

УДК 553.981.2(268.45)

Маргулис Е.А.

## **ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ УНИКАЛЬНОГО ШТОКМАНОВСКО-ЛУДЛОВСКОГО УЗЛА ГАЗОНАКОПЛЕНИЯ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ**

*Три крупнейшие месторождения газа и газоконденсата – Штокмановское, Лудловское и Ледовое – образуют уникальный узел газонакопления в центральной части российского шельфа Баренцева моря. Формирование Штокмановско-Лудловского узла газонакопления обязано благоприятному сочетанию историко-геологических факторов, анализ которых позволяет прогнозировать в его пределах новые крупные месторождения газа и газоконденсата.*

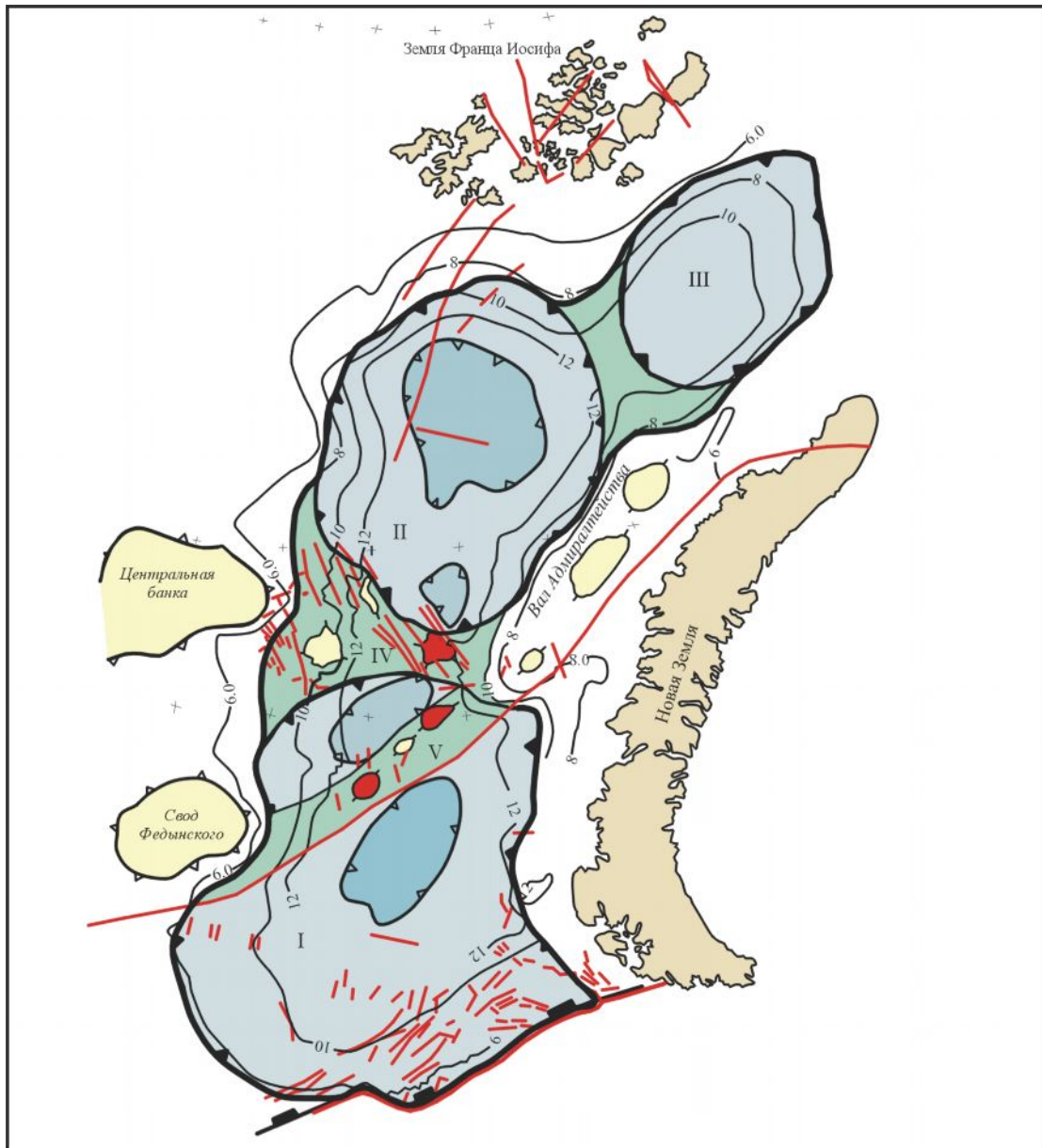
**Ключевые слова:** Баренцево море, юрские отложения, флюидоупоры, коллекторы, аккумуляция, генерация, катагенез, газосборная площадь.

### ***Общий структурный план региона, характеристика осадочного выполнения и история его развития***

*Восточно-Баренцевский мегапрогиб – крупнейшая региональная структура, в центральной части которой размещается Штокмановско-Лудловский узел газонакопления (рис. 1). Мегапрогиб длиной 1250 км и шириной 375 км занимает практически всю площадь российского шельфа Баренцева моря. Он состоит из цепочки глубоких впадин (Южно- и Северо-Баренцевских и Нансена), окаймляющих с запада Новоземельскую гряду. По времени образования Восточно-Баренцевский мегапрогиб коррелятивен становлению Пайхой-Новоземельского звена Уральского орогена и ортогонально наложен на палеозойско-триасовые тектонические элементы, но его наиболее погруженная Южно-Баренцевская впадина наследует положение древних отрицательных структур.*

*Южно- и Северо-Баренцевские впадины – уникальные области прогибания земной коры, принадлежащие по Я.П. Маловицкому к классу пелагогенных впадин или батисинеклиз. Впадины этого класса аккумулируют большинство геологических признаков, благоприятных для формирования крупных скоплений нефти и газа: огромная мощность осадочного чехла; рифтогенная и деструкционная структура основания, большой набор пород, могущих быть флюидоупорами или коллекторами.*

Северо- и Южно-Баренцевские впадины разделены крупной региональной седловиной, на которой и расположены Штокмановское, Лудловское и Ледовое месторождения. Седловина приподнята относительно впадин по кровле юрских отложений на 0,5-0,8 км и имеет сложное строение.



