

УДК 552.578.061.4(481-922.1)

Верба М.Л.

Федеральное государственное унитарное научно-производственное предприятие по морским геологоразведочным работам «Севморгео» (ФГУНПП «Севморгео»), Санкт-Петербург, Россия, verba@sevmorgeo.com

КОЛЛЕКТОРНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

Рассматриваются данные, полученные автором в процессе экспедиционных работ в окрестностях рудников Баренцбург и Пирамида Треста Арктикуголь. Дополнительно привлечены сведения, собранные предшествовавшими исследователями в различных районах архипелага, включая скв. Грумантская-1 и Раддедален-1. Используются результаты петрофизического изучения коллекции геологов ПМГРЭ и ВНИИОкеангеология. Приводятся результаты лабораторных определений пористости, плотности, скоростных и магнитных свойств. Сделан вывод, что в отношении пористости, и проницаемости разрез фанерозойских отложений является далеко не таким безнадежными, как считалось ранее, а по характеру коллекторных свойств, как одному из предпосылок нефтегазоносности, разрез архипелага обладает чертами сходства с разрезом Тимано-Печорской провинции. По петрофизическим свойствам выделены коллекторы различного типа в нижнепалеозойских, среднедевонских, нижне- и среднекаменноугольных, среднетриасовых и мел-палеоценовых толщах, которые местами вмещают миграционные флюиды. Галогенные пачки и толща многолетнемерзлых пород рассматриваются как флюидоупоры.

Ключевые слова: петрофизика, коллекторы, флюидоупоры, мерзлота, осадочный чехол, фанерозой, скважины, архипелаг Шпицберген.

Вводные замечания

Архипелаг Шпицберген с давних пор привлекает внимание российских исследователей. Помимо аспектов, не связанных с геологией, в этом интересе значительную роль играют и полезные ископаемые, в первую очередь уголь, а также и углеводородное сырьё – нефть и природный газ. Их признаки выявлены в различных частях архипелага, в том числе и на лицензионных участках, заявленных от имени государства ФГУП «Трест Арктикуголь» (рис. 1) Последнюю сводку по этим вопросам читатель найдет в предыдущих выпусках данного электронного журнала [Верба, 2007, 2011]. При этом если в прошлые годы безусловным приоритетом среди полезных ископаемых, выявленных на российских участках, пользовался уголь, то в последние годы (точнее, с 2006 г., когда было принято решение о перепрофилировании хозяйственной деятельности на архипелаге и строительстве в Баренцбурге электростанции на газовом топливе), на первое место выходят проблемы газоснабжения. Недалеко от Баренцбурга в скв. Васдален-1 и Васдален-3 в свое время были получены газовые фонтаны с дебитами, достаточными для удовлетворения местных нужд,

однако эти результаты по разным причинам, в том числе из-за негативной оценки качества резервуаров, не получили дальнейшего развития.

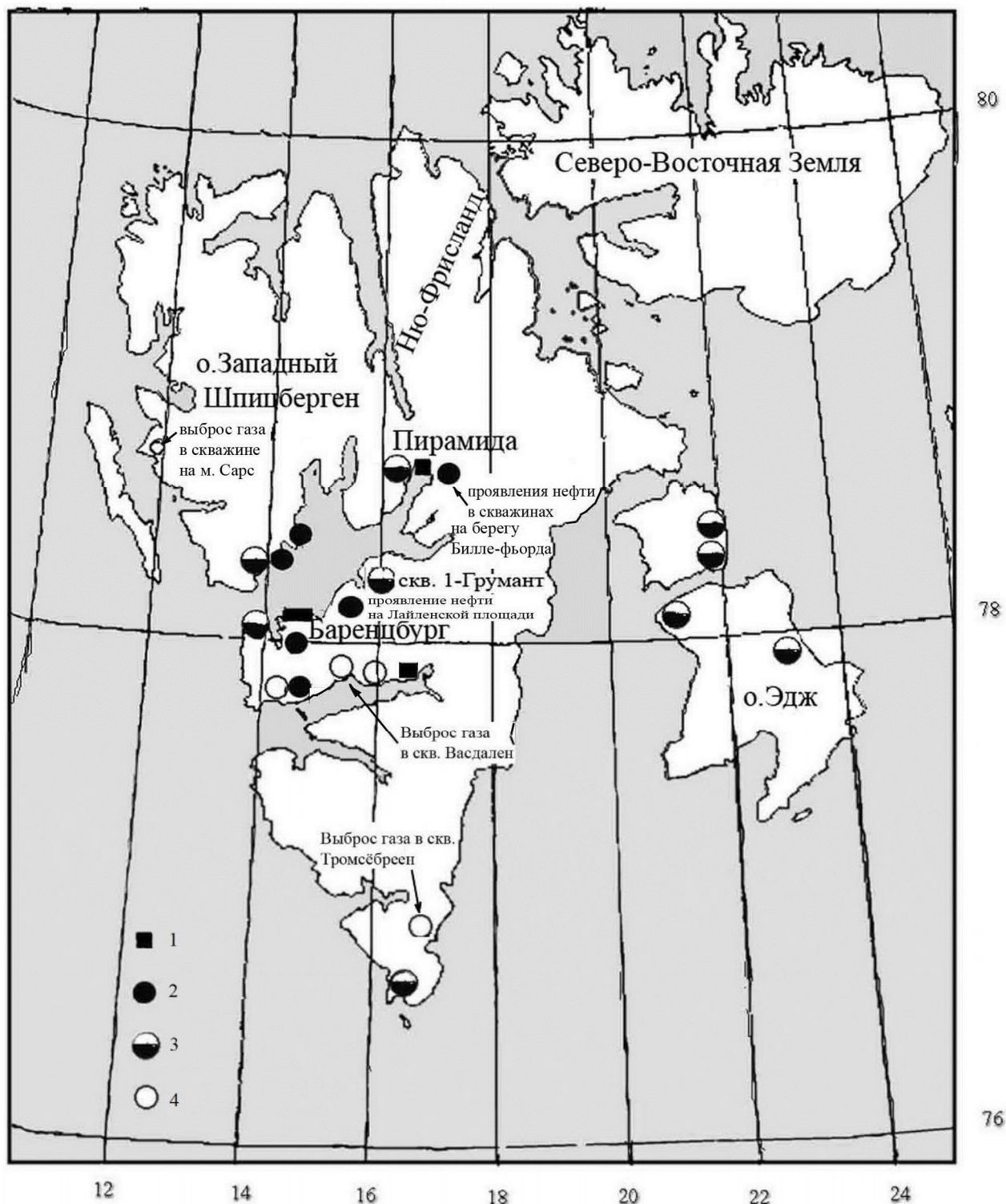


Рис. 1. Схема расположения пунктов, в которых на архипелаге Шпицберген установлены проявления горючих полезных ископаемых

1 – уголь; 2 – нефтепроявления; 3 – битумы; 4 – газопроявления.

В связи с этим информация о коллекторных свойствах разреза осадочных пород, необходимая в любом регионе для объективной оценки возможности аккумуляции и сохранения углеводородных скоплений, в условиях Шпицбергена приобретает особое значение. Основной причиной, которая, по мнению многих геологов, отрицательно влияет на ёмкостные свойства пород фанерозойского разреза, представленного на архипелаге практически всеми таксонами и достигающего мощности 8...10 км, выступает интенсивное проявление альпийского тектогенеза, который сформировал на западном побережье самого крупного острова архипелага серию классических надвиговых структур [Harland, 1998]. Роль этих структур в структуре архипелага неоднократно служила предметом детальных исследований [Tertiary..., 1988; Manby, 1988; Townsend, Mann, 1989; Bergh, Braathen and Andresen, 1997 и др.]. При этом влияние этого фактора на качество коллекторов считалось настолько сильным, что даже на значительном удалении от Западно-Шпицбергеновской полосы надвигов с ним связывали повышенную тектогенную растресканность пород [McCann & Dallmann, 1996].

Впрочем, в публикациях, в той или иной степени затрагивающих вопрос о коллекторах, неизменно отмечается слабая его изученность и ограниченность базы данных, на которых можно было бы составить целостное представление о качестве, типе и распространении резервуаров в разрезе [Школа, Пчелина, Мазур и др., 1980; Pentilla, Church, 1984; Bergsager, 1986; 1987; Армишев, Борисов, Бро и др., 1988]. В более общей форме этот вывод констатировался и в региональных обобщениях [Hjelle, 1993; Harland, 1998]. Показательно, что основная масса публикаций по данной проблеме в целом относится к 1980-м гг., когда на архипелаге проводились, хотя и в ограниченных объёмах, исследования нефтегазовой направленности. Они в основном выполнялись советскими геологическими предприятиями и полностью прекращены их российскими правопреемниками.

Тем не менее, в последующие десятилетия был получен достаточно большой фактический материал, позволяющий откорректировать существующую априорную негативную оценку перспектив нефтегазоносности архипелага в целом и коллекторных свойств в частности [Верба, 1989; Пчелина, 1994; Iansen, 2002; Верба, Иванов, 2006; Верба, 2007 и др.]. Эти данные, полученные как зарубежными, так и отечественными исследователями, указывают на то, что несмотря на неблагоприятный прогноз, в разрезе существуют условия, необходимые для аккумуляции углеводородных скоплений. Было установлено также, что роль активного альпийского тектогенеза не столь существенна, как полагали ранее [Алехин, Армишев, Батурин и др., 1988]. Это в конечном счете нашло

отражение в ряде региональных нефтегеологических обобщений, в которых, хотя и осторожно, но положительно оцениваются перспективы осадочных толщ архипелага, главным образом, мезозойских [Швембергер, 1986; Верба, Захаров, Маргулис и др., 1989 и т.п.].

Скопления углеводородов, обнаруженные к настоящему времени в разрезе палеогеновых, триасовых и каменноугольных отложений архипелага были рассмотрены ранее [Верба, 1989, 2007]. Эти скопления не вызвали большого практического интереса, однако сам факт их присутствия, притом в широком стратиграфическом диапазоне говорит о перспективности осадочного чехла Шпицбергена в отношении нефтегазоносности и делает вполне актуальным анализ имеющейся информации, прямо или косвенно характеризующей коллекторные свойства разреза.

Изложению результатов этого анализа, выполненного по материалам собственных исследований автора на лицензионных участках «Арктикугля» с привлечением других опубликованных данных, посвящено нижеследующее изложение. Заметим, что сведения об условиях нахождения залежей, в частности о резервуарах редко публикуются, они немногочисленны и разрознены. К тому же они обычно характеризуют поровые коллекторы, тогда как кавернозность и трещиноватость в плане коллекторов в данном регионе практически не изучались.

Исходные данные

Фактические данные, положенные в основу нижеследующего описания, представляют собой оригинальную информацию, полученную автором в процессе экспедиционных работ, с дополнением сведений, полученных предшественниками исследователями в различных районах архипелага. Первая включает результаты изучения материалов, которые принесло колонковое бурение, выполнявшееся главным образом в окрестностях рудников Баренцбург и Пирамида (коллекция образцов керна скважин 116-бис, 118 и 124 и их описание), результаты полевых наблюдений и определений в лабораториях ФГУП «ВНИГРИ» и ВНИИОкеангеология пористости и скоростных свойств по собранным образцам. Материалы, собранные и опубликованные предшественниками, представляют собой результаты измерения физических свойств, в первую очередь пористости непосредственно по керну скв. Грумантская-1 и Раддедален-1 а также по каменным коллекциям геологов ПМГРЭ и ВНИИОкеангеология.

Прямые сведения о ёмкостных и фильтрационных свойствах разреза получены лабораторным путем при изучении кернового материала и дополнены косвенными

геофизическими данными, которые позволяют в значительной мере восполнить пробелы, обусловленные дискретностью буровых данных. Так, информация о плотности и скоростных свойствах даёт возможность получить общее представление о дифференциации разреза в отношении ёмкостных параметров, а также о катагенетической зрелости захороненного органического вещества осадочных пород и, соответственно, об их нефтегазогенерационном потенциале. Особенно информативна в этом отношении плотность, которая, как показали исследования Е.Г. Бро [Физические..., 1987], хорошо коррелируется с параметром пористости как в терригенных, так и в карбонатных породах (рис. 2).

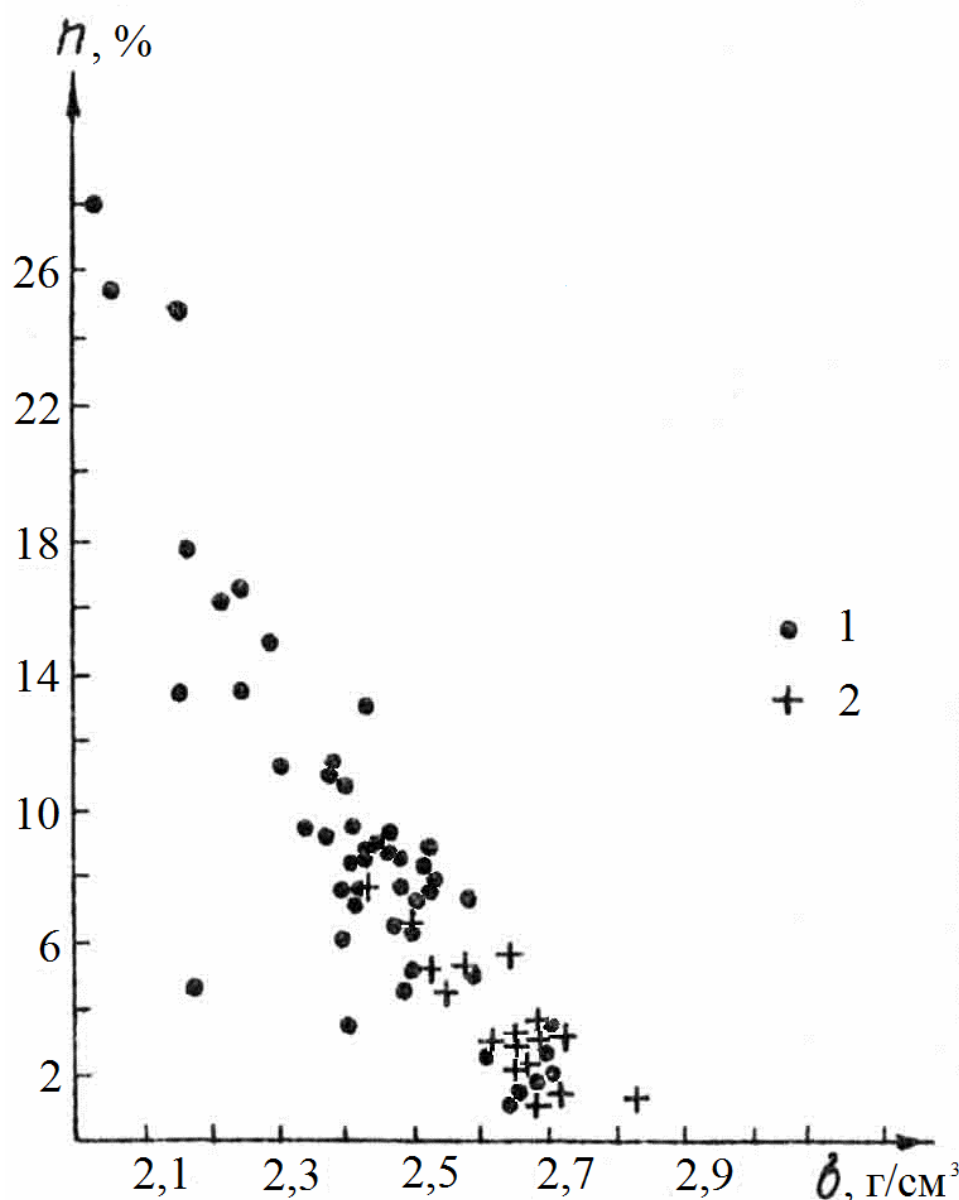


Рис. 2. Связь плотности и пористости для терригенных (1) и карбонатных (2) пород, по Е.Г. Бро [Физические..., 1987]

Магнитные свойства, обычно менее информативные в отношении коллекторных свойств, в конкретных геологических условиях архипелага представляют интерес как индикатор постседиментационных изменений осадочных пород, обусловленных воздействием на них магматических и гидротермальных процессов [Verba, Evdokimova, 1995]. В совокупности эти косвенные данные дают хотя и обобщенную, но достаточно объективную картину распределения по разрезу и площади коллекторов и флюидоупоров, позволяющую учесть этот фактор при прогнозе нефтегазоносности в первую очередь российских лицензионных участков.

Косвенная оценка коллекторных свойств пород выполнялась по результатам лабораторных определений скорости распространения продольных волн в образцах керна из опорно-параметрической скв. Грумантская-1 и колонковых скважин на Земле Диксон, на побережье Колес-бухты, из обнажений на северном берегу Ван-Майен-фьорда и на Земле Сёркап, а также по сейсмокаротажным материалам, полученным по разрезу этой же глубокой скважины. Определениями скорости были охарактеризованы девонские, каменноугольные, пермские и мезозой-кайнозойские отложения.

