторович и др., 2021].

Рисунок 1.1.5 – Структурная карта по кровле венда (по материалам ИНГГ СО РАН).

Рисунок 1.1.6 – Фрагмент тектонической схемы Сибирской платформы ([Тектоническая схема..., 2002] с дополнениями).

Рисунок 1.2.1 – Литолого-стратиграфическая характеристика сводного разреза верхнепротерозойских и палеозойских отложений северо-западного склона Оленекского поднятия (по: [Pelechaty et al., 1996; Рогов и др., 2015; Nagovitsin et al., 2015; Marusin, Grazhdankin, 2018; Grazhdankin et al., 2020]).

Рисунок 1.2.2 – Литолого-стратиграфическая схема разреза верхнепротерозойских и палеозойских отложений Хараулахского поднятия (по: [Коробов, 1963; Крылов и др., 1971; Шпунт и др., 1979, 1982]).

Рисунок 1.4.1 – Схема Суханского осадочного бассейна по [Каширцев и др., 2019].

Рисунок 2.1 – Схема отбора образцов хатыспытской свиты на Оленекском поднятии.

Рисунок 2.2 – Схема исследования пород и рассеянного органического вещества, используемая в настоящем исследовании.

Рисунок 2.3 – Схема работы пиролизатора типа Rock-Eval и пример пирограммы (по: [Меленевский, 1991; Behar et al., 2001], с дополнениями).

Рисунок 3.1 – Корреляционная схема разрезов хатыспытской свиты на Оленекском поднятии (бассейн р. Хорбусуонка) (по: [Nagovitsin et al., 2015; Рогов, 2022], с дополнениями).

Рисунок 3.3 – Литолого-геохимическая характеристика сводного разреза хатыспытской свиты на Оленекском поднятии.

Рисунок 3.2 – Фото спилов образцов пород маастахской (А) и хатыспытской свит (Б-Ж) венда из изученных разрезов среднего течения р. Хорбусуонка.

Рисунок 3.4 – Диаграмма содержаний органического углерода и серы общей в породах хатыспытской свиты.

Рисунок 3.5 – Диаграмма содержаний  $S_{\text{общ}}$  по результатам аналитического определения химическими методами и оксида серы (VI) по результатам рентгенофлюоресцентного анализа.

Рисунок 3.6 – Распределение НО и оксидов кремния, алюминия, железа (III), кальция, фосфора (V) в разрезе хатыспытской свиты.

Рисунок 3.7 – Сводный разрез хараютэхской свиты и низов тюсерской свиты в обнажении в устье ручья Бискеебит (по материалам Т.М. Парфеновой).

Рисунок 3.8 – Литолого-геохимическая характеристика изученного разреза средней подсвиты хараютэхской свиты в устье ручья Бискеебит.

Рисунок 3.9 – Прослой черных сланцеватых карбонатно-кремнистых пород, высоко обогащенных ОВ, среди темно-серых плитчатых карбонатных пород средней подсвиты хараютэхской свиты (фото Т.М. Парфеновой).

Рисунок 3.10 – Кавернозные карбонатные породы с битумами верхней подсвиты хараютэхской свиты венда (А, Б, В) и песчаники тюсерской свиты кембрия (Г, Д) Хараулахского выступа.

Рисунок 4.1.1 – Гистограмма содержания органического углерода в породах хатыспытской свиты (1) и средней подсвиты хараютэхской свиты (2).

Рисунок 4.1.2 – Диаграмма содержаний органического углерода и нерастворимого остатка в черных сланцах (1) и карбонатных, глинисто-кремнисто-карбонатных и карбонатно-кремнистых породах (2) хатыспытской свиты и в породах средней подсвиты хараютэхской свиты (3).

Рисунок 4.1.3 – Изменение содержаний нерастворимого остатка, органического углерода и изотопного состава органического углерода по разрезу хатыспытской свиты.