**Рис. 1. Баренцево море. Восточно-Баренцевский мегарифт**

Она состоит из двух положительных морфоструктур: Лудловской седловины субширотного простирания, соединяющей поднятия Центральной Банки и южное окончание Адмиралтейского вала, и Штокмановской региональной перемычки, трассирующей от свода Федынского также до южного окончания Адмиралтейского вала. Между Лудловской седловиной и Штокмановской перемычкой располагается Северная депрессия Южно-Баренцевской впадины.

Лудловская седловина выражена по всем горизонтам осадочного чехла и состоит из двух крупных поднятий, погружающихся навстречу друг другу. С запада - это восточная периклиналь поднятия Центральной Банки, с востока – погружение валообразного поднятия, ответвляющегося от Адмиралтейского вала. Западная часть Лудловской седловины характеризуется резким погружением на восток всех горизонтов позднего палеозоя-мезозоя. Она осложнена двумя крупными брахискладками: сводом Ферсмана и структурой Медвежьей; по поверхности верхнего палеозоя им отвечают наклоненные на восток террасы, разбитые многочисленными разломами. Восточная часть Лудловской седловины протягивается в субширотном направлении на расстояние около 170 км и представляет собой сложный гемивал, погружающийся на запад под углами  $1-3^{\circ}$ . В наиболее приподнятой части седловины располагается Лудловское газовое месторождение, связанное с выраженной по всем горизонтам крупной брахискладкой.

Штокмановская перемычка соединяет свод Федынского и Адмиралтейский вал в единую структурную зону. Эта структура является отражением древней (палеозойской) рифтогенной структуры, заложенной вдоль погребенной цепи каледонид, протягивающейся из Северной Норвегии к северной оконечности Новой Земли и сопровождающейся в осадочном чехле серией крупных поднятий (свод Федынского, Штокмановская и Ледовая брахиантиклинали, Адмиралтейский вал).

*Осадочный чехол Восточно-Баренцевского мегапрогиба* в бортовых частях отчетливо разделяется на 5 структурных ярусов. В Южно-Баренцевской впадине позднепалеозойско-раннемезозойское время было временем непрерывного осадконакопления.

Отложения рифейско-нижнедевонского яруса, как установлено глубинными сейсмическими исследованиями последних лет, в пределах восточной части Баренцева моря присутствуют практически повсеместно [Дараган-Сущёва и др., 1998]. В основании рифейско-нижнедевонского субширотного мегапрогиба, распространяющегося от Кольского п-ва через Южно-Баренцевскую впадину в Карское море выявлена система грабенообразных

структур возможно рифтогенной природы. Максимальная мощность рифейско-нижнедевонского яруса в мегапрогибе достигает 5 км и более.

Средне-верхнедевонский структурный ярус отвечает периоду раскола и раздвижения платформенного субстрата и формированию глубоководного океанического прогиба субширотного простирания, частично наследующего простирание нижнепалеозойского. Ярус представлен океаническими эффузивно-кремнистыми образованиями девона и глубоководными черносланцевыми каменноугольно-нижнепермскими толщами мощностью от 1,0 до 1,5 км (рис. 2).

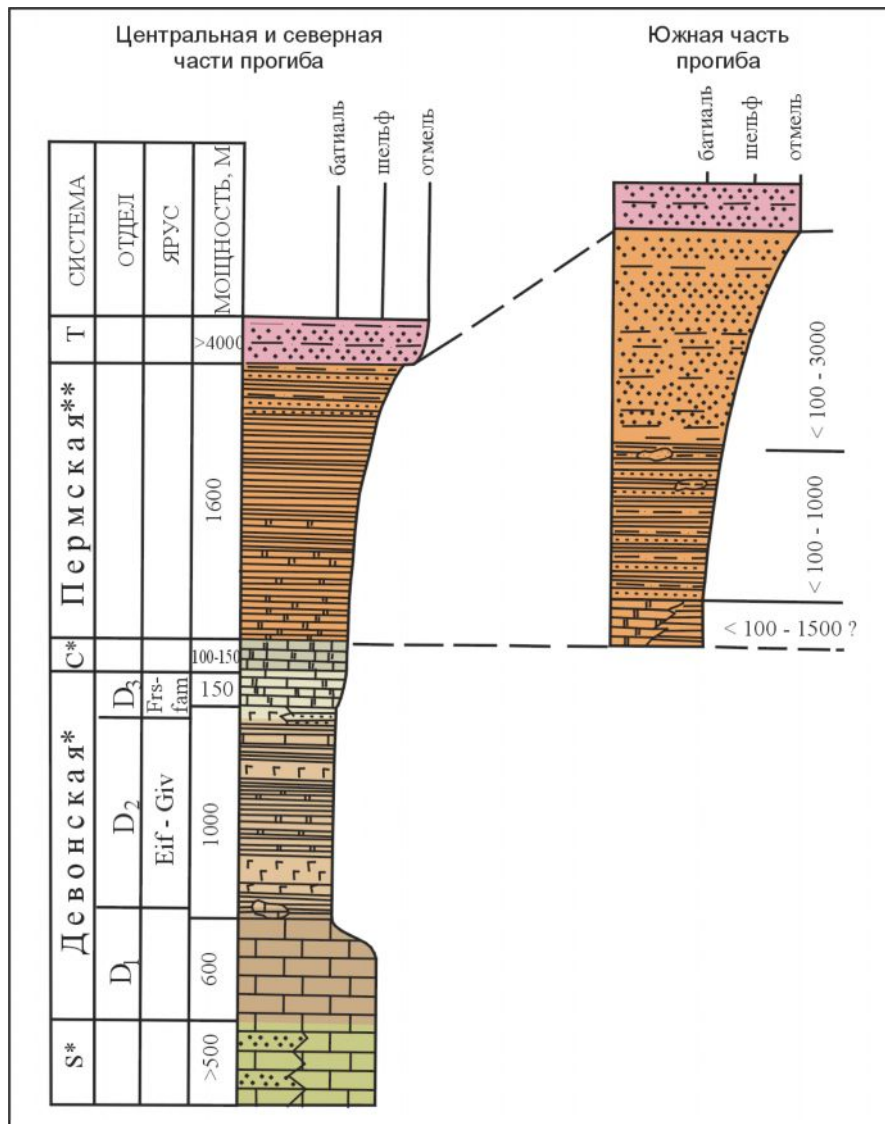


Рис. 2. Геологические разрезы палеозойских отложений Центрально-Баренцевского глубоководного прогиба<sup>1</sup>