Петроплотностные и петромагнитные исследования были выполнены В.В. Верба по коллекции, предоставленной в основном Т.М. Пчелиной, Е.Г. Бро и И.В. Школой. Для каменноугольной толщи плотность определялась в образцах из обнажений на островах Западный Шпицберген (п-ов Бреггер, Сент-Джонс-фьорд, бухта Трюгхамна, залив Хорнсунн, Экман-фьорд, Ван-Майен-фьорд, Ван-Кейлен-фьорд, Билле-фьорд, всего 697 обр.), о. Медвежий (263 обр.) и по каротажной записи в скв. Раддедаленская-1 на о. Эдж. В пермских отложениях плотность была определена на п-ове Бреггер, Экман-фьорде, Ис-фьорде, Ван-Кейлен-фьорде (более 290 обр.), а также на о. Медвежий (более 67 обр.). Кроме того, выполнено 15 замеров в образцах из керна скважины Грумантская-1 и использована запись плотностного каротажа в скважине Раддедален-1. Триасовые отложения охарактеризованы определениями плотности на островах Западный Шпицберген (870 обр.), Вильгельма (77 обр.), Баренца (117 обр.), Эдж (301 обр.), Медвежий (95 обр.) и Надежда (156 обр.). На Западном Шпицбергене образцы отбирались из обнажений в районах побережья Ис-фьорда, Ван-Кейлен-фьорда, залива Хорнсунн, Земли Серкап, Сассен-фьорда, бухты Уиче, мыса Иогансон. Кроме того, аналитические данные получены по образцам из керна скв. Грумантская-1 и Васдаленская-2. Юрские отложения изучены на о. Зап. Шпицберген (152 измерения) в образцах из обнажений в районах побережья Исфьорда, Ван-Кейлен-фьорда, залива Хорнсунн, Земли Серкап, Сассен-фьорда, а также в образцах из керна

скв. Грумантская-1 и Васдаленская-2 (32 измерения). Меловые отложения охарактеризованы определениями плотности на о. Западный Шпицберген в образцах (420 измерений) из обнажений в районах побережья Ис-фьорда, Ван-Мейен-фьорда, Ван-Кейлен-фьорда, залива Хорнсунн, Земли Серкап, Сассен-фьорда, Агард-бухты и бухты Квальвоген, а также в образцах (97 измерений) из керна скв. Грумантская-1 и Васдаленская-2. Плотность палеогеновых пород определялась по образцам из обнажений на островах Земля Принца Карла (149 образцов) и Западный Шпицберген (524 образца) и по 5 образцам из керна скв. Грумантская-1.

Лабораторные исследования скоростных параметров в отложениях каменноугольного и пермского возраста района бухты Петунья были выполнены в лаборатории физических свойств Всероссийского Института разведочной геофизики ВИРГ (зав. лабораторией И.А. Курилович). Они предназначались для интерпретации прецизионных сейсмических наблюдений, начатых в 1995 г. этом районе ВНИИГеофизика. Остальные определения выполнены в лабораториях НИИГА (ВНИИОкеангеология). Для характеристики пермских отложений скорость измерена в 9 образцах из керна скважины Грумантская-1 и в 13 образцах из обнажений на Земле Серкап. Скорость в образцах из керна измерялась при эффективных давлениях, имитирующих пластовые, а в остальных образцах - при атмосферном давлении. Перед аналитическими исследованиями образцы насыщались водой или керосином. В образцах из керна параллельно проводились определения без насыщения. При изучении каменноугольных пород в районе Билле-фьорда определения скоростных параметров проводилось на охлажденных водонасыщенных и сухих образцах с тем, чтобы выявить особенности волновой картины карбонатного разреза в зоне развития многометнемерзлых пород. Скоростная характеристика палеогеновых терригенных отложений базируется на определениях в 4 образцах керна из скв. Грумантская-1, трех образцов керна колонковой скв. 549 на побережье Колес-бухты и 19-и образцов из естественных обнажений на побережье Ван-Мейен-фьорда.

В методическом отношении в основу выполненных лабораторных исследований были положены рекомендации Н.Б. Дортман [Петрофизика..., 1992], а также «Методические рекомендации по комплексным геологическим, петрографо-минералогическим геохимическим, петрофизическим, геофизическим и гидрогеологическим исследованиям сверхглубоких скважин», разработанные её последователем Ю.И. Кузнецовым и изданные Мингео СССР в 1986 г.

Сведения о конфигурации волновых полей и сейсмических скоростях почерпнуты из материалов сейсмических работ, выполненных на акватории Билле-фьорда ФГУНПП «Севморгео» и обработанных И.М. Тихоновой под руководством Т.С. Сакулиной, и опубликованных зарубежных данных [Skilbrei, 1993].

Полученные в итоге лабораторных измерений данные были дополнены геологической информацией, которую приводят Т.М. Пчелина и Е.Г. Бро [Пчелина, 1994; Krasil'sčikov, 1996], И.В. Школа с коллегами [Школа, Пчелина, Мазур и др., 1980], Р.Г. Курынин [Курынин, 1965], В.Л. Шварц [Шварц, 1985], Ю.Я. Лившиц и зарубежные исследователи [Nagy, 1967; Spitsbergen..., 1985]. Часть этой информации приведена в сводке [Физические..., 1987].

Коллекторные свойства пород фанерозойского осадочного чехла по результатам прямых измерений и косвенным геофизическим данным

Ордовикско-силурийские отложения

Ордовикско-силурийские отложения имеют на архипелаге ограниченное распространение и изучены лишь в скв. Раддедален-1 на о. Эдж, где они образуют основание вскрытого бурением осадочного чехла (рис. 3). Они характеризуются спокойными платформенными условиями залегания и представлены в основном карбонатами, слагающими толщу мощностью порядка 2000 м. Шесть определений пористости, выполненные по образцам керна, взятых в интервале глубин 1070...1388 м, показывают невысокие значения: 0,4...2,6 %. Вместе с тем, в отдельных образцах (с глубины 1820 и 2120 м) в карбонатах наблюдалась вторичная пористость, возникающая в результате выщелачивания доломитов. С этими зонами вторичной пористости связаны единичные поглощения бурового раствора (с глубины 1940 м).

Судя по тому, что в плотностном отношении эти породы довольно однородны, о чем можно судить по характеру каротажной записи, надо полагать, что весь вскрытый разрез мало изменчив и в отношении емкостных свойств. Колебания плотностных параметров на о. Эдж, оцененных по каротажу, не выходят за пределы значений 2,60...2,66 г/см³. Вследствие этого приведенные, хотя и немногочисленные данные непосредственных измерений являются, очевидно, достаточно репрезентативными в отношении всей вскрытой карбонатной толщи.

Более древние толщи, возраст которых датируется поздним докембрием (условно – рифеем), судя по тому, что характеризуются значительно более высокой плотностью, имеют ничтожную пористостью. На островах Земля Принца Карла (29 обр.) и побережье о. Западный Шпицберген (492 обр.) средние значения плотности у аргиллитов, сланцев и

филлитов около $2,75 \text{ г/см}^3$, у известняков и песчаников примерно такие же, или несколько ниже (иногда до $2,63 \text{ г/см}^3$), а у доломитов - около $2,80 \text{ г/см}^3$.

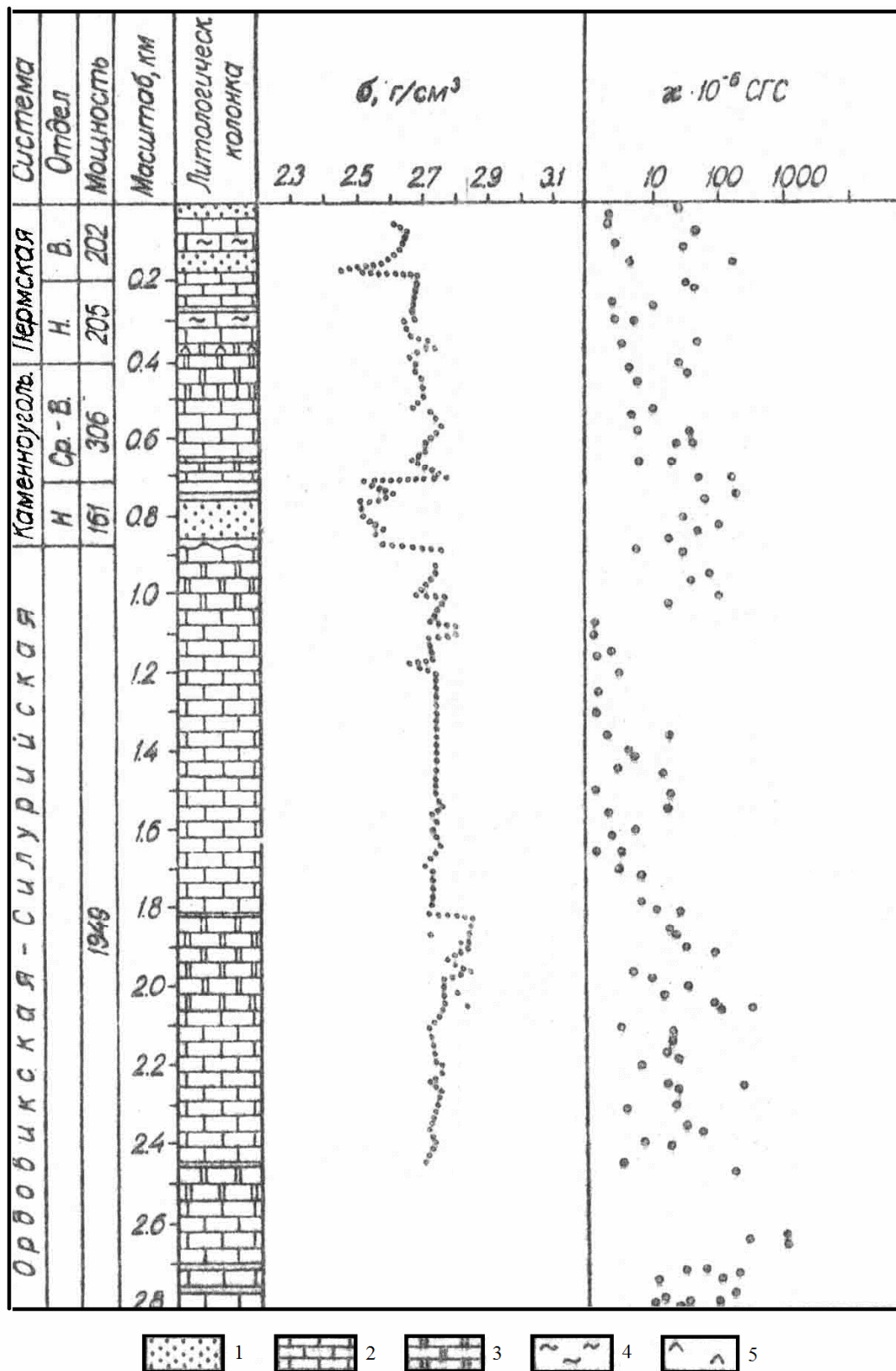


Рис. 3. Петрофизический разрез скв. Раддедален-1 (г. Эдж)

(по В.В. Верба [Физические свойства..., 1987])

1 – песчаники, алевролиты; 2 – известняки; 3 – доломиты; 4 – аргиллиты; 5 – кремнистые породы.

Наиболее плотными в этой толще являются амфиболиты (до $2,90 \text{ г/см}^3$), но их доля в разрезе ограничена, поэтому средняя плотность всего комплекса, принимаемая для моделирования разреза по плотностным данным, по оценкам Р.Г. Курынина и В.В. Верба составляет $2,75 \text{ г/см}^3$. Это весьма высокое значение, при котором трудно рассчитывать на сохранение в породе пустотного пространства, и, следовательно, ордовикско-силурийские отложения на данный момент являются самыми древними породами осадочного чехла, в которых могут быть обнаружены представляющие практический интерес резервуары, не обусловленные трещиноватостью. Они, очевидно, будут связаны с карбонатными породами, в которых при развитии кавернозности можно ожидать более высокой ёмкости, нежели установлена непосредственными измерениями, дискретными и весьма редкими. Распространение этого типа коллекторов, по всей видимости, ограничено южной периферией архипелага, где установлено присутствие ордовикско-силурийских отложений в ненарушенном залегании.

Девонские отложения

Девонские терригенные породы довольно монотонны по вещественному составу, но неоднородны по коллекторным свойствам (табл. 1). Наиболее полно они изучены по керну скважин, пройденных в долине Мимердален (рис. 4). За пределами этого участка в *нижнедевонских* гравелитах, песчаниках и алевролитах пористость в среднем оценивается в 1,8% (по 22 определениям) и только в окрестностях рудника Пирамида, в долине р. Мимер значения открытой пористости повышаются до 5,5 % (9 определений), достигая в единичных случаях 18,5%. *Средне- и верхнедевонские* терригенные отложения характеризуются более высокими значениями пористости: алевролито-песчаные разности имеют пористость 8...11% (по данным 425 определений), гравелиты – 2,7% (10 определений), карбонатные разности – 2,6% (6 определений), аргиллиты 1...2 % (единичные определения). Таким образом, судя по этим данным, в разрезе верхней половины девонских отложений в районе Билле-фьорда можно встретить как достаточно ёмкие резервуары, так и покрышки, сложенные плотными разновидностями пород.

Косвенно это подтверждают и сейсмические данные. Характер волновой картины, зафиксированной при работах МОВ-ОГТ, позволяет говорить о частом переслаивании этих разностей в вертикальном разрезе и слабой выдержанности по простиранию прослоев с различными значениями скоростных свойств [Верба, 2012]. Среднее значение пластовых скоростей находится в интервале 4...5 км/с, что является типичным для нормально-осадочных пород в платформенных условиях, при которых относительно плотные разности

чередуются с менее плотными, пористыми. Характер плавного возрастания скорости с глубиной также свойственен осадочным секвенциям платформенного типа (рис. 5). На этом графике видно, что средние значения скорости в среднедевонских породах ниже, чем в верхнедевонских, что отражает возрастание степени зрелости кластитов вверх по разрезу, отмечаемое литологическими наблюдениями Т.М. Пчелиной.

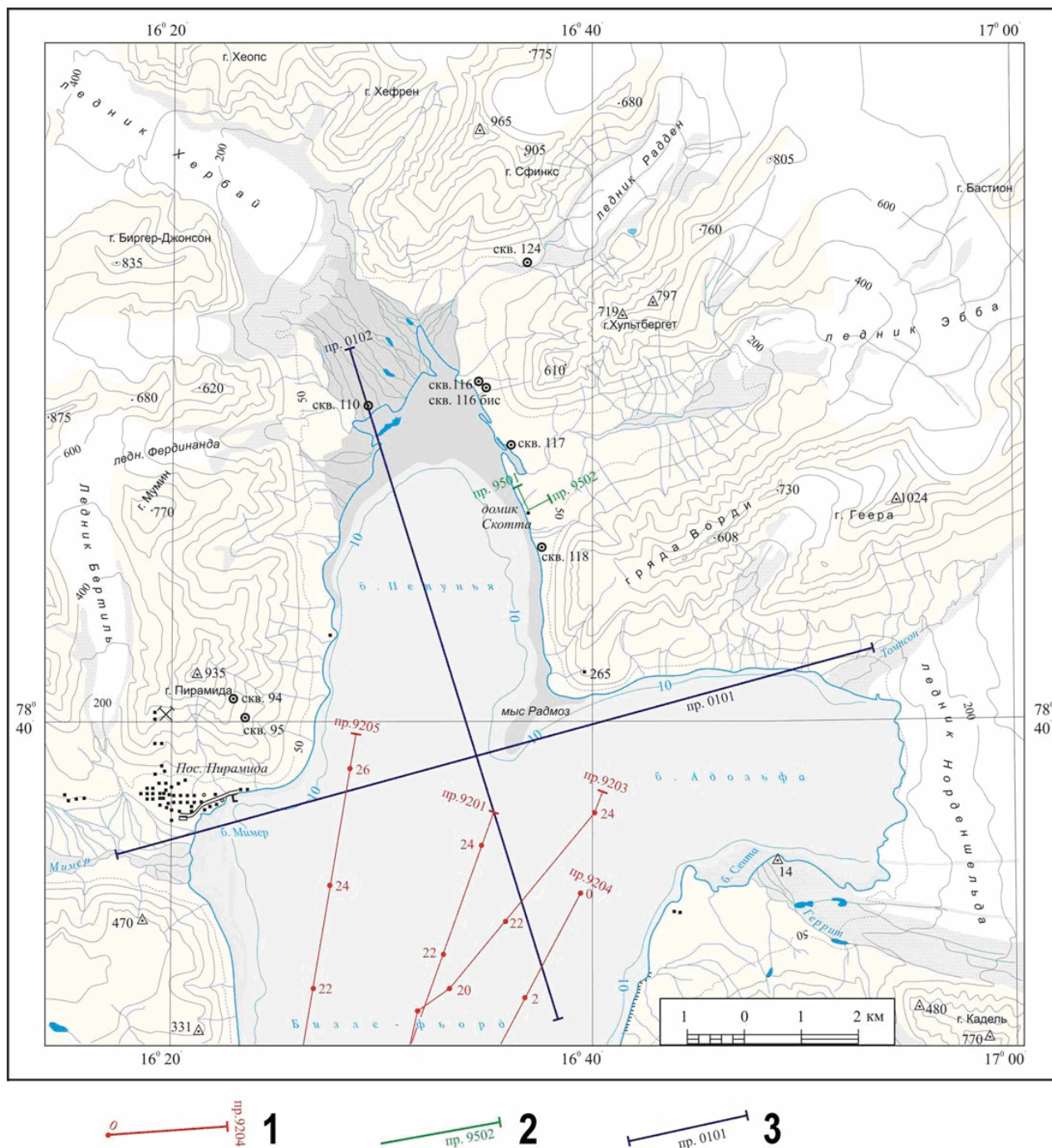


Рис. 4. Обзорная схема расположения в окрестностях рудника Пирамида колонковых скважин, упоминаемых в тексте, и сейсмических профилей

1 – профили МОВ-ОГТ, отработанные ПМГРЭ в 1992 г.; 2 – профили МОВ, отработанные в опытном режиме ВНИИГеофизика в 1995 г.; 3 – профили МОВ-МПВ, отработанные «Севморгео» в 2001 г.