Рисунок 4.1.4 – Литолого-геохимическая характеристика изученного разреза средней подсвиты хараютэхской свиты в устье ручья Бискеебит.

Рисунок 4.2.1 – Типовые пирограммы пород хатыспытской свиты, обогащенных (А) и слабо обогащенных (Б) ОВ.

Рисунок 4.2.2 – Диаграмма пика «битумоидной» составляющей  $S_1$  и содержания органического углерода в породах.

Рисунок 4.2.3 – Диаграмма остаточного генерационного потенциала  $S_2$  и содержания органического углерода в породах.

Рисунок 4.2.4 – Диаграмма  $HI-T_{max}$  для пород венда северо-востока Сибирской платформы.

Рисунок 4.2.5 – Типовые пирограммы пород средней подсвиты хараютэхской свиты.

Рисунок 4.3.1 – Диаграмма выхода битумоида и содержания  $C_{org}$  в породах.

Рисунок 4.3.2 – Диаграмма битумоидного коэффициента и содержания органического углерода в породах (закономерность Успенского-Вассоевича).

Рисунок 4.3.3 – Тригонограмма группового состава битумоидов пород.

Рисунок 4.3.4 – Диаграмма значений  $\beta$  и содержания насыщенных УВ в групповом составе битумоидов пород.

Рисунок 4.3.5 – Диаграмма  $PI$  и  $\beta$  для пород хатыспытской свиты.

Рисунок 4.3.5 – Диаграмма  $PI$  и содержания насыщенных УВ в групповом составе битумоидов пород хатыспытской свиты.

Рисунок 4.3.6 – Диаграмма выхода битумоида и содержания  $C_{org}$  в породах средней подсвиты хараютэхской свиты.

Рисунок 4.4.1 – Газожидкостные хроматограммы метано-нафтеновых фракций автохтонных битумоидов известковых аргиллитов (черных сланцев) (А), карбонатных пород (Б) и биодеградированных битумоидов хатыспытской свиты (В).

Рисунок 4.4.2 – Хроматограммы по общему ионному току и по  $m/z$  182 метано-нафтеновой фракции битумоида хатыспытской свиты.

Рисунок 4.4.3 – Масс-хроматограммы по  $m/z$  217 метано-нафтеновых фракций битумоидов хатыспытской свиты.

Рисунок 4.4.4 – Тригонограмма распределения стеранов.

Рисунок 4.4.5 – Диаграмма отношения стеранов к прегнанам и стеранов  $C_{29}/C_{27}$ .

Рисунок 4.4.6 – Масс-хроматограммы по  $m/z$  191 метано-нафтеновых фракций битумоидов хатыспытской свиты.

Рисунок 4.4.7 – Диаграммы зависимости содержания трицикланов (А) и значений отношения  $Ts/Tm$  (Б) от отношения стеранов  $C_{29}/C_{27}$ .

Рисунок 4.4.8 – Масс-хроматограммы по  $m/z$  191 (А) и 177 (Б) метано-нафтеновой фракции биодгерадированного битумоидов хатыспытской свиты.

Рисунок 4.4.9 – Газожидкостные хроматограммы метано-нафтеновых фракций остаточных битумоидов средней подсвиты хараютэхской свиты (А, Б) и хлороформенного экстракта из породы с битумом верхней подсвиты хараютэхской свиты.

Рисунок 4.4.10 – Масс-хроматограммы по  $m/z$  217 метано-нафтеновых фракций битумоидов средней подсвиты хараютэхской свиты.

Рисунок 4.4.11 – Масс-хроматограммы по  $m/z$  191 метано-нафтеновых фракций битумоидов средней подсвиты хараютэхской свиты.

Рисунок 4.5.1 – Гистограмма средних содержаний ароматических соединений битумоидов вендских отложений северо-востока Сибирской платформы.

Рисунок 4.5.2 – Масс-хроматограммы нафтено-ароматических фракций битумоидов хатыспытской свиты с преобладанием ТАС (А) и с преобладанием Ф и ДБТ (Б).