<sup>1</sup> \* по данным разрезов Новой Земли (Болдырев и др., 1979, Нехорошева и др., 1979),

\*\* по данным скв. Адмиралтейской (северная часть), разрезов Новой Земли (Устрицкий, 1977) и сейсмозаземки (южная часть)

Нижнепермско-триасовый структурный ярус характеризует этап лавинного заполнения терригенным материалом девонско-пермского субокеанического прогиба. Он сопровождался интенсивным изостатическим погружением региона и активным триасовым основным вулканизмом. Пермские отложения южной части Восточно-Баренцевского мегапрогиба мощностью до 5 км имеют отчетливое клиноформное строение, фиксирующее продвижение фронта лавинного осадконакопления с юга на север и представляющее собой толщу дельтовых, авандельтовых и склоновых осадков и образований подводных конусов выноса.

Пермские отложения северной части сложены глинистыми и глинисто-карбонатно-кремнистыми депрессионными образованиями мощностью менее 2 км. Заполнение глубоководной впадины завершают татарские и ранне-среднетриасовые отложения. Депоцентр молассоидных триасовых осадков, очевидно, располагался на юге Северного о-ва Новой Земли, и, возможно, ещё восточнее в Карском море, о чем свидетельствует распределение мощностей триасовых отложений от 2 км в Печорском море до 5-6 км в Приновоземелье (рис. 3).

Юрский структурный ярус (время заложения современной структуры Восточно-Баренцевского мегапрогиба) несогласно ложится на триасовые отложения в Приновоземелье и согласно перекрывает их в срединной части мегапрогиба (рис. 4). Во впадинах мощность терригенных юрских отложений не превышает 2,0 км. Юрским отложениям свойственны умеренные мощности, в целом подчиненные современной структуре мегапрогиба. Юрский депоцентр несколько смещен на восток относительно осевой части Восточно-Баренцевского мегапрогиба.

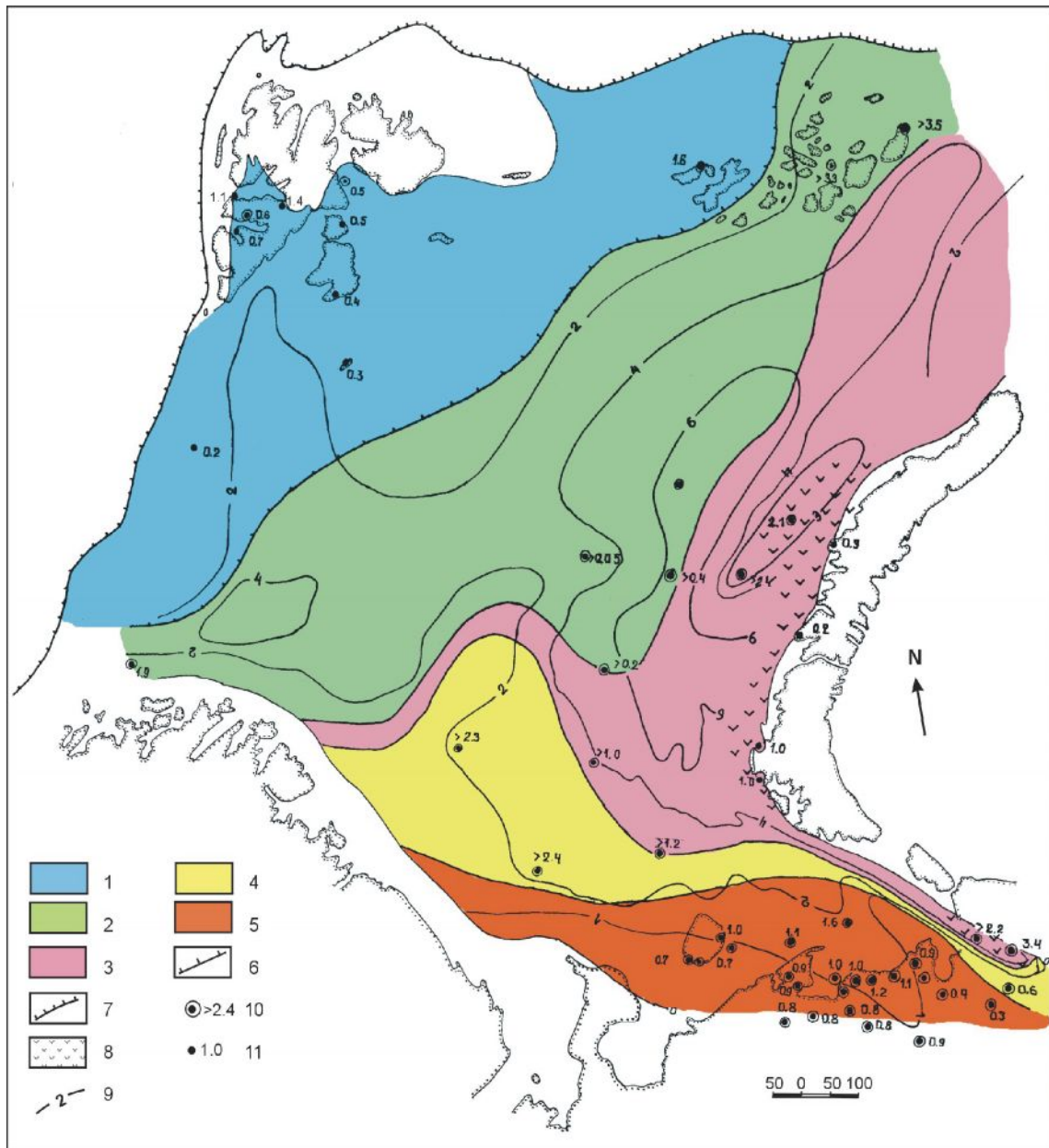
Меловой-кайнозойский структурный ярус залегает в виде плитного покрова на юрских образованиях. Нижняя часть яруса (неокомские отложения) заполняют неровности позднекиммерийского рельефа. Более молодые меловые образования перекрывают различные тектонические области Баренцева моря. Общая мощность меловых осадков возрастает к центрам впадин до 2,8-3,0 км. На ранний кайнозой приходится общий подъем и эрозия Баренцевоморского региона. В акватории обнаружены лишь плиоцен-четвертичные отложения мощностью до 120-150 м. Эрозия отложений в период кайнозойского аплифта составила в пределах Восточно-Баренцевского мегапрогиба около 500 м.