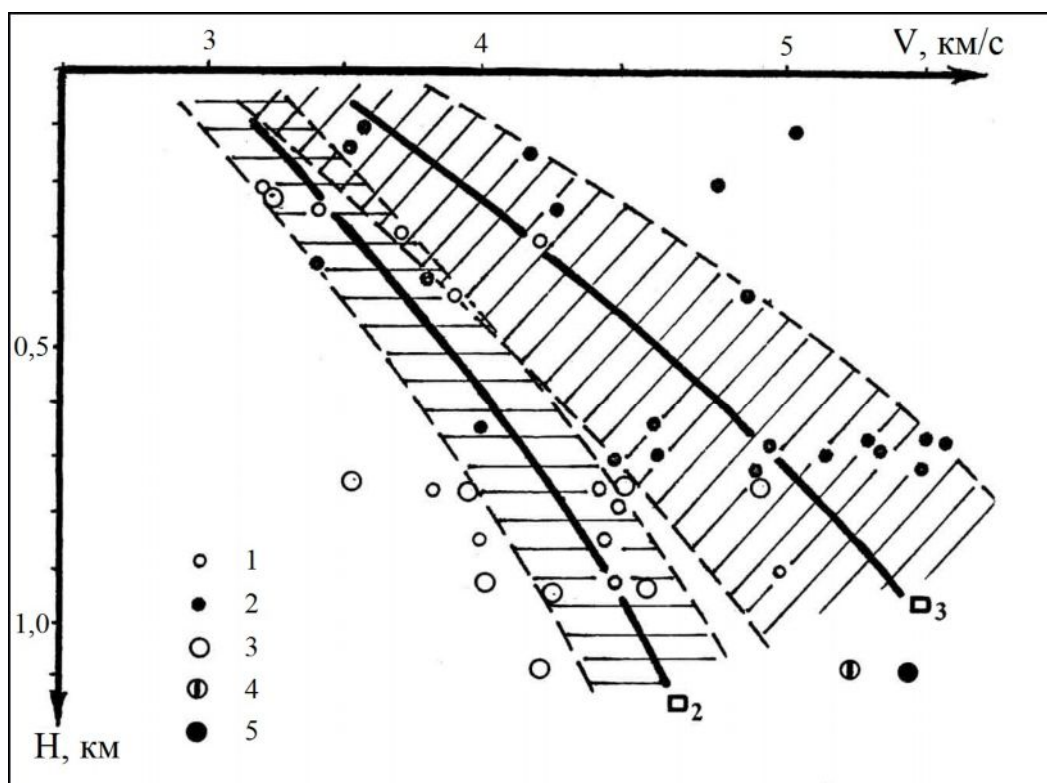


Рис. 5. Зависимость скорости упругих волн (V , км/с) от глубины залегания (H , км) терригенных пород различного возраста, развитых в окрестностях бухты Петунья

1 – песчаники среднего девона; 2 – алевриты верхнего девона в районе рудника Пирамида; 3 – песчаники среднего карбона; 4 – аргиллиты среднего карбона; 5 – алевриты среднего карбона (по данным Т.М. Пчелиной и М.Л. Вербы).

Скоростные свойства средне-верхнедевонских алеврито-песчаных пород, которые определялись в образцах из керна скважин, пробуренных в районе Мимердален (34 определения), также изменяются в широких пределах от 3,2 до 5,55 км/с, что указывает на неоднородность толщи не только в литологическом отношении, но по объёму свободного порового пространства.

Плотность развитых здесь пород находится в интервале $2,4...2,7 \text{ г/см}^3$ (табл. 1). Этот разброс плотности хорошо коррелируется со столь же существенным диапазоном колебаний кинематических параметров и отражает не только разнообразие литологического состава пород, но и различный уровень воздействия альпийских надвигов. Песчаникам и алевритам соответствует часть интервала $2,4...2,6 \text{ г/см}^3$, аргиллитам $2,5...2,7 \text{ г/см}^3$. Максимальные значения, отмеченные для аргиллитов, не характерны для осадочных пород и по мнению В.В. Верба, проводившей петрофизические исследования в этом и других регионах, обязаны своим появлением именно активности динамометаморфизма. В целом для толщи среднее значение составляет $2,65 \text{ г/см}^3$.

Таблица 1

Результаты определения физических свойств и скорости распространения продольных волн (V_p)
девонских пород окрестностей рудника Пирамида (по материалам Т.М. Пчелиной, 1986)

Возраст	№ скв., обнажения	Глубина, м, № образца	Литология	Коэфф. Откр. Пористости, %	Проницаемость, мд		Плот- ность, г/см ³	Магн. Воспри- имчивость 10 ⁻⁶ ед.СГС	V _p км/с
						⊥			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D ₃ fm	66	24,0	песчаник карбонатн.	3,5					
— “ —	— “ —	139,0	— “ —	2,3					
— “ —	— “ —	150,0	песчаник м/зерн.	15,2	4,0	4,2	2,26	7	3,50
— “ —	— “ —	210,0	алевролит глинист.				2,65	20	
— “ —	— “ —	358,0	песчаник м-кр/зерн.	12,7	<0,1	<0,1	2,37	12	3,45
D ₃ fr	— “ —	459,6	песчаник м-ср/зерн.	10,1	<0,1		2,43	5	
— “ —	— “ —	524,0	аргиллит алевролитистый.				2,66	24	
— “ —	— “ —	620,0	алевроит глинистый.	1,34	2,19		2,62	15	
— “ —	— “ —	654,0	аргиллит алевролитистый.	<1,0			2,67	20	
— “ —	— “ —	667,0	песчаник м/з битуминозный	7,6	1,04	0,74	2,43	1	4,65
— “ —	— “ —	675,0	песчаник м-ср/зерн.	7,6	0,34	0,23	2,45	1	4,00
— “ —	— “ —	690,0	песчаник м-ср/зерн.				2,45	12	
D ₃ fm	64	208,0	песчаник м-кр/зерн.	11,8	<0,1		2,37	7	
D ₃ fr	— “ —	718,0	песчаник кр-ср/зерн., битуминозн.	<1,0	<0,1		2,61	6	
— “ —	— “ —	729,0	песчаник м-ср/зерн. Битум.	5,5	0,33		2,48	3	
— “ —	— “ —	755,0	песчаник ср/зерн.	9,0	0,30		2,45	2	
— “ —	68	82,3	песчаник м/зер. Алевролитистый битуминозн.	3,6	<0,1		2,63	6	
— “ —	— “ —	101,5	песчаник м/зерн.	3,4	<0,1	<0,1			5,00
D ₃ fm	— “ —	189,0	песчаник м-ср/зерн.	5,9	<0,1	<0,1			4,75
— “ —	— “ —	243,5	— “ —	8,1	<0,1	<0,1	2,50	22	4,25
— “ —	— “ —	255,5	песчаник ср-кр/зерн.	7,7	<0,1				
— “ —	— “ —	369,5	песчаник м-ср/зерн.	8,2	<0,1	<0,1	2,54	22	3,80
— “ —	— “ —	400,0	песчаник м/зерн. Алевроит.	5,6	<0,1		2,51	7	4,85
D ₃ fm	— “ —	403,5	аргиллит алевроит.	1,8	0,67		2,67	20	
D ₃ fr	— “ —	459,1	песчаник м/зерн.	5,4			2,56	10	
— “ —	— “ —	474,0	аргиллит	<1,0					
— “ —	— “ —	480,0	— “ —				2,66	11	
— “ —	— “ —	510,0	песчаник м/зерн.				2,49	3	
— “ —	— “ —	514,5	песчаник слоист.				2,36	7	
— “ —	— “ —	515,5	песчаник м-кр/зерн. Слоист	9,1	<0,1				
— “ —	— “ —	628,0	глинисто-алевроит.	<1,0					
— “ —	— “ —	655,5	песчаник м-ср/зерн. Битум.	2,3	<0,1	<0,1	2,53	2	5,55
— “ —	— “ —	665,0	— “ —	4,2	<0,1	<0,1	2,57	2	5,55
— “ —	— “ —	672,0	песчаник м/зерн. Битумин.	3,73	<0,1	<0,1	2,54	1	4,95
D ₃ fr	— “ —	678,0	песчаник м/зерн. Битумин.	4,4	<0,1	<0,1	2,52	30	5,30
— “ —	— “ —	679,0	песчаник м-ср/зерн. Битумин.	3,2	<0,1	<0,1			5,35
— “ —	— “ —	687,0	песчаник м/зерн. Слоист. Битумин.	4,5	<0,1				
— “ —	— “ —	692,0	песчаник м/зерн.	4,0	<0,1	<0,1	2,53	1	5,15
— “ —	— “ —	695,5	песчаник м/зерн. Битумин.	1,2	<0,1	<0,1	2,55	4	4,65
— “ —	— “ —	700,0	алевролит песч. Битумин.	6,5	<0,1	<0,1	2,45	2	4,50
— “ —	— “ —	702,5	песчаник ср/зерн.	2,3	<0,1	<0,1	2,60	1	5,50
— “ —	— “ —	703,1	песчаник ср/зерн. Битумин.	4,1	<0,1				
— “ —	— “ —	709,0	песчаник алевроит-глинист. Битумин.	1,0			2,61	6	
— “ —	— “ —	713,0	алевролит глинист. Битумин.				2,67	12	
— “ —	— “ —	724,7	песчаник м-кр-ср/зер.битумин.	11,09	41,7	5,10	2,36	2	4,90
D ₂ gv	— “ —	753,0	песчаник м-ср/зер.битумин.	3,8	<0,1	<0,1	2,54	5	4,60
— “ —	— “ —	759,6	— “ —	4,8	<0,1	<0,1			4,45
— “ —	— “ —	760,0	песчаник ср/зерн.				2,55	9	
— “ —	— “ —	760,8	песчаник м-ср/зерн.	5,4	<0,1	<0,1	2,55	12	3,85
— “ —	— “ —	775,0	аргиллит				2,61	14	
D ₂	— “ —	788,0	песчаник ср-кр/зерн.	5,4	<0,1	<0,1	2,54	3	4,50
— “ —	— “ —	830,0	алевролит глинист..	1,0	<0,1				
— “ —	— “ —	835,0	песчаник м-ср/зерн.	6,0	<0,1	<0,1	2,54	8	4,45
— “ —	— “ —	845,0	алевролит глинист.	9,9	<0,1		2,68	15	
— “ —	— “ —	852,0	песчаник м/зерн.	3,1	<0,1	<0,1	2,61	7	4,00
— “ —	— “ —	879,0	— “ —	6,3	<0,1	<0,1	2,52	6	5,00
— “ —	— “ —	895,0	алевролит				2,62	10	
— “ —	— “ —	908,0	аргиллит алевроит.				2,68	23	
— “ —	— “ —	934,4	песчаник ср/зерн.	6,2	<0,1	<0,1	2,51	3	4,50
— “ —	— “ —	964,4	алевролит песчан.	1,0			2,69	20	
— “ —	— “ —	964,4	песчаник алевроит.				2,55	4	
— “ —	— “ —	965,1	алевроит глинист. Слоистый.				2,77	20	
— “ —	72	220,5	песчаник м-ср/зерн.	10,4	0,64	0,48	2,38	5	3,20
— “ —	— “ —	250,0	— “ —	10,3	0,21		2,41	5	
— “ —	— “ —	265,5	песчаник кр-ср/зерн.	10,7	0,54	0,62	2,46	6	3,40
— “ —	— “ —	268,5	аргиллит	<1,0			2,68	20	
— “ —	— “ —	295,2	— “ —				2,68	16	
— “ —	— “ —	305,0	песчаник м-ср/зерн.	10,1	<0,1	<0,1	2,42	6	3,70

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
— " —	— " —	365,0	аргиллит				2,67	16	
— " —	— " —	390,0	песчаник м/зерн.	10,4	0,3				
— " —	— " —	410,0	— " —	8,0	<0,1	<0,1			3,90
D ₃ fr	68	656,3	песчаник м-ср/зер.алеврит.	4,2	<0,1				
— " —	— " —	656,9	песчаник ср-м/зер.алеврит.	4,8	<0,1				
— " —	— " —	661,1	— " —	3,9	<0,1				
— " —	— " —	661,6	— " —	4,5	<0,1				
— " —	— " —	665,9	— " —	3,0	<0,1				
— " —	— " —	694,5	алевролит мелкопесчан. глин.	2,1	<0,1				
— " —	— " —	698,7	алевролит мелкопесчан.	4,2	<0,1				
— " —	— " —	701,2	— " —	7,9	<0,1				
— " —	— " —	719,5	песчаник м/зерн.	6,6	<0,1				
— " —	— " —	754,4	песчаник м-ср/зерн.	9,3	<0,1				
— " —	74	118,5	песчаник битумин.	7,9	<0,1	<0,1			3,55
— " —	— " —	120,0	— " —	11,3	3,8				
— " —	— " —	147,0	— " —	8,6	0,65	0,59			4,15
— " —	— " —	176,4	песчаник	12,9	0,74				
— " —	— " —	189,0	аргиллит				2,67	10	
D ₂ gv	— " —	214,0	песчаник	8,9	0,51				
— " —	— " —	250,0	— " —	10,4	<0,1				
— " —	— " —	265,0	— " —	10,3	0,27				
— " —	— " —	297,0	— " —	9,7	0,1	0,1	2,43	10	4,20
— " —	— " —	434,5	песчаник известковист.				2,67	12	
— " —	— " —	475,3	песчаник карбон.	2,0	<0,1				
D ₃ fr	73a	3	песчаник битумин.	2,7	<0,1				
— " —	5	1	песчаник	3,9	<0,1				
— " —	5	2	песчаник битумин.	7,9	0,48				
— " —	14	7	— " —	6,8	<0,1				
— " —	15	6	песчаник	7,7	<0,1				
— " —	15	7	песчаник битумин.	5,0	<0,1				
— " —	15	8	алеврит глинист.	3,8	<0,1				
— " —	46	4	песчаник битумин.	2,6	<0,1				
— " —	46	5	— " —	4,9	<0,1				
D ₁	29	1	песчаник	11,5	0,79				

При этом выяснилось, что скоростные свойства в этих отложениях так же хорошо коррелируются с пористостью, как и параметр плотности (сравнить рис. 6 и рис. 2). Важно отметить, что среднее значение плотности этих девонских отложений, несмотря на различия по местоположению и возрасту, мало отличается от плотности рассмотренных выше ордовикско - силурийских пород, что хорошо согласуется с принадлежностью обеих толщ к единой мегасеквенции, составляющей нижнюю часть осадочного чехла Свальбардской платформы. Это примечание связано с тем, что девон Шпицбергена вообще многие исследователи считают принадлежностью фундамента, а не осадочного чехла [Harland, 1998; Krasil'shnikov, 1996 и др.].

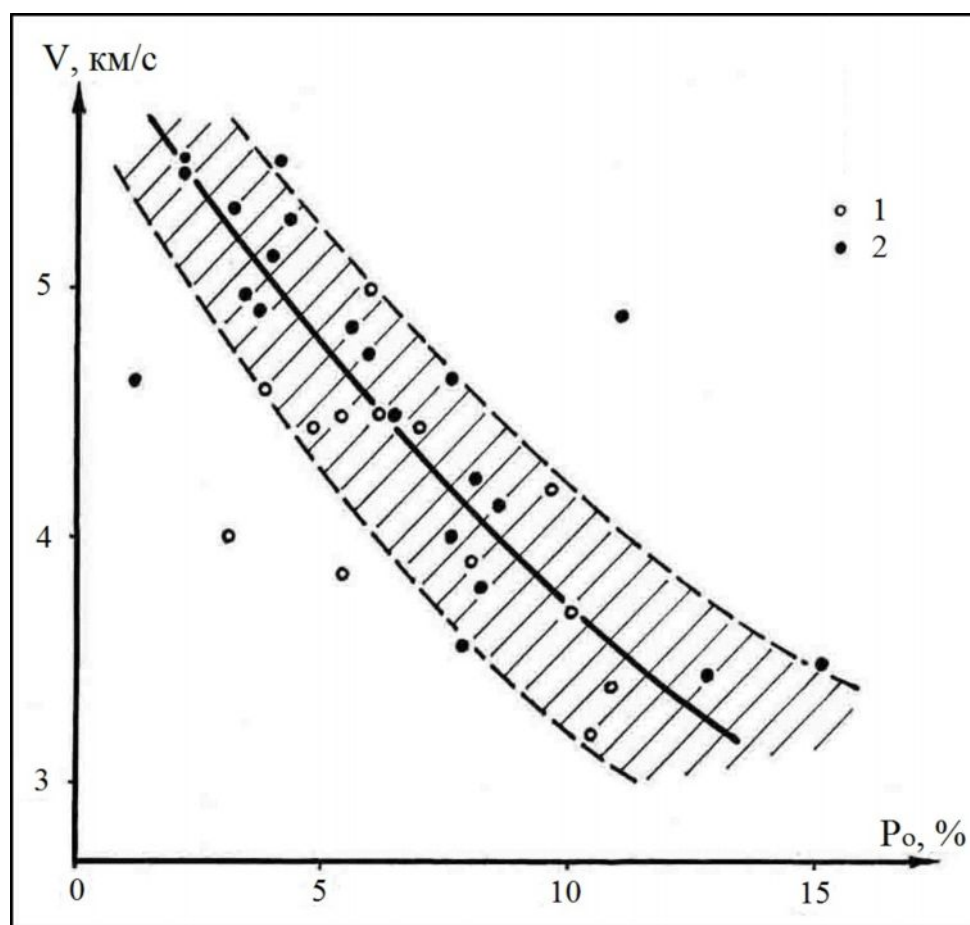


Рис. 6. Зависимость скорости упругих волн (v , км/с) от величины открытой пористости (P_o , %) в девонских отложениях района Пирамиды

1- песчаники среднего девона, 2 - алевролиты и мелкозернистые песчаники верхнего девона (по данным Т.М. Пчелиной).