Рисунок 4.5.3 – Тригонограмма состава нафтено-ароматических фракций битумоидов вендских отложений северо-востока Сибирской платформы.

Рисунок 4.5.4 – Изменение содержаний НО,  $C_{орг}$ ,  $S_{общ}$  в породах и ДБТ во фракциях битумоидов по разрезу хатыспытской свиты.

Рисунок 4.5.5 – Диаграмма содержания ДБТ в нефтено-ароматических фракциях и НО в породах.

Рисунок 4.5.6 – Распределение фенантроновых УВ в нефтено-ароматической фракции битумоида хатыспытской свиты (А) и масс-спектр ретена (Б).

Рисунок 4.5.7 – Диаграмма ТАС-индекса и содержания ДБТ в ароматических фракциях битумоидов пород хатыспытской свиты.

Рисунок 4.5.8 – Диаграммы отношения стеранов  $C_{29}/C_{27}$  и МАС  $C_{29}/C_{27}$ , ТАС  $C_{28}(S+R)/(C_{26}(S+R)+C_{27}S)$  нефтено-ароматических фракций битумоидов хатыспытской свиты.

Рисунок 4.5.9 – Масс-хроматограммы нефтено-ароматических фракций битумоидов средней подсвиты хараютэхской свиты.

Рисунок 4.5.10 – Моноароматические стероиды (17-дезметил, 23-метил-) на хроматограммах по общему ионному току и  $m/z$  366, 323, 309 (А), и их масс-спектр (Б).

Рисунок 5.1 – Диаграмма GI–Pr/Ph для метано-нафтеновых фракций битумоидов хатыспытской свиты.

Рисунок 5.2 – Диаграмма GI– $C_{35}/C_{34}$  для метано-нафтеновых фракций битумоидов хатыспытской свиты.

Рисунок 5.3 – Диаграмма GI–НО для пород хатыспытской свиты.

Рисунок 5.4 – Диаграмма  $C_{35}/C_{34}$ –НО для пород хатыспытской свиты.

Рисунок 5.5 – Литолого-геохимическая характеристика сводного разреза хатыспытской свиты Оленекского поднятия.

Рисунок 6.1 – Схема изменения содержания  $C_{орг}$  и распространение нафтидов в разрезах хатыспытской свиты на Оленекском поднятии [Мельник и др., 2023].

Рисунок 6.2 – Типовое распределение битумопроявлений в микротрещинах пород хатыспытской свиты [Мельник и др., 2020].

Рисунок 6.3 – Прогнозные схематические профили потенциально нефтематеринских и нефтеносных комплексов венда и нижнего кембрия северо-востока Сибирской платформы.

**СПИСОК ТАБЛИЦ**

Таблица 2.1 – Основные виды и количество выполненных анализов пород, битумоидов и их фракций, битумов венда северо-востока Сибирской платформы.

Таблица 4.1.1 – Геохимическая и пиролитическая характеристика пород вендских отложений северо-востока Сибирской платформы.

Таблица 4.1.2 – Содержание органического углерода в породах хатыспытской свиты.

Таблица 4.3.1 – Битуминологические характеристики пород вендских отложений северо-востока Сибирской платформы.

Таблица 4.4.1 – Распределение и отношения алканов битумоидов вендских отложений северо-востока Сибирской платформы.

Таблица 4.4.2 – Распределение и отношения стеранов битумоидов вендских отложений северо-востока Сибирской платформы.

Таблица 4.4.3 – Распределение и отношения терпанов битумоидов вендских отложений северо-востока Сибирской платформы.

Таблица 4.5.1 – Распределение и отношения ароматических углеводородов и дибензотиофенов битумоидов вендских отложений северо-востока Сибирской платформы.

Таблица 4.5.2 – Фенантреновые показатели зрелости органического вещества вендских отложений северо-востока Сибирской платформы.