### ***Нефтегазоматеринские свиты***

В пределах Восточно-Баренцевского мегапрогиба распространены все главные нефтематеринские свиты (НМС) Баренцевоморского региона: верхнедевонско-каменноугольная, пермская, ниже-средне-триасовая и верхнеюрская, генерационный



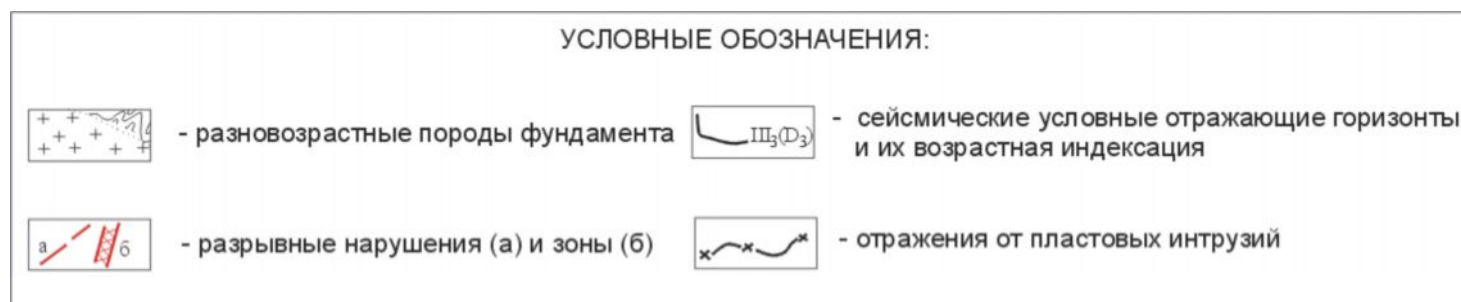
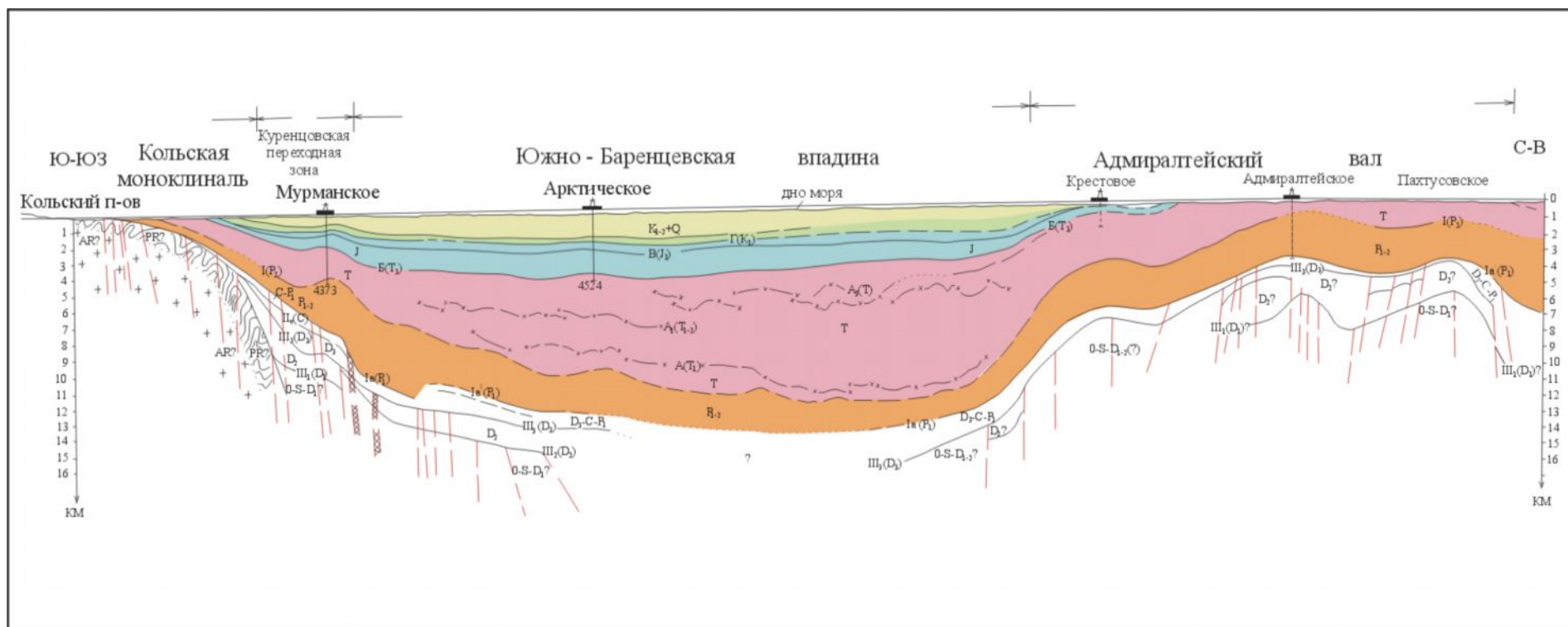
потенциал которых способствовал образованию Штокмановско-Лудловского уникального узла газонакопления.