Латеральные вариации ёмкостных свойств девонских отложений почти не изучены. Судя по данным Р.Г. Курынина, плотность грубообломочных образований, доминирующих на севере Андре-Диксонского авлакогена, в среднем такая же, как и в центральной его части, в окрестностях рудника Пирамида, а это означает, видимо, что уменьшение пористости в СЗ

направлении вследствие тектонической деформированности пород компенсируется возрастанием роли трещиноватости. Если суммарное воздействие этих факторов действительно не изменяет общей ёмкости коллекторов, то оно наверняка ухудшает качество флюидоупоров.

В региональном плане эта закономерность хорошо коррелируется с общей сменой грубозернистых пород, преобладающих в северной части авлакогена, менее крупнозернистыми и более зрелыми осадками в его центральной части. Эти региональные тенденции являются результатом сочетания двух палеогеогеологических факторов: проградации фациальной обстановки подводной дельты, которая постепенно смещалась в ЮВ направлении, и усилением трансгрессивной тенденции в развитии всего девонско-каменноугольного бассейна осадконакопления. Подробнее об этом ранее писали Л.Г. Мурашов, Т. Gjelsvik, Ю.П. Буров и Д.В. Семевский, М.Л. Верба и Ю.Л. Верба [Верба, 2011]. Исходя из этого можно полагать, что в южной части авлакогена, перекрытой более молодыми отложениями, а также в пределах Южно-Шпицбергенского шельфа в девонских отложениях, особенно в среднем отделе девона, могут быть встречены хорошо промытые гранулярные коллекторы.

Каменноугольные отложения

Каменноугольные отложения являются единственной толщей в разрезе архипелага, из которой уже получены притоки газа, конденсата и лёгкой нефти [Верба, 2007]. Отложения карбона представлены широким набором литологических разностей и, соответственно, характеризуются непостоянством значений пористости, которая меняется в большом диапазоне в зависимости от вещественного состава и условий залегания. В окрестностях рудника Пирамида наиболее полный разрез среднего-верхнего карбона вскрыт скв. 110 (рис. 7), которая заложена в осевой зоне Биллефьордского грабена. Снизу этот разрез наращивается разрезом скв. 116-бис, которая вскрыла пластовую интрузию и слой контактово измененных пород (рис. 8).

Разрез карбона многократно изучали А. Гуль, J.L. Cutbill & A. Challinor, Hjelle, E.P. Johannssen & R.J. Steel, Gjølberg, а также российские геологи Б.П. Гаврилов, М.Ю. Милославский. Не повторяясь, подчеркнем главные особенности разреза.

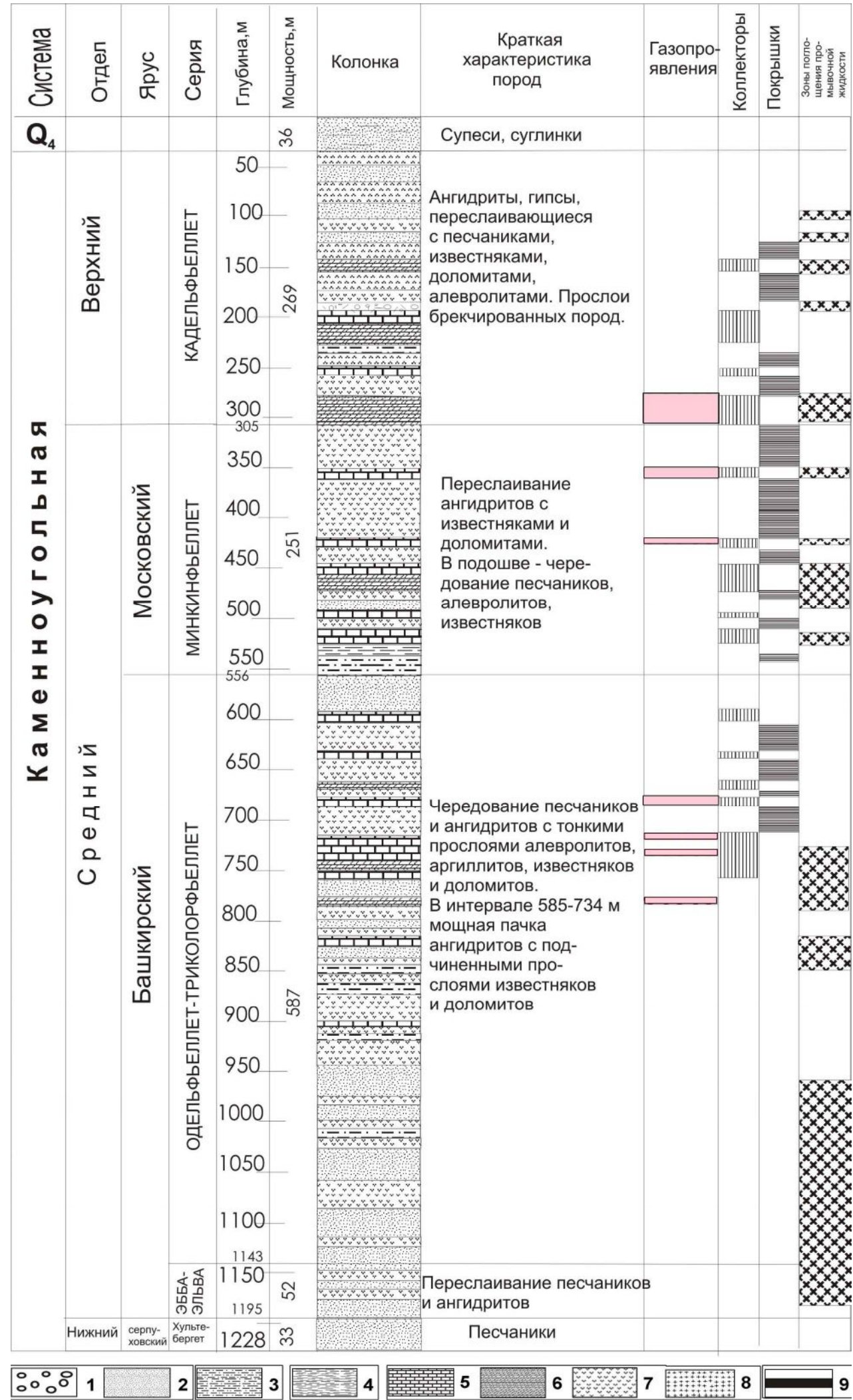


Рис. 7. Петрофизический разрез скв. 110
1 – конгломераты; 2 – песчаники; 3 – алевролиты; 4 – аргиллиты; 5 – известняки; 6 – доломиты; 7 – ангидриты; 8 – изверженные породы (амфиболиты на рис. 8); 9 – угли.

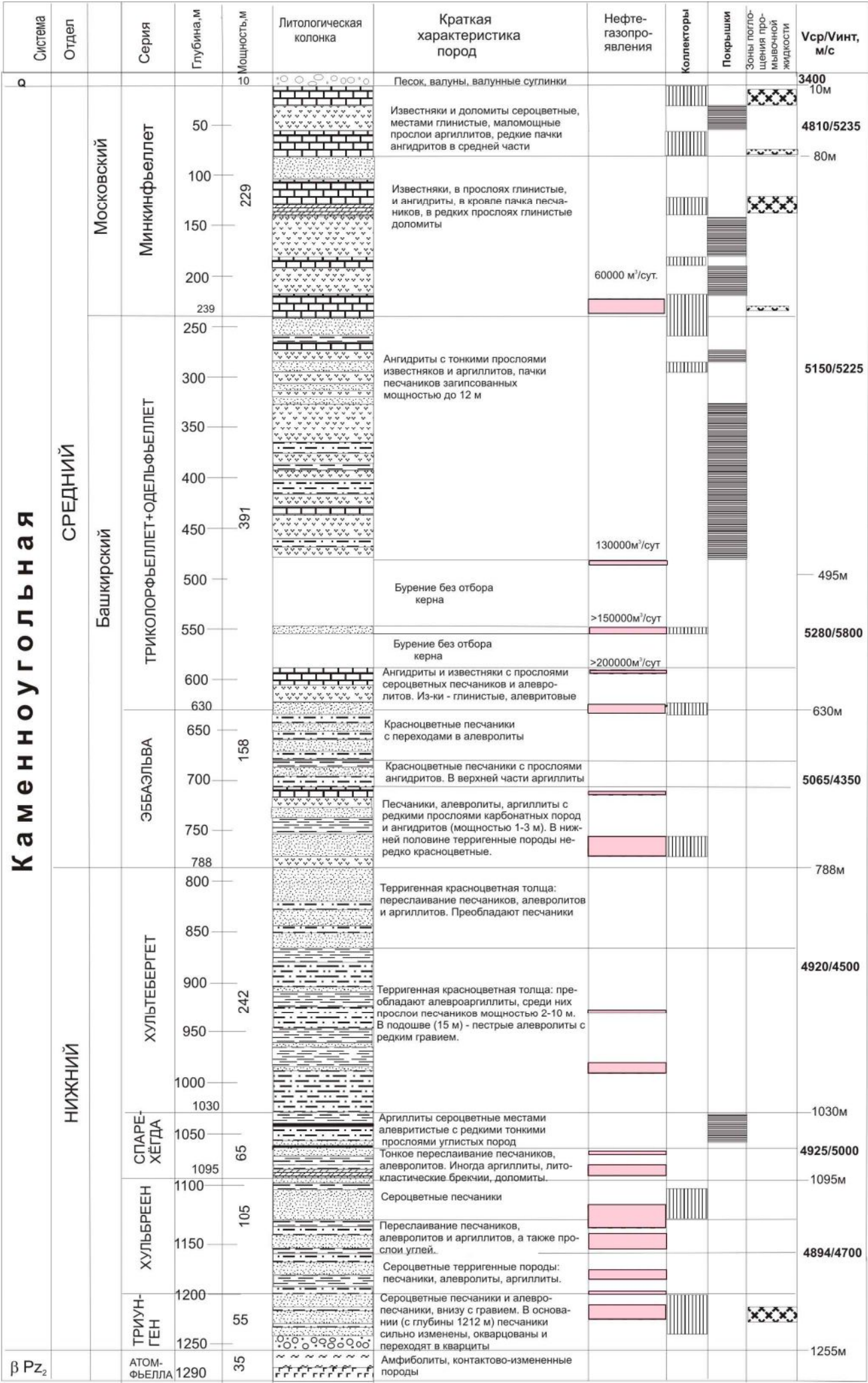


Рис. 8. Петрофизический разрез скв. 116-бис

Основание толщи сложено терригенными угленосными отложениями мощностью 250 м, среди которых преобладают грубозернистые кварцевые песчаники с песчано-глинистым цементом. В толще содержатся мощные пачки алевролитов и аргиллитов, встречаются сравнительно маломощные прослои гравелитов и конгломератов. Вышележащие отложения отличаются резкой фациальной изменчивостью. Преобладают песчано-глинистые образования: песчаники, присутствуют пачки алевролитов и аргиллитов, прослои конгломератов и редкие прослои гипса. Этот комплекс является основным осадочным выполнением Биллефьордского трога и в его осевой зоне по сейсмическим данным достигает мощности порядка 1300...1400 м, при том что на его бортах она не превышает 700...800 м. Комплекс состоит из повторяющихся секвенций, образующих закономерную систему клиноформ, часть которых в фациальном отношении сопоставляется с аллювиальными конусами выноса, обрамляемыми на востоке фациями озерного бассейна. Верхи среднего карбона сложены гипсами и ангидритами, чередующимися с известняками, доломитами, реже, с песчаниками, аргиллитами и конгломератами, которые накопились в изменчивых фациях веерных дельт и прилегающих морских акваторий. Отложения верхнего отдела образуют вместе с нижнепермскими единую мегасеквенцию, которая сложена окремненными и доломитизированными известняками и доломитами, редкими маломощными пачками аргиллитов и сульфатами общей мощностью до 500 м.

Гранулярные коллекторы. Наиболее полно разрез карбона представлен в районе Билле-фьорда, где его полная мощность достигает 1850 м. Анализ геологических данных по району рудника Пирамида показывает, что как по литологическому составу, так в отношении коллекторных свойств эта толща весьма неоднородна (табл. 2). В первом приближении в ней выделяются три крупных секции, отличающиеся типом и величиной емкостных параметров. Первая объединяет преимущественно песчаниковые образования нижнего отдела, в которой преобладают гранулярные коллекторы с довольно высокими значениями пористости. Средние значения пористости в песчаниках - 6...7%. Вторая представлена среднекаменноугольными породами и состоит из крайне изменчивых по простиранию пластов различного литологического состава - песчаников, алевролитов, аргиллитов, ангидритов и известняков, в которых присутствуют гранулярные, трещинные и каверновые коллекторы различной емкости. В карбонатах она редко превышает среднее значение 3,1% (120 определений).

Таблица 2

Коллекторские свойства среднекаменноугольных пород района восточного берега бухты Петунья по данным лабораторных наблюдений
(исследования выполнены в лаборатории ФГУП «ВНИГРИ», аналитик Д.В. Тихомолов;
литология пород дана по полевым описаниям геолога Пирамидской ГРП В.Н. Климова)

№ скв.	Глубина, м	Литология	Пористость	Проницаемость, мд	
				по слою	поперек слоя
1	2	3	4	5	6
116-бис	222,2	известняк	<0,1	<0,1	-
	244,2	песчаник	2,8	<0,1	-
	257,0	известняк	<0,1	-	-
	277,1	песчаник	1,8	<0,1	-
	300,5	— “ —	2,47	<0,1	-
	316,3	— “ —	3,1	1,92	0,58
	402,2	алевролит	1,9	-	-
	415,3	— “ —	<0,1	<0,1	-
	553,7	песчаник	15,5	217,2	-
	708,0		7,9	<0,1	
	708,6		1,7	<0,1	
	708,6	известняк	3,59	0,002	
	709,4		1,6	<0,1	
	709,4	— “ —	0,96	0,003	
	725,0		10,1	-	
	745,7		5,9	<0,1	
	745,8		6,1	<0,1	
	745,9	песчаник	2,77	0,919	
	748,3		3,1	-	
	753,2	— “ —	0,66	0,014	
	753,8		16,0	22,4	
	756,5		20,9	12,2	
	760,8		4,0	<0,1	
	763,1		14,0	0,35	
	763,9		1,4	0,32	
	766,2		1,2	-	
	925,0		15,6	-	
	925,6		6,1	<0,1	
	926,2		6,2	<0,1	
	926,6		3,7	-	
	926,6	— “ —	3,57	0,511	
	983,0		1,8	-	
	985,4		5,2	-	
	989,1		3,6	<0,1	
	990,5		3,0	-	
	990,8		2,9	<0,1	
116-бис	991,5		1,9	0,88	
	1065,0		<1,0	-	
	1067,7		2,0	-	
	1077,3	алевролит	0,24	0,04	
	1089,4	аргиллит	0,80	0,003	
	1077,3		1,3	<0,1	
	1085,6		1,2	-	
	1086,4		3,5	-	
	1087,6		<1,0	<0,1	
	1089,8		2,0	0,52	
118	1091,0		3,7	-	
	118,4	доломит	<0,1	-	-
	126,8	— “ —	<0,1	-	-
	156,0	— “ —	<0,1	-	-
	164,0	песчаник	6,8	10,0	-
	165,3	— “ —	5,2	0,36	0,28
	172,0	доломит	<0,1	-	-
	179,0	песчаник	13,2	130,85	1,73
	185,0	доломит	<0,1	-	-
	224,0	— “ —	<0,1	<0,1	-
	327,0	аргиллит	<0,1	-	-
	329,5	песчаник	2,4	<0,1	-
	329,7	— “ —	2,5	<0,1	-
	339,0	известняк	4,9	<0,1	<0,1
	354,2	— “ —	<0,1	-	-
	362,8	доломит	1,33	-	-
	364,0	алевролит	4,1	<0,1	-
	575,5	известняк	2,35	0,002	
	602,0	— “ —	0,03	0,074	
	634,0	— “ —	3,63	0,005	
	691,2	— “ —	0,47	0,004	
	711,3	— “ —	0,58	0,004	

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6
118	715,0	алевролит	5,61	5,34	
124	83,5	аргиллит	<0,1	-	-
	94,4	доломит	<0,1	-	-
	205,1	песчаник	8,01	0,654	
	208,8	— " —	21,94	42,96	
	212,7	— " —	4,11	0,491	

Третья секция, сложенная, главным образом, хемогенно-карбонатными породами верхов среднего отдела и всем верхним отделом карбона, отличается невысокими емкостными параметрами и содержит коллекторы в основном трещинного и кавернового типов.

Наибольший интерес в качестве потенциальных резервуаров для скопления нефтегазовых залежей представляет верхняя часть нижней пачки и вся средняя, особенно там, где она сложена терригенными разностями пород. Поскольку именно с ними связаны нефте- и газопроявления в колонковых скважинах, коллекторные свойства этой части разреза были изучены более детально.

Непосредственные измерения пористости гранулярных коллекторов проводилось по керну скв. 116-бис, 118 и 124, пройденных на восточном берегу бухты Петунья (табл. 2). Табл. 2 показывает, что доля песчаных разностей в разрезе башкирского яруса уменьшается в юго-восточном направлении от 51% в скв.110 до 30,6% в скв. 117. В этом же направлении на 12% уменьшается и мощность песчаных пластов, составляющая в среднем 6...7 м. Аналогичная тенденция отмечена и для московского яруса: общая мощность песчаных прослоев сокращается на 28%, а их доля в разрезе на этом же расстоянии снижается с 65% до 53%. Коллекторы с пористостью не хуже 5% отмечены в 16% проанализированных образцов, причем большинство из них показало и приемлемые значения проницаемости (более 1 мд). Важно отметить, что одновременно с ухудшением емкостных свойств коллекторов происходит улучшение качества флюидоупоров. Близкие оценки можно получить при анализе данных Э. Юханнсена, изучавшего эти же отложения в естественных обнажениях (Johannessen & Steel, 1992).

Таким образом, исследованная выборка дает основание заключить, что не менее 11,6% мощности всего разреза может рассматриваться в качестве потенциальных резервуаров, преобладающая часть которых относится к пластам песчаников. Результаты бурения колонковых скважин (см. рис. 7, 8) показывают, впрочем, что количество пластов, в которых может находиться флюид, в реальном разрезе больше этого значения, поскольку оно не учитывает возможного влияния различных постседиментационных факторов, увеличивающих размер пустотного пространства в породе.

Вторичные коллекторы. Помимо гранулярных коллекторов, распространение которых контролируется седиментогенным фактором, в разрезе среднего карбона присутствуют также и коллекторы, связанные с вторичными, наложенными процессами - кавернозностью вследствие выщелачивания и тектонической трещиноватостью. Об этом

прямо свидетельствуют водопритоки из интервалов разреза, не содержащих нормальных гранулярных коллекторов, но характеризующихся повышенной трещиноватостью, наблюдаемой непосредственно в керне. Косвенно об этом же говорит появление в керне пустот, особенно характерных для карбонатных прослоев, и присутствие галита в кавернах и трещинах, являющегося результатом перераспределения легкорастворимых компонентов породы. Следовательно, приведенные выше оценки емкостных свойств, основанные только на данных о гранулярных коллекторах, следует рассматривать как самые минимальные.

Более определенно этот вывод вытекает из сопоставления значений открытой пористости и проницаемости в различных литологических типах пород нижнего и среднего карбона. Он показывает, что в разрезе можно различить коллекторы различного типа: порового (I на рис. 9), порово-трещинных (II) и выщелачивания (III). Остальная часть проанализированных образцов характеризует массивные, малопористые прослои, способные служить флюидопорами (поле IV на том же графике). Средне-верхнекарбоновые отложения, содержащие большое количество хемогенных пород, рассматриваются как регионально выдержанная покрывка.

Флюидопоры. Другой вывод, следующий из приведенных табличных данных, заключается в том, что проблема флюидопоров, столь же существенная, как и проблема коллекторов, в конкретных условиях изученного разреза по всей вероятности не будет критичной при оценке возможности сохранения потенциальных залежей УВ.

Наличие большого числа низкопористых пород, обладающих практически нулевой проницаемостью, а также прямые наблюдения над керном скважин, которые указывают на присутствие частых прослоев хемогенных пород, являющихся идеальными покрывками, - все это служит надежным свидетельством наличия в разрезе достаточного количества непроницаемых горизонтов. Доля ангидритов и огипсованных пород в составе среднекаменноугольных пород нарастает снизу вверх от 3% в башкирском ярусе до 43% в московском, а в средней части разреза варьирует в пределах 18...25%. Мощности отдельных пачек хемогенных пород также нарастают вверх по разрезу от 4...6 м внизу до 30 м в верхах московского яруса.

Региональные закономерности развития коллекторных свойств. Приведенные выборки определений коллекторных свойств в силу дискретности опробования характеризует в статистическом смысле случайные значения изучаемого параметра.

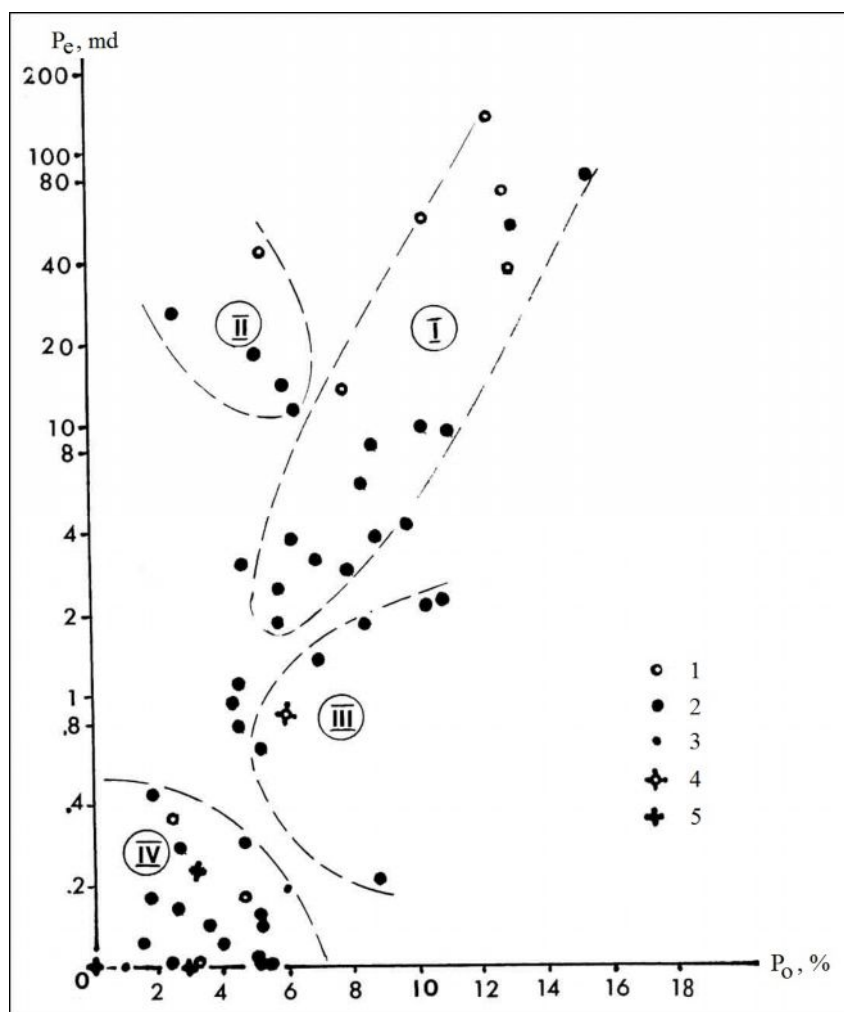


Рис. 9. Соотношение пористости (P_o) и проницаемости (P_e) в породах каменноугольного возраста (1) и отдельно в среднекаменноугольных породах: песчаниках (2) алевролитах (3), гипсах (4) и доломитах (5) (по коллекции Б.П. Гаврилова)

Важную информацию о ёмкостных свойствах каменноугольной толщи в целом содержат сейсмические данные, дополняющие дискретную лабораторную информацию непрерывной, хотя и обобщенной картиной распределения пластов, которые рассматриваются как вероятные резервуары и флюидоупоры. В основе этой информации лежит зависимость скоростных свойств пород от величины пористости, особенно тесная для терригенных пород. Будучи определенными в лабораторных условиях по одним и тем же образцам, оба коррелируемых параметра открывают возможность использования кинематических характеристик сейсмического разреза по данным полевой сейсморазведки МОВ-ОГТ для ориентировочной оценки качества коллекторов.

При использовании этой эмпирической зависимости принималось во внимание вероятность того, что она, будучи установленной не в пластовых, а лабораторных условиях, окажется не вполне адекватной реальным соотношениям скорости и пористости. Обработка

этих данных показала, что для терригенных пород с пористостью не более 5% характерны пластовые скорости порядка 4,5 км/с и выше, а в породах с пористостью более 10%, напротив, не встречаются скорости выше 4 км/с. В подробно исследованном разрезе скв. 116-бис доля таких пород со скоростью не более 4 км/с составляет около 17%. Сопоставление этой цифры с приведенной выше приводит к выводу, что, действительно, «лабораторная» зависимость завышает значение пористости: в относительных величинах в среднем на 10...15%, а в абсолютном выражении не более чем на 2...4 процента даже в наиболее пористых разностях пород. С учетом этой поправки можно принять, что ёмкостью порового коллектора не хуже 5% в нижнем карбоне обладает не менее 35% разреза, а в среднем отделе - не менее 12%.

Таким образом, рассмотренные данные говорят о том, что разрез карбона рудника Пирамида и прилегающих к нему российских лицензионных участков по коллекторным свойствам существенно дифференцирован. О том, что характер распределения коллекторных свойств в каменноугольных отложениях за пределами этой территории сохраняется в общих чертах таким же, можно судить по немногочисленным лабораторным определениям и косвенным данным. Они, в частности, говорят о том, что величина плотности в терригенных и карбонатных породах каменноугольного возраста изменяется в диапазоне от 2,27 до 3,02 г/см³.

Значения плотности нарастают в ряду песчаники-алевролиты-аргиллиты-известняки-доломиты, зеркально отражая тенденцию в поведении открытой пористости. Средняя плотность наиболее интересных как потенциальные резервуары алеврито-песчаных пород в районе Билле-фьорда равна 2,69 г/см³, а на о. Эдж - 2,55 г/см³, на о. Медвежий около 2,5 г/см³. Относительное снижение этих значений в ЮВ направлении не может быть объяснено только особенностями вещественного состава пород. Скорее всего, оно обусловлено снижением активности постседиментационных процессов, в первую очередь, тектонического стресса. Это находит отражение и в усредненных значениях плотности пород.

Для условий напряженной альпийской складчатости о. Зап. Шпицберген Р.Г. Курынин дает цифру 2,79 г/см³. По материалам непосредственных измерений здесь в песчаниках пористость не превышает 1...3% (75 определений), в других разностях (конгломераты, гравелиты, алевролиты) - она не более 1%. Карбонатные породы на западе архипелага в разрезе редки и не содержат коллекторов (пористость не более 1%).

В противоположном направлении, на о. Эдж в условиях спокойного залегания каменноугольных пород средняя их плотность по каротажным данным около $2,72 \text{ г/см}^3$, а пористость в песчаниках в среднем достигает 10%, а в известняках - 1,8% (по шламу из скв. Раддедален). Далее к югу, на о. Медвежий по лабораторным определениям А.Л. Пискарева средняя плотность каменноугольных пород - $2,62...2,65 \text{ г/см}^3$, что, очевидно, отражает общерегиональную тенденцию улучшения качества коллекторов в этом направлении, характерную, как было сказано выше, и для девонских пород.

Таким образом, в региональном плане каменноугольные отложения в целом рассматриваются в качестве толщи с благоприятными коллекторными свойствами, хотя не во всех районах архипелага эти свойства одинаковы. Наиболее подробно эта изменчивость характерна для среднего отдела карбона, отличающегося невыдержанностью вещественного состава пород (табл. 3). С другой стороны, поскольку именно в этой части разреза карбона выявлены залежи УВ, она представляет интерес и в отношении флюидоупоров, которые могли бы обеспечить сохранность газовых и конденсатных скоплений на небольших глубинах, измеряемых сотнями метров.

Влияние мерзлоты на коллекторные свойства. Регионально выдержанной покрывкой являются в данном регионе верхи карбона, сложенные кремнистыми и хемогенными отложениями. В бухте Петунья, где к среднему карбону приурочен ряд скоплений УВ, они, однако, не могут служить флюидоупором, поскольку эта часть разреза денудирована. Тонкие пласты ангидритов среднего карбона здесь также не создают препятствия для миграции УВ ввиду моноклиального падения всей толщи. Остается предположить, что одним из наиболее вероятных факторов, обеспечивающих аккумуляцию на небольшой глубине наблюдаемых углеводородных скоплений в условиях наклонного залегания коллекторов, выступает толща многолетнемерзлых пород.

С целью проверки этого предположения и установления возможности различать в сейсмическом разрезе мерзлые и льдонасыщенные породы от сухих и газонасыщенных или обводненных автором совместно с И.А. Курилович (ВИРГ) было предпринято лабораторное изучение акустических скоростей и коллекторных свойств пород в условиях отрицательных температур. Это исследование было выполнено по керну скважины 116-бис в интервале от 200-1242м (описание вскрытых бурением пород приведено в работах [Верба, 2007 и 2012]).

В верхней части разреза, до глубин 250...400 м породы располагаются в зоне многолетней мерзлоты и не содержат воды в жидкой фазе, а глубже, как правило, они водонасыщены и содержат воду в количестве, пропорциональном величине открытой

пористости, а иногда – залежи УВ. Измеренные в образцах значения акустических скоростей колеблются в этом интервале глубин в весьма широком диапазоне: от 1,80 до 7,07 км/с.

Таблица 3

Оценка пористости пород каменноугольного возраста по результатам измерений скорости прохождения акустических волн в образцах из скв. 116-бис в районе бухты Петунья

Глубина, м	Литология	Скорость, км/с		Пористость, %
		сухие обр.	влажные обр.	
745,8	песчаник	4,53	6,20	13,3
746,8	— " —	4,00	5,45	16,0
760,8	— " —	3,57	5,60	26,2
766,7	— " —	5,00	6,30	8,8
925,7	— " —	4,07	5,06	11,4
926,2	— " —	4,63	4,85	2,2
926,6	— " —	4,30	5,45	11,3
1086,5	— " —	4,23	5,83	14,8
1087,8	алевролит	5,56	5,80	0,9
1124,0	песчаник	4,23	4,70	5,4
1131,6	— " —	4,46	4,86	4,2
1131,9	— " —	5,10	5,63	3,9
1134,6	— " —	4,45	5,16	7,0
1144,6	— " —	4,80	5,03	2,0
1145,5	— " —	4,43	4,90	4,9
1153,8	— " —	4,03	5,06	12,0
1162,1	— " —	4,15	4,83	8,0
1176,1	— " —	4,76	5,47	5,9
1176,3	— " —	4,30	5,60	12,4
1184,1	— " —	3,76	4,67	12,9
1185,4	— " —	3,30	3,53	5,3
1186,8	— " —	4,10	4,86	9,0
1187,8	— " —	3,46	4,06	11,3
1202,6	— " —	4,60	5,30	6,4
1207,6	— " —	3,90	4,60	9,5
1208,4	— " —	3,80	4,26	7,0
1217,7	— " —	4,15	5,53	14,1
1124,2	— " —	4,70	5,70	8,2
1226,0	— " —	5,77	5,83	0,4
1228,5	— " —	4,67	4,90	2,2
1238,2	— " —	4,00	4,67	8,6
1242,2	— " —	4,03	5,10	12,4
1242,5	— " —	4,00	4,67	8,6
1252,1	— " —	5,86	6,76	4,6

Наиболее низкие значения – 1,80...2,35 км/с получены в образцах с повышенной трещиноватостью, наиболее высокие – 6,15...7,07 км/с - определены в ненарушенных, массивных разностях карбонатных пород. В известняках скорость характеризуется средними значениями 6,85 и 6,40 км/с, что в целом типично для них, а в кавернозных разностях она снижается до 5,43 и 4,65 км/с (соответственно поперёк и вдоль слоистости). Отметим, что в Тимано-Печорской провинции карбонатные толщи карбона характеризуются столь же

высокими скоростями. Среднее положение занимают терригенные породы: в песчаниках, за вычетом трещиноватых разностей, скорости колеблются в диапазоне 3,50...5,0 км/с, а в аргиллитах и алевролитах возрастают соответственно до 5,33 и 5,56 км/с. Эти данные показывают значительную дифференцированность разреза каменноугольных отложений по скоростным свойствам и возможность его расчленения по сейсмическим материалам.