**Рис. 3. Литолого-фациальная схема триаса Баренцева моря**

*Условные обозначения:*

*Литофации: 1 - глубоководные; 2 - шельфовые; 3 - шельфовые и лагунные; 4 - лагунно-континентальные; 5 - континентальные; 6 - триасовый континентальный склон; 7 - современный континентальный склон; 8 - триасовый вулканизм; 9 - изопахиты, км; 10 - скважины, мощность триаса; 11 - выход триасовых отложений на поверхность, их мощность*



**Рис. 4. Схематический геологический разрез южной части Баренцева моря**

«Черносланцевая» НМС верхнедевонско-каменноугольного возраста формировалась в субокеаническом прогибе в период деструкции земной коры, сопровождаемой излияниями океанических базальтов. Ареал её распространения в пределах Восточно-Баренцевского мегапрогиба охватывает современные Южно-Баренцевскую впадину, Штокмановскую перемычку и Лудловскую седловину, Адмиралтейский вал, северную и центральную части Новой Земли. Современные глубины её залегания 7-13 км. Её строение и состав изучены в естественных выходах на Новой Земле [Нехорошева, Патрунов, 1979]. Свита сложена черными кремнисто-карбонатно-глинистыми тонкослоистыми аргиллитами мощностью 350-650 м. Содержание сапропелевого рассеянного органического вещества (РОВ) достигает 12%. Степень его катагенических преобразований в акватории неизвестна. Современные глубины залегания НМС позволяют предполагать, что генерационный потенциал свиты практически исчерпан. По аналогии с формационными и возрастными аналогами НМС (толеровая формация лемвинской зоны Полярного Урала) её совокупный генерационный потенциал может быть оценен около 8 т УВ/м<sup>2</sup>.

*Битуминозно-кремнисто-глинистая НМС пермского возраста* располагается внутри ареала распространения «черносланцевой» НМС верхнего девона-карбона. Она образована дистальными частями пермских клиноформ, с юга лимитируется кунгурским континентальным склоном позднепалеозойского субокеанического прогиба, с севера – северным бортом этого прогиба. Отложения пермской нефтематеринской свиты вскрыты бурением на Адмиралтейской площади (Адмиралтейский вал) и обнажены на Северном острове Новой Земли. Разрез свиты представлен темносерой до черной монотонной алевролито-аргиллитовой толщей мощностью около 2 км (скв. 1-Адмиралтейская). Интенсивная пиритизация, ровная тонкая слоистость и полное отсутствие макрофауны свидетельствует об абиссальных условиях её осадконакопления. Современная глубина залегания НМС - 6-7 км в Южно-Баренцевской впадине, 1-4 км – на Адмиралтейском валу, на Новой Земле – на дневной поверхности. ОВ преимущественно водорослевое, его содержание достигает 10 % породы. Степень катагенетического изменения не изучена. Данные по преобразованию ОВ углистых прослоев в кровле самых молодых слоев перми в Кармакульском прогибе ( $R_{\max} 0,75-0,85$ ) дают возможность предполагать, что верхняя часть разреза НМС ещё может находиться в главной зоне нефтегенерации. Совокупный генерационный потенциал свиты оценивается около 10 т УВ/м<sup>2</sup> по аналогии с таковым для генетически сходных толщ.



*Нижне-среднетриасовая НМС битуминозных глин* сложена тонкослоистыми битуминозными глинами, сформировавшимися в глубоководных условиях. Глины интенсивно пиритизированы, богаты фосфоритовыми конкрециями и обладают всеми признаками отложений, накопленных в условиях «седиментационного голода». Отложения триасовой НМС распространены преимущественно в западной части Баренцева моря; они хорошо изучены на Свальбардской платформе, вскрыты скважинами в Восточном Финнмарке, устанавливаются в виде конденсированных разрезов на сейсмических профилях. В виде отдельных мощных горизонтов (до 100 м и более) они присутствуют в разрезах нижнего-среднего триаса, вскрытых глубокими скважинами на арх. Земля Франца-Иосифа, драгированы со дна желоба Франца-Виктория. Выполненный литолого-фациальный анализ позволяет прогнозировать распространение триасовой НМС в пределах Восточно-Баренцевского мегапрогиба – в Северо-Баренцевской впадине, на Лудловской седловине, в северных и западных районах Южно-Баренцевской впадины. Слагающие НМС глины характеризуются очень высоким содержанием  $C_{орг}$  (0,9–17%) сапропелевого (коллоальголитового) состава. Практически повсеместно триасовые нефтематеринские породы находятся в рамках ГЗН, на грациях МК<sub>2-3</sub>. Современные глубины залегания НМС в Восточно-Баренцевском мегапрогибе – 4-6 км. В свите протекали активные процессы генерации, когда триасовой нефтью сформирована нефтяная залежь месторождения Сновит, известны многочисленные притоки нефти из триасовых отложений (бассейн Хаммерфест, поднятие Лоппа).

*НМС битуминозных глин верхней юры* практически повсеместно распространена в пределах Восточно-Баренцевского мегапрогиба. Она залегает на глубинах от 1 до 2,5 км. Содержание  $C_{орг}$  в её породах составляет до 13-16%. На основной площади мегапрогиба юрская НМС еще не достигла ГЗН, её породы преобразованы до ПК<sub>2</sub> – редко МК<sub>1</sub>. В наиболее погруженной центральной части Южно-Баренцевской впадины в глинах верхнеюрской НМС на глубине 2,5 км обнаружена капельно-жидкая нефть (скв. 1. Арктической площади). Совокупный генерационный потенциал верхнеюрской НМС оценен в 15-20 т УВ/м<sup>2</sup> по аналогии с верхнеюрскими глинами Северного моря и Западной Сибири, формационных и возрастных аналогов волжских глин Баренцева моря.

### ***Главные очаги генерации УВ***

Образование и пространственное положение очагов генерации УВ контролируется структурой седиментационного бассейна, районами наиболее глубокого и продолжительного погружения, геотемпературными и флюидобарическими условиями.

Как следует из вышеизложенного, главный депоцентр осадконакопления, практически не прекращающегося в верхнем палеозое – мезозое (возможно, в палеозое-мезозое) и сопровождающегося устойчивым погружением, в Баренцевом море располагался в пределах Южно-Баренцевской впадины, где накопилось до 22 км осадков. В его пределах расположены три из четырех главных нефтематеринских свит – «черносланцевая» НМС верхнего девона-карбона, битуминозно-глинисто-кремнистая НМС перми и верхнеюрская НМС битуминозных глин.

Второй близкий по масштабам очаг нефтегазообразования расположен в менее изученной Северо-Баренцевской впадине, где общая мощность осадков достигает 17 км, и прогнозируется распространение высокопродуктивных НМС – зрелой триасовой в пределах «нефтяного окна» и верхнеюрской, расположенной в верхней зоне газообразования.