Измерения скорости прохождения акустических сигналов по направлению вдоль слоистости и поперёк нее дают представление об анизотропии разреза и различиях в скорости распространения сейсмических волн в реальной геологической среде в вертикальном и горизонтальном направлениях. Эта разница довольно устойчива во всем диапазоне скоростей и колеблется в сухих образцах в интервале от 0,3 до 0,6 км/с. Во влажных и замороженных образцах эта анизотропия снижается до 0,34 и 0,30 км/с соответственно, что отражает гомогенизацию среды под влиянием насыщения порового пространства водой (или льдом - при минусовых температурах). При размораживании образцов анизотропия скорости по разным направлениям снова возрастает до первоначальных значений (иногда, впрочем, скорость становится даже больше первоначальной, что, скорее всего, отражает необратимые, гистерезисные изменения структуры порового пространства при охлаждении и нагревании в лабораторных условиях). В диапазоне скоростей 3...7 км/с скорости прохождения волн в горизонтальном направлении систематически выше в среднем на 0,45 км/с, чем в вкрест напластованию.

Значение этой закономерности, выявленной в лабораторных условиях, состоит в том, что явления анизотропии будут наблюдаться и в реальном геологическом разрезе: преломленная волна, распространяющаяся по поверхностям напластования, будет иметь ощутимо большую скорость, нежели отраженная, луч которой ортогонален этим поверхностям, причем эта разница будет тем больше, чем выше степень расслоенности разреза. Данная закономерность, вообще говоря, хорошо известна по исследованиям в других регионах, однако в каждом случае она имеет различное численное выражение в зависимости от реальных геологических условий. В нашем случае знание численных оценок объемной анизотропии скорости и прецизионное измерение этой разницы по сейсмическим профилям в натурных условиях открывает возможность получения важной информации о том, как эта вертикальная расслоенность меняется по простиранию пород, что имеет большое значение для прогнозирования литологически ограниченных залежей УВ в данном районе.

Проведенные исследования показали также, что скорость акустических волн при насыщении пор водой заметно возрастает, причем это увеличение наблюдается как вкрест, так и по напластованию примерно в одинаковой степени. Ориентировочная оценка влияния этого эффекта дает величину порядка 1,2...1,4 км/с (диапазон колебаний - от 0,6 до 2,2) (табл. 3). Влияние насыщения пор водой на скорость наиболее существенно для относительно низкоскоростных и, следовательно, пористых разностей пород и достигает величины 1,4 км/с для интервала скоростей, соответствующего породам с максимальной пористостью. Замечено кроме того, что для высокоскоростных сред влияние водонасыщенности на скорость заметно меньше, чем для низкоскоростных. Эта особенность очевидно объясняется тем, что породы с высокими значениями скорости, как правило, обладают низкой пористостью, что делает эффект насыщения пор водой несущественным в отношении условий прохождения акустических сигналов. Поскольку в реальных геологических условиях горные породы в той или иной мере содержат поровую воду, то полученные лабораторные данные позволяют исключить из числа наиболее ёмких резервуаров участки сейсмического разреза с высокими пластовыми скоростями и искать такие коллекторы предпочтительно в зонах с выраженной инверсией кинематических параметров. Этот вывод хорошо совпадает с прямым сопоставлением скоростных данных с ёмкостными.

Наличие значимой обратной связи скорости и открытой пористости установлено по данным лабораторных определений, выполненных по материалам Т.М.Пчелиной для терригенных средне-верхнедевонских пород района Пирамиды (рис. 9). Построенная по этим данным зависимость показывает, что в гранулярных коллекторах с открытой пористостью 10% и выше скорости не превышают 4...4,2 км/с, тогда как породы с низкой пористостью (5% и ниже) характеризуются скоростями 4,6 км/с и выше, что свидетельствует об отсутствии эффективных коллекторов в терригенных породах со скоростью 5,0 км/с и выше (по сухим образцам). В каменноугольных отложениях соотношение этих параметров по всей видимости будет аналогичным.

Поскольку скорость в карбонатах, как отмечалось, весьма чувствительна к пористости и мало зависят от давления (и, следовательно, от глубины залегания), то изменение этого параметра при насыщении сухого образца водой позволяют получить хотя и ориентировочную, но независимую оценку параметра пористости (табл. 3).

Определения, выполненные в замороженных образцах, показали, что присутствие льда оказывает двоякое влияние на скорость прохождения акустических волн. Иногда при

замораживании водонасыщенных образцов наблюдается значимое возрастание скорости (на 1,32 и 1,62 км/с соответственно для горизонтального и вертикального векторов), что в целом хорошо согласуется с теоретической моделью. Однако в других случаях определения показали либо незначительное увеличение скорости, либо же ее уменьшение, что по всей видимости отражает разобщение льдом минеральной матрицы породы при замораживании в условиях лаборатории. Таким образом, осталось неясно, можно ли в реальном разрезе ожидать существенного влияния слоя многолетнемерзлых пород на распределение скоростей в вертикальном разрезе.

Сходимость повторных измерений в исследованных образцах оценивается величиной среднеквадратического отклонения $\sigma=0,14$ км/с (при $n=82$), что в первом приближении можно принять за осредненную оценку ошибки воспроизведения, которая включает как аппаратурно-методические погрешности, так и отклонения, обусловленные неоднородностью исследуемого материала. Наименьший разброс значений наблюдается в сухих обломочных породах при плюсовой температуре вкост напластованию слоев ($\sigma=0,10$ км/с), а при измерениях в таких же условиях, но по напластованию, разброс значений заметно возрастает ($\sigma=0,14$ км/с). Эта разница вероятнее всего связана с неоднородностью терригенной матрицы породы, наличием в ней удлиненных зерен и существованием азимутальной упорядоченности в их расположении, что часто имеет место в отложениях флюидальных потоков и, как показал С.Н. Кашубин, может быть зафиксирована непосредственными полевыми наблюдениями. Вследствие этого возникают условия для появления трехмерной анизотропии скоростных свойств, которая, как показывают проведенные исследования, может быть измерена при сейсмических наблюдениях.

Итак, каменноугольная толща может рассматриваться как первый снизу комплекс осадочных отложений, содержащий как коллекторы различного типа и мощности, так и флюидоупоры. Что касается слоя многолетнемерзлых пород как возможной покрывки, то если мерзлота в реальных геологических условиях окрестностей Билле-фьорда и может служить экраном для УВ скоплений (что вполне вероятно), то для подтверждения этого сейсмическими методами нужно иметь возможность фиксировать тонкие различия величины скорости в горизонтальном и вертикальном направлениях, притом что в частотном отношении волновое поле будет когерентно характеру чередования по разрезу контрастных литологических разностей. Ясно, что на практике для уверенного решения этой задачи нужно будет прибегать к другим методам, например, к электроразведке.

Пермские отложения

Породы пермского возраста, довольно широко развитые на архипелаге, не содержат прямых признаков скоплений УВ. В центральной части о. Зап. Шпицберген, где их мощность достигает 1050 м, нижняя пермь сложена доломитами с прослоями ангидритов и алевролитов и песчаников (450 м), а верхняя - в основном известково-кремнистыми породами (600 м). Пористость наиболее распространенных кремнистых пород здесь не более 3%, в карбонатах она несколько выше - 7%, а в редких пачках песчаников в среднем составляет 9% (49 определений). Вместе с тем, в 10% образцов пористость достигает 11...26%. Далее к юго-востоку, на о. Баренца даже в кремнистых породах пористость (по единичным определениям в образцах из естественных обнажений) составляет 21...22%, что, очевидно, не отражает действительной картины, хотя и свидетельствует об общей тенденции улучшения коллекторных свойств в этом направлении. В скв. Раддедален-1 на о. Эдж по данным норвежских геологов в карбонатах пермского возраста на глубине 224...395 м отмечена средняя пористость около 5%, а в прослоях мощностью 2...3 м - до 13...15%. Из одного из таких прослоев получен приток пресной воды дебитом 50 м³/час. На западном побережье в зоне складчатости пористость в кремнистых разностях не превышает 1...2% и только в единичных образцах песчаников она достигает 10% (60 определений).

Таким образом, общий пространственный тренд качества пермских коллекторов обнаруживают такую же закономерность, что и рассмотренных выше. Косвенно эта тенденция подтверждается анализом закономерностей латерального распределения плотности, измеренной в образцах из обнажений в разных районах архипелага. На Западном Шпицбергене плотность пород нижней перми чаще всего находится в интервале 2,65...2,80 г/см³, на о. Эдж - 2,68 г/см³, причем повышение средних значений в конкретных разрезах пропорционально доле доломитов и ангидритов. Плотность пород верхней перми на тех же островах соответственно 2,57...2,67 г/см³ и около 2,6 г/см³. На о. Медвежий плотность преимущественно карбонатной толщи равна 2,63 г/см³.

Скоростные свойства, измеренные по единичным образцам из естественных обнажений на Земле Серкап и по керну скважины Грумантская-1, в целом хорошо совпадают с общей тенденцией и показывают на преобладание в разрезе плотных разностей пород, как правило не обладающих высокими ёмкостными свойствами. По записи сейсмокаротажа скорость распространения продольных волн в нижнепермских отложениях равна 5,8 км/с (рис. 10).

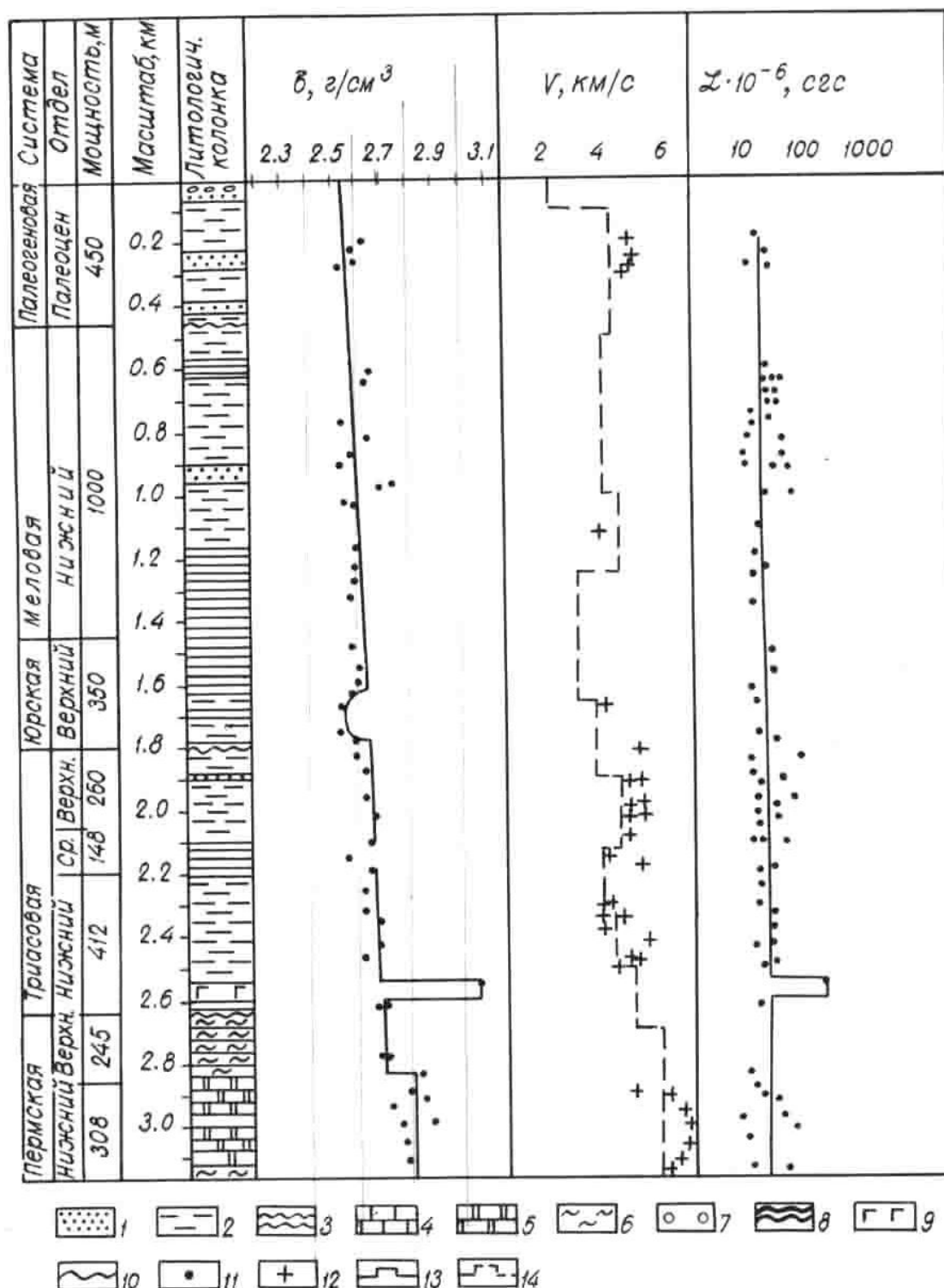


Рис. 10. Петрофизический разрез скв. Грумантская-1. 110.

(по В.В. Верба [Физические свойства..., 1987])

1 – песчаники; 2 - алевролиты; 3 - аргиллиты; 4 – известняки; 5 – доломиты; 6 – кремнистые породы; 7 – галечники; 8 – метаморфизованные породы; 9 – долериты; 10 – тектонический контакт; 11 – средневзвешенное значение физического параметра в интервале отбора керна; 12 – скорость распространения продольных волн по измерениям в образцах (в лаборатории ВНИИОкеангеология); 13 – осредненные значения физических параметров; 14 – график пластовой скорости по данным сейсмокаротажа.

Как было показано выше, такие высокие значения скорости соответствуют массивным разностям карбонатных пород с ничтожной пористостью. Лабораторные определения показывают, что среднеарифметическая величина скорости в известняках и доломитах нижнего отдела - 6,36 км/с, в карбонатных, терригенных и кремнистых породах верхнего отдела - 4,7 км/с. Значения нарастают в ряду: терригенные породы (среднее - 4,0 км/с), кремнистые (4,65 км/с), известняки (среднее - 5,1 км/с), доломиты (5,2 км/с). В целом же интервал изменения значений достаточно широк - 3,65...6,84 км/с, что указывает на преобладание малопористых пород, среди которых встречаются единичные образцы с приличным значением пористости.

Триасовые отложения

Коллекторные свойства триасовых отложений представляют интерес в первую очередь в связи с двумя мощными выбросами газа из скважин на Васдаленской площади, один из которых едва не привел к опасной аварийной ситуации. Разрез триаса сложен аргиллитом-алевролитом-песчаниковыми отложениями в целом с невысокими значениями пористости, мощность которых сильно варьирует, возрастая от 200 м на СЗ архипелага до 1200 м на ЮВ. Как и нижележащие толщи на западе архипелага, они имеют пористость не более 2%, а в центральной части Западно-Шпицбергенского прогиба (скв. Грумантская-1) в среднем - 2,3% (202 образца), и только в редких песчаниковых прослоях она повышается до 10,8%. На восточном борту прогиба эти значения соответственно 3-5% и 16% (99 определений), а еще далее к юго-востоку, в районе Агард-бухты - 10% и 21,8 % (41 определение). На островах Эдж, Баренца и Вильгельма зафиксированы самые высокие значения пористости в триасовых алевролитом-песчаниковых отложениях: они нередко превышают 20%, достигая в отдельных случаях 28...30% (по 214 определениям).

Столь существенная разница коллекторных свойств триасовых отложений на северо-западе и юго-востоке архипелага объясняется одновременным воздействием трех факторов - улучшением сортировки песчаных зерен, снижением доли глинистого материала в цементе и уменьшением уровня интенсивности тектонического стресса и, соответственно, степени катагенеза пород.

Эти три фактора столь же отчетливо контролируют и латеральное распространение плотности пород, которая в пределах архипелага закономерно снижается в восточном и южном направлениях. На западном побережье о. Западный Шпицберген средняя плотность триасовых отложений достигает 2,7-2,75 г/см³, что отражает высокий уровень тектонического стресса. Юго-восточнее, по направлению к скважинам Васдаленская-2 и

Грумантская-1 и далее к Сассен-фьорду и о. Эдж она снижается до $2,67 \text{ г/см}^3$ (минимальные значения плотности по образцам из керна скважин Грумантская-1 и Васдаленская-2 - $2,55 \text{ г/см}^3$), в районе бухты Уиче и на о. Баренца – до $2,51 \text{ г/см}^3$, на о. Надежда - $2,53 \text{ г/см}^3$, на о. Вильгельма - $2,40 \text{ г/см}^3$ а на самом юге, на о. Медвежий $2,37...2,55 \text{ г/см}^3$.

Наблюдаемый на фоне общего регионального тренда разброс значений плотности в отдельных пунктах архипелага дает представление о влиянии литологического фактора, т.е. о разнообразии типов пород и, соответственно, коллекторов. При этом, по мнению Ю.Я. Лившица, наиболее информативны для целей прогноза минимальные значения плотности, в наименьшей степени отражающие постседиментационные преобразования. Так, на западной окраине о. Западный Шпицберген минимальные значения плотности равны $2,46...2,47 \text{ г/см}^3$, в средней части (Сассен-фьорд) - $2,32...2,33 \text{ г/см}^3$ и на восточном побережье, на островах Вильгельма, Баренца, Эдж они составляют $2,08...2,12 \text{ г/см}^3$.