По нашим представлениям наибольшее влияние на формирование Штокмановско-Лудловского узла газонакопления имел Южно-Баренцевский очаг.

Анализ геотермических и геолого-геохимических материалов показал, что в Южно-Баренцевском очаге процессами генерации был охвачен практически весь осадочный чехол. Зафиксированные в главной зоне газообразования верхнепалеозойские отложения, богатые сапропелевой органикой, продуцировали как нефтяные, так и газообразные УВ.

Катагенетические изменения рассеянного ОВ мезозойских отложений Южно-Баренцевской впадины находятся в диапазоне градации ПК<sub>3</sub>-МК<sub>2</sub>. Степень катагенеза ОВ триасовых отложений варьирует от МК<sub>1</sub> до МК<sub>3</sub>, ниже-среднеюрских от МК<sub>1</sub> до МК<sub>2</sub> (в центральной части впадины), верхнеюрских ПК<sub>3</sub>-МК<sub>1</sub>, нижнемеловых – ПК<sub>3</sub>.

Триасовые и нижеюрские отложения, находящиеся в наиболее благоприятных для генерации нефти термобарических условиях, представлены в пределах южной и центральной частей Южно-Баренцевского очага красноцветно-пестроцветными образованиями нижне-среднего триаса, практически не содержащими рассеянного ОВ, и мощными угленосными толщами верхнего триаса-нижней юры, которые продуцировали с начала юрской эпохи значительный объем газообразных УВ. Верхнеюрские и неокомовые морские и прибрежно-морские толщи, находятся в верхней зоне газообразования и не достигли оптимальных для нефтеобразования термобарических условий. В целом, в Южно-Баренцевском очаге преобладали процессы газообразования, и огромные объемы газа поступали в относительно приподнятую Штокмановско-Лудловскую область аккумуляции УВ.

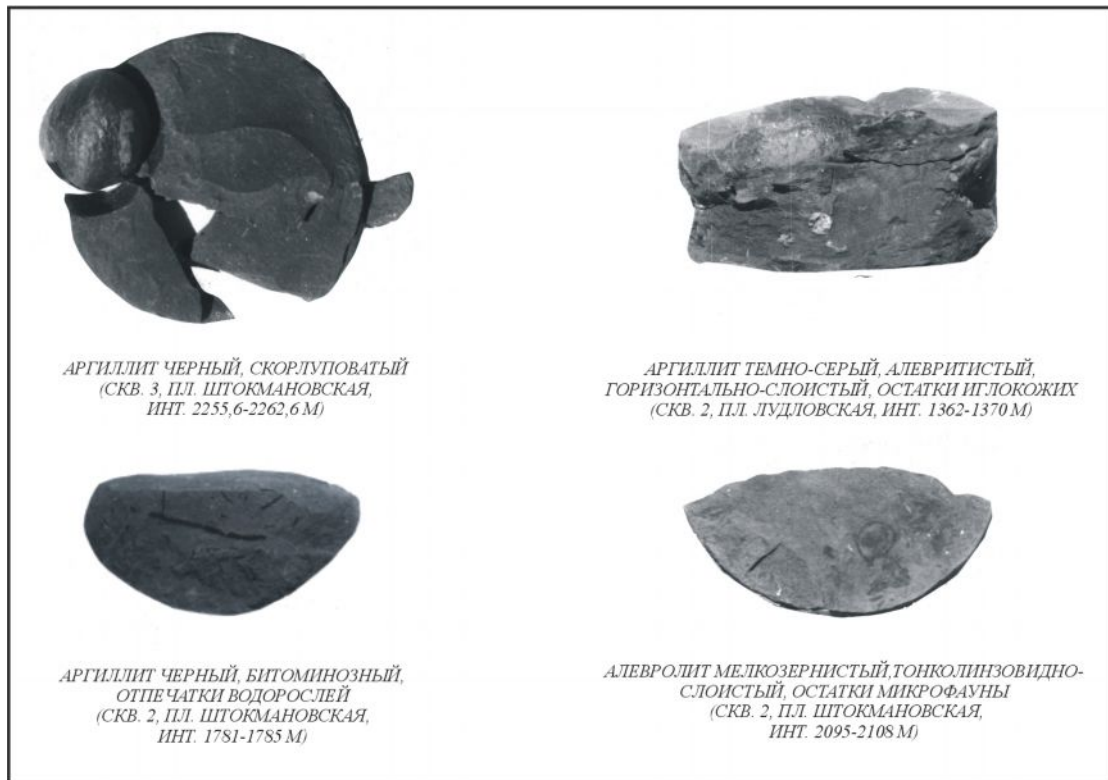
***Генезис залежей газа и газоконденсата Штокмановско-Лудловского узла газонакопления***

Залежи газа и газоконденсата Штокмановско-Лудловского узла газонакопления принадлежит достаточно специфической газоконденсатной системе, характеризующейся небольшими глубинами залегания, низким конденсатосодержанием ( $20 \text{ см}^3/\text{м}^3$ ) и метаново-нафтеновым (до 70 % нафтеновых УВ) составом конденсатов. Конденсаты малосмолистые, бессернистые, беспарафиновые, тяжелые (0,841-0,847), относящиеся к категории первичных конденсатов [Захаров, Кулибакина, Толстикова, 1998]. Подобные конденсаты определяют, как правило, существование «верхней зоны конденсатообразования», предшествующей зоне нефтеобразования и образуются в протокатагенетической, возможно, раннекатагенетической зоне при палеотемпературах 70-90<sup>0</sup>С. Свободный газ верхнеюрской залежи Штокмановского месторождения сухой метановый. В то же время газ среднеюрских залежей относится к категории газов этанового типа. Такая пестрота в составе газов Штокмановского месторождения, присутствие в Южно-Баренцевском очаге мощных сапропеленосных верхнепалеозойских толщ НМС на высоких грациях катагенеза, зрелых угленосных ГМС верхнего триаса-нижней юры и битуминозно-глинистой НМС на грациях протокатагенеза даёт основание предполагать в залежах Штокмановско-Лудловского узла смешение газов, генерированных разными источниками УВ на всех этапах катагенетической эволюции.