Эти величины заметно ниже средних значений для более древних пород, но латеральные тренды их изменения почти идентичны. Вместе с тем, нужно иметь в виду, что определенный вклад в ёмкость пород вносит и трещитоватость. Зоны повышенной трещиноватости и дробления с многочисленными зеркалами скольжения и брекчированными породами зафиксированы в Грумантской скважине в интервалах 2176...2178, 2206...2210 м, которые соответствуют соответственно среднему и нижнему отделам триаса (рис. 10).

Эти данные, в частности, показывают, что упомянутые газовые выбросы на Васдаленской площади были получены из резервуаров, ёмкость которых обеспечена не только трещиноватостью, как полагали Е.Г. Бро с коллегами, но и пористостью. Определения значений скорости в триасовых отложениях по керну скв. Грумантская-1 легли в диапазон $4,08\div 5,42 \text{ км/с}$ (среднеарифметическое по определениям в 24 образцах составляет $4,71 \text{ км/с}$), причем минимальные значения в этом интервале соответствуют, если судить по рис. 6, коллекторам со сравнительно невысокой пористостью - около 8%.

Таким образом, по сумме прямых и косвенных данных можно заключить, что ёмкость резервуаров, содержащих газ на Васдаленской площади, определяется суперпозицией гранулярной пористости и трещиноватости.

Юрские отложения

Юрские отложения, в разрезе которых доминируют терригенные разновидности, весьма изменчивы по мощности; в наиболее полных разрезах она достигает 600м. Общей чертой разрозненных разрезов выступает единая трансгрессивная тенденция смены фации по вертикали от песчаный внизу до глинистых с карбонатными конкрециями вверх. В целом

отложения юры имеют более высокие емкостные свойства, чем подстилающие, но их распределение по площади обнаруживает такую-же закономерность, что и в нижележащем разрезе. На западе, в районе мысов Сельманесет и Фестингсодден пористость во всех литологических типах пород не превышает 2...3% а в песчаниках - 7,3% (23 определения), в скважинах Грумантская-1 и Васдаленская-2 средние значения не выше 4,5% (8 определений) а в обнажениях в окрестностях Сассен-фьорда – 9...10% и, в единичных прослоях, - до 23% (20 определений).

Эти данные дополняются определениями плотности, которые показывают, что в центральной части Западно-Шпицбергенского прогиба, слабо затронутой альпийским тектогенезом, в частности, на побережье Сассен-фьорда развиты породы с плотностью в среднем от 2,31 г/см³ до 2,51 г/см³. Средние значения плотности на западном побережье значительно выше, что отражает влияние тектонического стресса. Минимальные определения здесь не менее 2,46 г/см³, а наиболее часто встречающиеся значения группируются в интервале от 2,65 до 2,75 г/см³. В соответствии с этим можно полагать, что пористость коллекторов меняется по латерали в таком же направлении, резко снижаясь на западе. В керне скв. Грумантская-1 для юрских пород получено значение 4,14 км/с, что меньше чем в подстилающих, в среднем низкопористых породах. Определенную роль, видимо, в этом играет тектоническая трещиноватость.

Меловые отложения

Разрез меловых отложений ограничен нижним отделом, сложенным терригенными породами, в последовательности которых наблюдается регрессивная тенденция: внизу преобладают аргиллиты, в средней части появляются алевролитовые прослои и углистые песчаники, а сверху – среди нижнеаптских песчаников встречается гравийно-галечный материал. Именно эта часть разреза представляет интерес как потенциальный резервуар с удовлетворительными ёмкостными свойствами. Характерной особенностью верхнебарремской части разреза выступает присутствие туфогенного материала, влияние которого на коллекторные свойства не изучено.

В разрезе Агард-бухты, самом дальнем к востоку, открытая пористость песчаников в соответствии с прогнозом действительно достигает значений 10...17,2% (по 14 образцам). Здесь же отмечены и минимальные значения средней плотности пород - 2,27 г/см³. На противоположном борту Западно-Шпицбергенского прогиба, в полосе альпийских дислокаций, где плотность пород достигает средних значений в интервале 2,62...2,64 г/см³, пористость в среднем не более 3% (107 определений). Иногда она повышается до 5...10%, но

тогда и плотность снижается до значений 2,35...2,46 г/см³. В осевой зоне прогиба, судя по керну в упомянутых скважинах (Грумантская-1 и Васдаленская-2), пористость в среднем не выше 3% (43 определения), максимальное значение - 8,9%. На побережье Сассен-фьорда - соответственно - 5% и 15%. Наименьший замер плотности в породах этой зоны - 2,51 г/см³. По измерениям по керну скв. Грумантская-1 меловая толща в целом характеризуется пластовой скоростью 3,95 км/с. При этом, на величину скорости (и пористости) без сомнения оказывает влияние тектоническая растресканность пород, которая по наблюдениям в Грумантской скважине зафиксирована в интервалах 1296...1302, 1345...1385, 1457...1461 в виде дробления, многочисленных зеркал скольжения и брекчирования.

Таким образом, в меловой толще, как и в более древних породах, наблюдается заметное уменьшение плотности пород и ёмкости коллекторов по мере ослабления стресса.

Палеогеновые отложения

Палеогеновые отложения, венчающие разрез осадочного чехла, широко развиты на о.Зап.Шпицберген и Земле короля Карла. Они представлены мощной терригенной мегасеквенцией с неявно выраженной трансгрессивной тенденцией в смене литофаций по вертикали. В нижней части преобладают паралические образования, представленные в основном песчаниками с углями и более грубообломочными разностями пород, в средней доминируют дельтовые фации, сложенные ритмичным переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов, а в верхах толщи появляются морские известковистые фации. Общая мощность мегасеквенции меняется в широких пределах и достигает максимальных значений порядка 2500м в осевой зоне Западно-Шпицбергенского прогиба.

По данным изучения керна скв. Грумантская-1 породы за пределами полосы альпийских надвигов имеют пористость в среднем 5...6%, но в естественных обнажениях она выше: на берегу Ван-Майен-фьорда - 7,5%, а восточнее, в Адвентдален - 13,2%. Повсеместно отмечается повышенная по сравнению с другими частями разреза пористость самой нижней, баренцбургской свиты нижнего палеогена, в которой пористость достигает в среднем 8...11%. Наибольшие значения плотности отмечены в полосе самого интенсивного стресса, где даже минимальные значения (2,45 г/см³) выше, чем в центральной части о. Западный Шпицберген (2,36 г/см³).

Среднее значение скорости распространения упругих волн по результатам измерений в образцах из керна колонковой скважины 549 на побережье Колес-бухты - 3,65 км/с, из скважины Грумантская-1 скорость заметно выше - 4,98 км/с, а в образцах из обнажений имеют промежуточные значения - 3,87 км/с. Эта разница обусловлена, по всей видимости,

различным уровнем тектонической трещиноватости и релаксации напряженного состояния образцов. По записи сейсмокаротажа в скв. Грумантская-1 скорость распространения продольных волн в кайнозойской1 части разреза тоже повышена и в среднем равна 4,5 км/с.

Характерной особенностью данной толщи является резкая потеря коллекторных свойств при минусовых температурах (в зоне многолетней мерзлоты). Нулевая изотерма на хорошо разбуренной площади Колсбей располагается чаще всего на глубине 280...300 м. Выше этих глубин в скважинах практически отсутствуют водо- и газопроявления, а ниже подошвы мерзлоты они встречаются в каждой третьей выработке. Причем чаще всего они отмечаются на 40...50 м ниже нулевой изотермы, что отражает, видимо, погрешность геотермических измерений и/или небольшое, в пределах 1...1½ градусов необратимое растепление стенок скважины в процессе бурения, не компенсированное отстоем.

Статистическая обработка сведений о водопитоках и газопроявлениях в скважинах на этой площади показала также, что они, помимо контроля подошвой мерзлоты, обнаруживают закономерное тяготение к двум стратиграфическим уровням песчаниковой баренцбургской свиты, залегающей в основании палеогена: к слою толщиной 60м в ее подошве и слою толщиной около 15 м в кровле. Такая закономерность указывает на повышенную ёмкость этих интервалов разреза.

Магнитная восприимчивость как индикатор постседиментационных изменений пород

Величина магнитной восприимчивости измерялась в образцах пород протерозойского, палеозойского, мезозойского и кайнозойского возраста из обнажений на островах Западный Шпицберген, Вильгельма, Баренца, Эдж, Надежды, Медвежий и на Северо-Восточной Земле. Кроме того, определения выполнялись в образцах из керна скважин Грумантская-1 и Васдаленская-2. Подавляющее большинство полученных значений этого параметра находится в интервале $(0...35) \times 10^{-5}$ ед. СИ, причем в указанном интервале средние значения нарастают в литологическому ряду: карбонатные породы - песчаники, кварциты, кремнистые породы - алевролиты, аргиллиты, сланцы. Среднее значение для терригенных пород равно 16×10^{-5} ед. СИ. Вероятно, магнитными минералами обогащена, главным образом, глинистая фракция обломочного материала.

Разрез скважины Раддедален-1, в котором магнитная восприимчивость измерена на 117 образцах шлама, несколько отличен. Самое низкое значение магнитной восприимчивости $(10...100) \times 10^{-5}$ ед. СИ выявлено в той части разреза, где преобладают известняки (интервал 1100...1600 м). Напротив, наибольшие значения до $(1000... 2000) \times 10^{-5}$ ед. СИ получены в интервалах разреза, представленных в основном терригенными породами перми и карбона.

Промежуточные значения $(50...400) \times 10^{-5}$ ед. СИ (при единичном замере 2300×10^{-5} ед. СИ) характерны для доломитов ордовика – нижнего силура.

Значения магнитной восприимчивости изверженных пород изменяются в широких пределах. Минимальные сопоставимы со значениями, типичными для вмещающих толщ, а максимальные превышают их на 2-3 порядка. Так, у образцов из субщелочных интрузий северо-западной части о. Западный Шпицберген и у образцов гранитов с о. Северо-Восточная Земля величина этого физического параметра находится в интервале $(2...26) \times 10^{-5}$ ед. СИ, а у долеритов она достигает уровня $(1800...3050) \times 10^{-5}$ ед. СИ. Повышенным уровнем магнитной восприимчивости, достигающим $(800...3000) \times 10^{-5}$ ед. СИ, выделяются долериты и сидеритовые конкреционные образования на о. Эдж.

Из приведенных данных следует, что основным источником магнитных аномалий следует считать изверженные породы. Они не представляют интереса как возможные резервуары, однако их присутствие, которое может быть выявлено по повышенной величине магнитной восприимчивости, служит своеобразным «фактором риска», указывающим на вероятность ухудшения открытой пористости гранулярных коллекторов и заполнения трещинного пространства продуктами гидротермальной деятельности.

Выводы

Изложенные сведения позволяют сделать ряд практических выводов.

(1) Несмотря на ограниченность данных, они позволяют заключить, что за исключением тектонически напряженных зон, где породы сильно уплотнены и метаморфизованы, а также верхней части разреза, в которой практически повсеместно наблюдаются минусовые температуры и развита многолетняя мерзлота, остальной изучаемый разрез представляет собой достаточно контрастную картину распределения коллекторов и флюидоупоров, которая вообще характерна для платформенных областей. Однотипность физических параметров и закономерностей латерального распределения всех изученных стратиграфических подразделений показывает, что все они, включая и докаменноугольные толщи, относятся в формационном отношении к недислоцированным покровным комплексам, которые по комплексу признаков сопоставимы с платформенным чехлом Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Данный вывод дополняет собой аргументы в пользу общности этих крайних, симметрично расположенных окраин Баренцевоморского региона [Verba, Daragan-Sushchova and Pavlenkin, 1992]

(2) благоприятными коллекторными свойствами обладают отдельные интервалы разреза во всех стратиграфических уровнях от ордовика до палеогена, но наиболее ёмкие

коллекторы гранулярного типа выявлены в нижнем и среднем карбоне, отдельных пачках триаса, верхах нижнего мела и базальной *баренцбургской* свите палеогена. Порово-кавернозные коллекторы могут быть встречены в среднепалеозойской толще. Сведения о развитии коллекторов трещинного и кавернозного типа весьма ограничены и позволяют предполагать их присутствие в триасовых и юрских отложениях Васдаленской площади, а также в окрестностях рудников Пирамида и Баренцбург, где часто наблюдались уходы промывочной жидкости, связанные либо с тектонически нарушенными зонами в палеогеновых породах, либо с кавернозными - в каменноугольных. Зоны трещиноватости и дробления часто встречались по стволу Грумантской скважины.

(3) сказанное выше относится и к покрышкам, которые встречаются по всему разрезу, но наиболее выдержанными и мощными флюидоупорами выступают верхнекаменноугольные хемогенные породы, аргиллитовые пачки в триасе и низах юры и толща многолетнемерзлых пород. В частности, в разрезе карбона долины р. Эбба флюидоупорами выступают часто встречающиеся пачки сульфатных пород, обладающих почти нулевой пористостью и такой же проницаемостью. Надёжной покрышкой может служить и пласт каменной соли, отмеченный в скв. 118. Аналогичные пачки ангидритов и гипсов, из-под которых зачастую получали притоки газа, были встречены в разрезе скважин 110, 116, 116-бис, 117 и 118.

(4) латеральная изменчивость гранулярных коллекторов практически во всех стратиграфических подразделениях характеризуется единым региональным трендом, который выражается в заметном падении качества резервуаров с приближением к Западно-Шпицбергенской полосе альпийских надвигов и постепенном их улучшении в противоположном, юго-восточном направлении. Наличие такой региональной закономерности позволяет уверенно прогнозировать качество коллекторов на всей территории архипелага, а также утверждать, что на акваториальном юго-восточном обрамлении Шпицбергена, в частности в прогибе Ольги, существует достаточно высокая вероятность встретить надёжные резервуары в средне-верхнепалеозойском и мезозойском разрезе.

Итак, рассмотренные выше данные позволяют заключить, что весь разрез фанерозойских отложений в той или иной мере способен вмещать миграционные флюиды. Как в отношении пористости, так и в отношении проницаемости породы осадочного чехла Шпицбергена являются далеко не таким безнадежными, как об этом часто пишут норвежские геологи, вероятно не без влияния политических соображений. Важно отметить,

что по петрофизическим свойствам нижнепалеозойские, девонские и каменноугольные породы образуют непрерывный и закономерный ряд, изменения параметров в котором определяются постепенным нарастанием катагенетической зрелости вниз по разрезу, а не разделяются на два принципиально различных класса, соответствующих складчатому фундаменту и недислоцированному осадочному чехлу, как это можно было бы ожидать, исходя из традиционных тектонических представлений зарубежных исследователей [Harland, 1998]. Это позволяет рассматривать в составе осадочных комплексов, перспективных в нефтегазоносном отношении весь мощный комплекс фанерозоя, включая венд-кембрийские, ордовикские и девонские, которые ранее исключались из числа потенциально нефтегазоносных. Что касается раннепалеозойских коллекторов, то достаточно оптимистическое заключение об их присутствии в разрезах архипелага Шпицберген, видимо, лучше было рассматривать как вероятностное.

Автор приносит благодарность сотрудникам треста Арктикуголь В.Г. Трифоненкову, А.Э. Вертелю и Б.Н. Климову, оказавшим помощь в проведении полевых исследований, и сотруднице ВНИИОкеангеология В.В. Верба за помощь в работе с петрофизической информацией.

Литература

Алехин С.В., Армишев А.М., Батулин Д.Г., Борисов А.В., Бро Е.Г., Верба В.В., Верба М.Л., Виноградов А.В., Волк В.Э., Грамберг И.С. (ред.), Гуревич В.И., Дараган-Суцова Л.А., Журавлев В.А., Зархидзе В.С., Иванова Н.М., Керусов Н.И., Красильщиков А.А., Ливиниц Ю.Я., Миловицкий Я.П., Махотина Г.П., Остистый Б.К., Преображенская Э.Н., Пчелина Т.М., Ронкина З.З., Сенин Б.С., Цилёв В.Р., Шипелькевич Ю.В., Шипилов Э.В., Юнов А.Ю., Яшин Д.С. Баренцевская шельфовая плита. - Л.: Недра. - 1988. - 263 с.

Армишев А.М., А.В. Борисов, Бро Е.Г., Верба М.Л., Остистый Б.К., Сороков Д.С., Устинов Н.В., Шимараев В.Н. Геологическое строение Западно-Арктической континентальной окраины по данным геофизических наблюдений и глубокого бурения // Геология морей и океанов (доклады советских геологов на МГК). - Л. - 1988. - С. 195-203.

Верба М.Л. Приток нефти из палеогеновых отложений Шпицбергена // Геологическое строение перспективных акваторий Мирового океана. - Л.: Севморгео. - 1989. - С. 55-65.

Верба М.Л., Захаров Е.В., Маргулис Л.С., Ливиниц Ю.Я. Основные результаты уточнения прогнозных ресурсов нефти и газа на шельфе Баренцева и Карского морей // Комплексное освоение нефтегазовых ресурсов континентального шельфа СССР. - Мурманск. - 1989. - С. 20-21.

Верба М.Л. Среднепалеозойские рифтогенные структуры Баренцевской плиты // Поиски, разведка и добыча нефти и газа в Тимано-Печорском бассейне и Баренцевом море. - Доклады II Международной конференции, ВНИГРИ, 24-28 июня 1996 г. - СПб: ВНИГРИ. - 1996. - С. 89-96.

Верба М.Л., Верба Ю.Л. Метаморфиты Биллефьордской зоны разломов на Шпицбергене – горст докембрийских пород, или палеозойская интрузия? // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. – 2002. - Вып. 4. - С. 178-198.

Верба М., Иванов Г. Есть ли нефть и газ на Шпицбергене // Нефть России. – 2006. - № 11. - С. 56-59.

Верба М.Л. Проявления природных углеводородов в осадочном чехле Шпицбергена // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2007. - Т.2. - <http://www.ngtp.ru/rub/6/018.pdf>.

Верба М.Л. Геологические и геохимические предпосылки перспектив нефтеносности среднепалеозойских отложений Андре-Диксонского авлакогена (Шпицберген) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. - Т.7. - №2. - http://www.ngtp.ru/rub/1/31_2012.pdf.

Курынин Р.Г. Плотность и магнитная восприимчивость горных пород архипелага Шпицберген. - Материалы по геологии Шпицбергена. - Л.: НИИГА. – 1965. – С. 276-284.

Методические рекомендации по комплексным геологическим, петрографо-минералогическим геохимическим, петрофизическим, геофизическим, гидрогеологическим исследованиям сверхглубоких скважин. - М.: Мингео СССР. – 1986. - 78 с.

Петрофизика: Справочник. В трех книгах. Книга вторая: Техника и методика исследований. / Под ред. А.А. Молчанова и Н.Б. Дортман. – М.: Недра. - 1992. – 256 с.

Пчелина Т.М. Нефтеносность девонских отложений района Мимердален (архипелаг Шпицберген) // Геологическое строение и нефтегазоносность Арктических морей России. - СПб.: ВНИИОкеангеология. – 1994. - С. 39-47.

Физические свойства горных пород Баренцевоморского региона. / Под ред. И.С. Грамберга. - Апатиты: КолФАН СССР. – 1987. - 81 с.

Шварц В.Л. Литолого-стратиграфическое расчленение разреза скважины Раддедален-1 (остров Эдж арх.Шпицберген) // Геологическое строение Баренцево-Карского шельфа. - Л.: ПГО Севморгеология. – 1985. - С. 44-59.

Швембергер Ю.М. Перспективы освоения ресурсов Арктической нефти // Сборник трудов НИИ Системных исследований. - М. – 1986. - №5. - С. 45-51.

Школа И.В., Пчелина Т.М., Мазур В.Б., Альтер С.М. Новые данные о составе и строении осадочного чехла по материалам бурения Грумантской параметрической скважины // Геология осадочного чехла архипелага Свальбард. - Л.: НИИГА. – 1980. - С. 13-24.

Bergh S.G., Braathen A., Andresen A. Interaction of Basement-Involved and Thin-Skinned Tectonism in the Tertiary Fold-Thrust Belt of Central Spitsbergen, Svalbard // AAPG Bulletin, v. 81, 1997, No. 4 (April), p. 637-661.

Bergsager E. Hydrocarbon resources and perspectives in future exploration in Norwegian and Barents Seas. GECO, 1987, p. 64-93.

Bergsager E. Hydrocarbon resources and perspectives in future exploration in Norwegian and Barents Seas // VTT Symp. (Polartech.-86, Helsinki 27-30 oct. 1986, vol.3), Espoo, 1986, p. 64-93.

Gjelsvik T. A new occurrence of Devonian rocks in Spitsbergen // Arb. Norsk polarinst. 1972. Oslo, 1974, p. 23-28.

Harland W.B. Geology of Svalbard. - Geol. Soc. mem. 17, Cambridge, 1998, 529 p.

Hjelle A. Geology of Svalbard. –Polarhendbok, Oslo. 1993. No. 7. 154 p.

Iansen E. Early Norwegian-based exploration for petroleum on Spitsbergen Islands, from 1959 up to today. - В кн.: Комплексные исследования природы Шпицбергена. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002, с. 105 – 111.

Krasil'shnikov A.A (ed.). Soviet geological research in Svalbard 1962 – 1992. Extended abstracts of unpublished reports. Norsk Polarinst., Meddelelser NR 139, Oslo, 1996. 103p.

Manby G.M. Tertiary folding and thrusting in NW Svalbard // Tertiary Tectonics of Svalbard. Norsk Polarinstitut. # 46, Oslo, 1988, p. 17-20.

McCann A.J., Dallmann W.K. Reactivation History of the long-lived Billefjorden Fault Zone in north central Spitsbergen, Svalbard // Geol.Mag. 1996, 133 (1). p. 63-84.

Nagy, J. Oil exploration in Spitsbergen, 1967 // Polar Record 14, 1968, p. 197.

Pentilla, W.C., Church, R.E. Hydrocarbon potential of the Hornsund-Storfjordarea, South Spitsbergen. Rep. NPN., 1984. st. prp. № 16, 2 p.

Skilbrei, J.R. Interpretation of Geophysical Data from the Northwestern Barents Sea and Spitsbergen.- Geol. Surv. of Norway and Univ. of Trondheim, Norw. Inst. of Techn., 1993.

Spitsbergen area exploration programs pick up // Oil and Gas J., 1985, 83, №5, p. 40-41.

Tertiary Tectonics of Svalbard // Extended abstracts from Symposium. Edited by W.K. Dallmann, Y. Ohta, A. Andersen. Oslo, 26-27 April 1988.

Townsend Ch., Mann A. The Tertiary orogenic belt of West Spitsbergen. AComment. Norsk. Gejl. Tidsskr., vol. 69, 1989. p. 135-136.

Verba, M.L., L.A. Daragan-Sushchova, A.D. Pavlenkin. Riftogenic Structures of the western Arctic shelf investigated by refraction surveys // International Geology Review, 1992, 34, No 8, p. 753-764.

Verba, M.L., N.K.Evdokimova. Magmatic intrusions influence on oil and gas generation of Barents sea Mesozoic Rocks // Abstr. 57-th Conf. EAGE, Glasgow, 29 May - 2 June 1995, p. 539.

Verba M.L.

Federal State Unitary Scientific & Production Company for Marine Geological Prospecting SEVMORGEО, Saint Petersburg, Russia, verba@sevmorgeo.com

SEDIMENTARY COVER RESERVOIR OF SVALBARD ARCHIPELAGO

The data obtained by the author during field works in the vicinity of the Barentsburg and Pyramid mines of Arktikugol complex of enterprises are analyzed. Additional information obtained by previous researchers in various areas of the Svalbard archipelago, including wells Grumantskaya-1 and Raddedalen-1, is used, as well as the results of petrophysical study of the collection of geologists of Polar Marine Geological Expedition and VNIIOkeangeologia. The results of laboratory study of porosity, density, velocity and magnetic properties are presented. It is concluded that the Phanerozoic sediments' section is not so hopeless in terms of porosity and permeability as previously thought. Furthermore, the section of Svalbard archipelago has similar features with the section of the Timan-Pechora province in terms of reservoir properties (one of the prerequisites for petroleum potential). The different types of reservoirs are identified on the basis of petrophysical properties in the Lower Paleozoic, Middle Devonian, Lower and Middle Carboniferous, Middle Triassic and Cretaceous-Paleocene strata, which sometimes contain fluid migration. The halogen bands and permafrost rocks are considered as confining beds.

Key words: petrophysics, reservoirs, confining beds, permafrost, sedimentary cover, Phanerozoic, wells, Svalbard archipelago.

Reference

Alekhin S.V., Armishev A.M., Baturin D.G., Borisov A.V., Bro E.G., Verba V.V., Verba M.L., Vinogradov A.V., Volk V.E., Gramberg I.S. (red.), Gurevich V.I., Daragan-Sushchova L.A., Zhuravlev V.A., Zarkhidze V.S., Ivanova N.M., Kerusov N.I., Krasil'shchikov A.A., Livshits Yu.Ya., Malovitskiy Ya.P., Makhotina G.P., Ostistyy B.K., Preobrazhenskaya E.N., Pchelina T.M., Ronkina Z.Z., Senin B.S., Tsilev V.R., Shipel'kevich Yu.V., Shipilov E.V., Yunov A.Yu., Yashin D.S. *Barentsevskeya shelf'ovaya plita* [Barents shelf plate]. Leningrad: Nedra, 1988, 263 p.

Armishev A.M., A.V. Borisov, Bro E.G., Verba M.L., Ostistyy B.K., Sorokov D.S., Ustinov N.V., Shimaraev V.N. *Geologicheskoe stroenie Zapadno-Arkticheskoy kontinental'noy okrainy po dannym geofizicheskikh nablyudeniy i glubokogo bureniya* [Geological structure of the Western Arctic continental margin on the basis of geophysical observations and deep drilling]. *Geologiya morey i okeanov (doklady sovetских geologov na MGK)*. Leningrad, 1988, p. 195-203.

Bergh S.G., Braathen A., Andresen A. Interaction of Basement-Involved and Thin-Skinned Tectonism in the Tertiary Fold-Thrust Belt of Central Spitsbergen, Svalbard. *AAPG Bulletin*, vol. 81, 1997, no. 4 (April), p. 637-661.

Bergsager E. Hydrocarbon resources and perspectives in future exploration in Norwegian and Barents Seas. *GECO*, 1987, p. 64-93.

Bergsager E. Hydrocarbon resources and perspectives in future exploration in Norwegian and Barents Seas. *VTT Symp. (Polartech.-86, Helsinki 27-30 oct. 1986, vol.3)*, Espoo, 1986, p. 64-93.

Fizicheskie svoystva gornykh porod Barentsevomorskogo regiona [Physical properties of rocks of Barents Sea region]. Editor I.S. Gramberg. Apatity: KolFAN SSSR, 1987, 81 p.

Gjelsvik T. A new occurrence of Devonian rocks in Spitsbergen. *Arb. Norsk polarinst.*, 1972. Oslo, 1974, p. 23-28.

Harland W.B. *Geology of Svalbard*. - *Geol. Soc. mem.* 17, Cambridge, 1998, 529 p.

Hjelle A. *Geology of Svalbard*. - *Polarhåndbok*, Oslo. 1993, no. 7, 154 p.

Iansen E. Early Norwegian-based exploration for petroleum on Spitsbergen Islands, from 1959 up today. In: *Kompleksnye issledovaniya prirody Shpitsbergena*. Apatity: KNC RAS, 2002, p. 105-111.

Krasil'shchikov A.A (ed.). Soviet geological research in Svalbard 1962 – 1992. Extended abstracts of unpublished reports. Norsk Polarinst., Meddelelser NR 139, Oslo, 1996, 103 p.

Kurynin R.G. *Plotnost' i magnitnaya vospriimchivost' gornykh porod arhipelaga Shpitsbergen* [Density and magnetic susceptibility of rocks of Svalbard]. Materialy po geologii Shpitsbergena. Leningrad: NIIGA, 1965, p. 276-284.

Manby G.M. Tertiary folding and thrusting in NW Svalbard // Tertiary Tectonics of Svalbard. Norsk Polarinstitut. # 46, Oslo, 1988, p. 17-20.

McCann A.J., Dallmann W.K. Reactivation History of the long-lived Billefjorden Fault Zone in north central Spitsbergen, Svalbard. Geol.Mag. 1996, 133 (1). p. 63-84.

Nagy, J. Oil exploration in Spitsbergen, 1967. Polar Record 14, 1968, p. 197.

Pchelina T.M. *Neftenosnost' devonskikh otlozheniy rayona Mimerdalen (arhipelag Shpitsbergen)* [Petroleum potential of the Devonian deposits of Mimerdalen area (Svalbard)]. Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost' Arkticheskikh morey Rossii. Saint Petersburg: VNIIOkeangeologiya, 1994, p. 39-47.

Pentilla, W.C., Church, R.E. Hydrocarbon potential of the Hornsund-Storfjordarea, South Spitsbergen. Rep. NPN., 1984. st. prp. no. 16, 2 p.

Petrofizika: Spravochnik. V trekh knigakh. Kniga vtoraya: Tekhnika i metodika issledovaniy [Petrophysics: A Handbook. In three books. Book Two: Technique and methods of research]. Editor A.A. Molchanova, N.B. Dortman. M: Nedra, 1992, 256 p.

Shkola I.V., Pchelina T.M., Mazur V.B., Al'ter S.M. *Novye dannye o sostave i stroenii osadochnogo chekhla po materialam bureniya Grumantskoy parametricheskoy skvazhiny* [New data on the composition and structure of the sedimentary cover based on drilling of Gruman parametric well]. Geologiya osadochnogo chekhla arhipelaga Sval'bard. Leningrad: NIIGA, 1980, p. 13-24.

Shvarts V.L. *Litologo-stratigraficheskoe raschlenenie razreza skvazhiny Raddedalen-1 (ostrov Edzh arkh. Shpitsbergen)* [Lithologic and stratigraphic division of the well section Raddedalen-1 (Island Edge arh. Shpitsbergen)]. Geologicheskoe stroenie Barentsevo-Karskogo shel'fa. Leningrad: PGO Sevmorgeologiya, 1985, p. 44-59.

Shvemberger Yu.M. *Perspektivy osvoeniya resursov Arkticheskoy nefti* [Development prospects of the Arctic oil]. Sbornik trudov NII Sistemnykh issledovaniy. Moscow, 1986, no. 5, p. 45-51.

Skilbrei, J.R. Interpretation of Geophysical Data from the Northwestern Barents Sea and Spitsbergen.- Geol. Surv. of Norway and Univ. of Trondheim, Norw. Inst. of Techn., 1993.

Spitsbergen area exploration programs pick up. Oil and Gas Journal, 1985, 83, no. 5, p. 40-41.

Tertiary Tectonics of Svalbard. Extended abstracts from Symposium. Edited by W.K. Dallmann, Y. Ohta, A. Andersen. Oslo, 26-27 April 1988.

Townsend Ch., Mann A. The Tertiary orogenic belt of West Spitsbergen. AComment. Norsk. Gejl. Tidsskr., vol. 69, 1989, p. 135-136.

Verba M., Ivanov G. *Est' li neft' i gaz na Shpitsbergene* [Is there oil and gas in Svalbard]. Neft' Rossii, 2006, no. 11, p. 56-59.

Verba M.L. *Geologicheskie i geokhimicheskie predposylki perspektiv neftenosnosti srednepaleozoyskikh otlozheniy Andre-Diksonskogo avlakogena (Shpitsbergen)* [Middle Paleozoic deposits of Andre-Dickson aulacogen (Spitsbergen) - geological and geochemical background for petroleum potential prospects]. Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika, 2012, vol. 7, no. 2, available at: http://www.ngtp.ru/rub/1/31_2012.pdf.

Verba M.L. *Pritok nefti iz paleogenovykh otlozheniy Shpitsbergena* [The oil flow from the Paleogene deposits of Spitsbergen]. Geologicheskoe stroenie perspektivnykh akvatoriy Mirovogo okeana. Leningrad: Sevmorgeo, 1989, p. 55-65.

Verba M.L. *Proyavleniya prirodnnykh uglevodorodov v osadochnom chekhle Shchpitsbergena* [Natural hydrocarbon manifestations in the sedimentary cover of Svalbard]. Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika, 2007, vol. 2, available at: <http://www.ngtp.ru/rub/6/018.pdf>.

Verba M.L. *Srednepaleozoyskie riftogennyye struktury Barentsevskoy plity* [Middle Paleozoic rift structures of Barents plate]. In: Poiski, razvedka i dobycha nefi i gaza v Timano-Pechorskom bassejne i Barentsevom more. Papers of II international conference, VNIGRI, 24-28 June 1996. Saint Petersburg: VNIGRI, 1996, p. 89-96.

Verba M.L., Verba Yu.L. *Metamorfity Billef'ordskoy zony razlomov na Shpitsbergene – gorst dokembriyskikh porod, ili paleozoyskaya intruziya?* [Metamorphites of Billeford fault zones on Svalbard - horst of the Precambrian rocks or Paleozoic intrusions?]. Geologo-geofizicheskie kharakteristiki litosfery Arkticheskogo regiona, 2002, vol. 4, p. 178-198.

Verba M.L., Zakharov E.V., Margulis L.S., Livshits Yu.Ya. *Osnovnye rezul'taty utochneniya prognoznnykh resursov nefi i gaza na shel'fe Barentseva i Karskogo morey* [The main results of clarifying oil and gas expected resources in the Barents and Kara Seas]. Kompleksnoe osvoenie neftgazovykh resursov kontinental'nogo shel'fa SSSR. Murmansk, 1989, p. 20-21.

Verba, M.L., L.A. Daragan-Sushchova, A.D. Pavlenkin. Riftogenic Structures of the western Arctic shelf investigated by refraction surveys. International Geology Review, 1992, 34, no 8, p. 753-764.

Verba, M.L., N.K.Evdokimova. Magmatic intrusions influence on oil and gas generation of Barents Sea Mesozoic Rocks. Abstr. 57-th Conf. EAGE, Glasgow, 29 May - 2 June 1995, p. 539.