***Седиментология продуктивных отложений Штокмановско-Лудловского узла газонакопления; коллекторы и флюидоупоры***

Гигантские залежи газа и газоконденсата месторождений Штокмановско-Лудловского узла газонакопления связаны со средне-верхнеюрскими отложениями. На Штокмановском месторождении залежи приурочены к 3 песчаным пластам (Ю<sub>0</sub>, Ю<sub>1</sub>, Ю<sub>2</sub>) в верхней и средней частях разреза, на остальных – только к верхнему пласту Ю<sub>0</sub>. Юрские отложения, вскрытые на поднятии Ферсмана, залежей не содержат. Такое распределение газоносных отложений связано с внутренней седиментационной структурой юрских отложений.

В пределах центральной части Восточно-Баренцевского мегапрогиба юрские отложения характеризуются полным стратиграфическим объемом и значительными мощностями до 1-1,5 км. С подстилающими триасовыми и перекрывающими неокомовыми толщами они образуют непрерывный разрез. Верхняя батско-волжская часть разреза сложена преимущественно глинами, её строение в пределах центральной части Восточно-Баренцевского мегапрогиба, в целом, выдержано. Верхнеюрские отложения сложены депрессионными гаммаактивными черными глинами, которые на Штокмановском месторождении перекрывают продуктивный пласт песчаников (рис. 5).

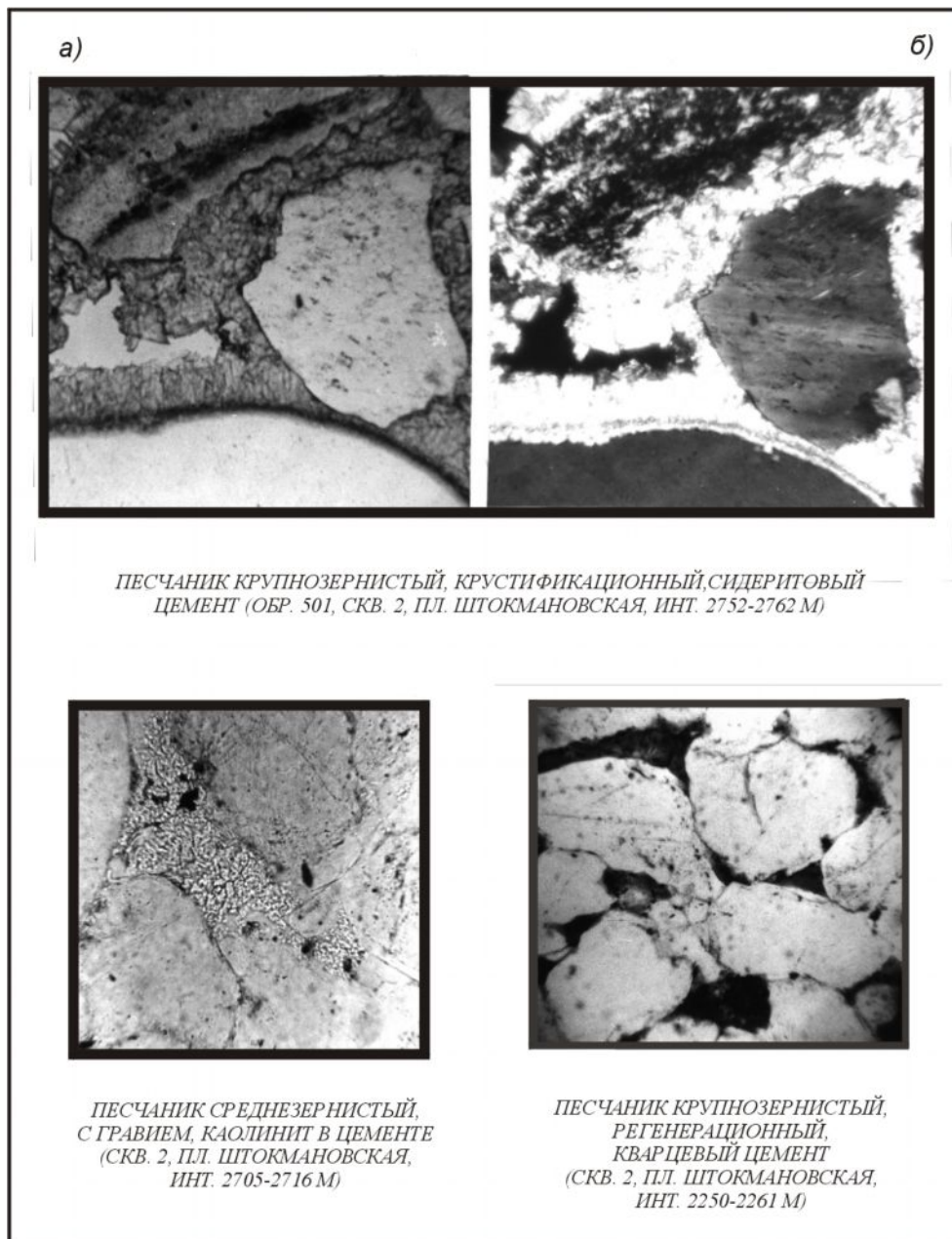


**Рис. 5. Депрессионные верхнеюрские глины**

Этот пласт практически не содержит глинистых пропластков, имеет мощность в 80 м, его эффективная мощность достигает 46,5 м; фильтрационно-емкостные параметры песчаников превосходны – открытая пористость 22 - 24 %, проницаемость 436,4 - 883,2 мД. Три нижние комплекса сформированы за счет дельты, наступавшей с востока в достаточно глубоководный бассейн.

Два верхних дельтовых комплекса (ааленско-байосский и байосский) содержат субаквальные дельтовые песчаники (пласты Ю<sub>1</sub>, Ю<sub>1-1</sub>, Ю<sub>2</sub>, Ю<sub>3</sub>) – основные коллекторские горизонты Штокмановско-Лудловского узла газонакопления. Продуктивные пласты характеризуются мощностями от 3,0 до 68,8 м; их эффективная мощность варьирует от 5,7 до 50,9 м. Песчаники обладают высокими емкостно-фильтрационными свойствами, (открытая пористость 16 - 19 %, проницаемость 11,2 - 502,3 мД), обеспеченными слабым уплотнением, седиментационной зрелостью обломочного материала, небольшим содержанием (до 15 %) и каолинитовым составом цемента (рис. 6, 7).

В кровле юрских отложений развит региональный волжский флюидоупор мощностью 50 - 70 м, сложенный в пределах Штокмановско-Лудловского узла однородными аргиллитоподобными глинами с тонкой горизонтальной слоистостью и невысокой плотностью 1,97 - 2,18 г/см<sup>3</sup>. Его региональное распространение способствует высокой сохранности юрских залежей.



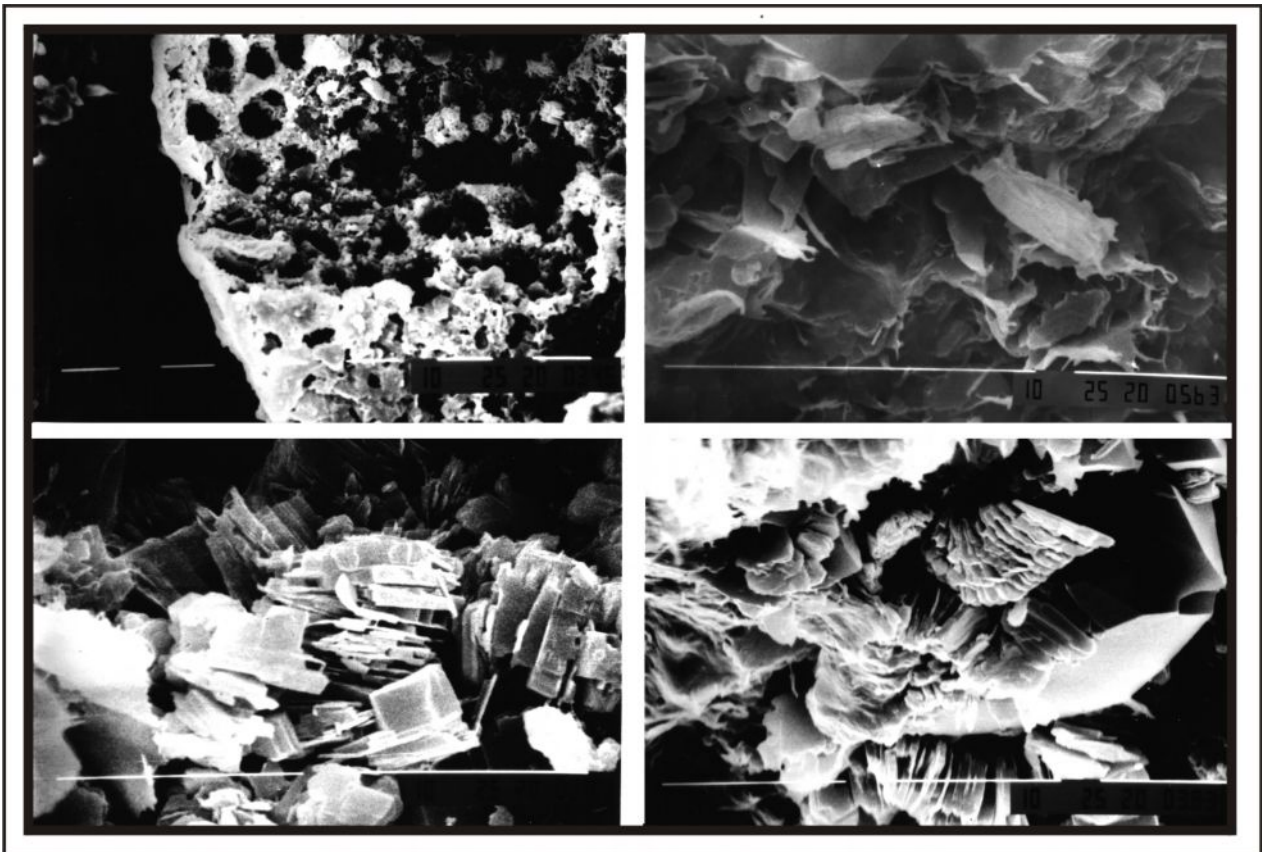
**Рис. 6. Строение и состав порового пространства юрских продуктивных песчаников**

Таким образом, феномен Штокмановско-Лудловского узла газонакопления обусловлен сочетанием нескольких благоприятных факторов:

- пространственным совпадением рифейско-нижнедевонских, девонско-нижнепермских, позднепермских-триасовых и мезозойских отрицательных структур;
- длительным и непрерывным погружением региона;
- наличием нескольких зрелых высокопродуктивных НМС и крупнейшего Южно-Баренцевского очага генерации УВ;



- существованием относительно приподнятой газосборной области и наличием крупных структурных ловушек в её пределах;
- широким распространением уникальных по своим возможностям юрских песчаных толщ с высоким качеством пород-коллекторов;
- регионального распространения высококачественного волжского флюидоупора.



**Рис. 7. Электронно-микроспические снимки глинистых минералов порового пространства юрских песчаников**

Ареал Штокмановско-Лудловского узла газонакопления может быть расширен за счет опосредованного Фермановского, Шатского, Луинского поднятий и прилегающих к Штокмановскому и Лудловскому месторождениям крупных безымянных структур. Вероятным крупным месторождением может быть также поднятие Центральной Банки, расположенное в спорных водах России и Норвегии.

#### **Литература**

*Дарган-Суцьева Л.А., Павленкин А.Д., Поселов В.А., Буценко В.В.* Структура допермских осадочных бассейнов Баренцево-Карской шельфовой мегаплиты // Труды 3 Межд. конфер. Освоение шельфа Арктических морей России. Ч. 1. СПб., 1998. С. 239-246.

*Захаров Е.В., Кулибакина И.Б., Толстикова Т.А.* Прогноз газоконденсатных скоплений на шельфе наиболее перспективных морей // Перспективы выявления и освоения месторождений газа, конденсата и нефти на шельфе морей России. М.: ВНИИГаз, 1998. С. 34-41.

*Нехорошева Л.В., Патрунов Д.К.* Разрез верхнесилурийских – девонских отложений залива Медвежий на Северном острове Новой Земли. Л.: НИИГА, 1979. С. 53-82.

**Рецензент:** Баженова Татьяна Константиновна, доктор геолого-минералогических наук.