

Модель осадконакопления пашийского горизонта (терригенная толща девона) Южно-Татарского свода Волго-Уральской нефтегазоносной провинции

В.В. Силантьев^{1,4*}, М.Ф. Валидов¹, Д.Н. Мифтахутдинова¹, В.П. Морозов¹, Б.Г. Ганиев²,
А.А. Лутфуллин², К.Д. Шуматбаев², Р.М. Хабилов², Н.Г. Нурғалиева¹, З.А. Толоконникова^{1,3},
Э.А. Королев¹, В.А. Судаков¹, А.В. Смирнова¹, К.А. Голод¹, А.А. Леонтьев¹, Р.Р. Шамсиев¹,
М.В. Нойкин¹, В.Е. Косарев¹, Д.А. Никонорова¹, Р.Ф. Ахметов¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

²ПАО «Татнефть», Альметьевск, Россия

³Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

⁴Филиал Казанского (Приволжского) федерального университета в городе Джизаке, Джизак, Узбекистан

В статье впервые представлены карты коэффициента песчанистости, коэффициента расчлененности и мощностей пашийского горизонта терригенной толщи девона Южно-Татарского свода, построенные на основе анализа данных геофизических исследований по 25000 скважинам. Карты созданы с помощью метода пространственной интерполяции «Natural Neighbor» и программного продукта ArcGIS Pro.

Модель осадконакопления пашийского горизонта является интерпретацией построенных карт, а также обобщением результатов проведенных детальных исследований ядра (литологических, седиментологических, ихнотекстурных, петрофизических и др.), анализа фондовых и опубликованных материалов.

Основные положения предлагаемой модели следующие. Формирование осадков пашийского горизонта происходило в морском бассейне, в условиях, сравнимых со средним шельфом современных морей – в зоне открытого моря с преобладанием деятельности течений. Дно бассейна представляло собой относительно ровное плато, на котором происходило одновременное накопление песчаного, алевроитового и глинистого материала. Накопление осадков всех типов происходило во время трансгрессии морского бассейна. Регрессия моря приводила к эрозии и разрушению уже сформированных осадков.

Положительные формы рельефа морского дна, сложенные преимущественно песчаным хорошо отсортированным материалом, рассматриваются как автохтонные подводные песчаные валы, сформированные постоянными течениями, параллельными батиметрическому контуру дна. Валы образовывали обширные системы почти по всей территории современного Южно-Татарского свода. Одновременно с подводными песчаными валами, в подводных ложбинах, образованных поперечными течениями (со стороны берега в сторону моря), формировались аллохтонные плохо отсортированные осадки, отличающиеся меньшей зрелостью.

Предлагаемая модель объясняет выдержанность мощности отложений пашийского горизонта, мозаичное распределение песчанистости по площади, линзовидную форму песчаных и алевроитовых тел, являющихся породами-коллекторами. Модель может быть экстраполирована на другие стратиграфические интервалы терригенной толщи девона со сходными седиментологическими признаками.

Ключевые слова: модель осадконакопления, терригенный девон, пашийский горизонт, Волго-Уральская область, нефтеносность, коллектор

Для цитирования: Силантьев В.В., Валидов М.Ф., Мифтахутдинова Д.Н., Морозов В.П., Ганиев Б.Г., Лутфуллин А.А., Шуматбаев К.Д., Хабилов Р.М., Нурғалиева Н.Г., Толоконникова З.А., Королев Э.А., Судаков В.А., Смирнова А.В., Голод К.А., Леонтьев А.А., Шамсиев Р.Р., Нойкин М.В., Косарев В.Е., Никонорова Д.А., Ахметов Р.Ф. (2022). Модель осадконакопления пашийского горизонта (терригенная толща девона) Южно-Татарского свода Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. *Георесурсы*, 24(4), с. 12–39. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.4.2>

Введение

Южно-Татарский свод (ЮТС) – самое крупное (300×200 км) положительное тектоническое сооружение Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, расположенное в ее центральной части, отвечающей юго-восточной окраине Восточно-Европейской платформы (ВЕП)

(рис. 1). Терригенные девонские отложения пашийского и тиманского горизонтов Южно-Татарского свода являются основными многопластовыми (до 15-ти пластов) нефтеносными объектами, содержащими основную долю разведанных и потенциальных ресурсов (Муслимов, 2007).

В результате почти вековой истории исследования ЮТС установлены основные продуктивные пласты D_0 , D_1 , D_{II} , D_{III} , D_{IV} , соответствующие в стратиграфическом аспекте (сверху вниз) *тиманскому*, *пашийскому*, *муллинскому*, *ардатовскому* и *воробьевскому* горизонтам (рис. 2, 3) терригенной толщи девона (ТТД) франско-живетского возраста.

*Ответственный автор: Владимир Владимирович Силантьев
e-mail: Vladimir.Silantiev@kpfu.ru

© 2022 Коллектив авторов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Пласт Д₁, приуроченный к пашийскому горизонту, включает пять основных (Д₁-а, Д₁-б, Д₁-в, Д₁-г, Д₁-д) пропластков. Это высокопродуктивный, экономически эффективный, самый сложный в геологическом отношении и поэтому наиболее изученный объект (Муслимов, 2007; Данилова, 2008).

Нефтеносные песчаники и песчанистые алевролиты пашийского горизонта разделены аргиллитами и глинистыми алевролитами; часто замещаются ими, уменьшаясь в мощности, и иногда полностью выпадают из разреза.

Пространственное изменение геологического разреза объясняется большим фаціальным разнообразием ТТД и уже более полувека вызывает у исследователей стремление найти закономерности этого процесса.

Строение, свойства и изменчивость пашийского горизонта и пласта Д₁ рассмотрены во многих публикациях (например, Миропольская и др., 1956; Тихий, 1956, 1969, 1973, 1975; Михайлова, 1973, 1977; Шакиров, 2003; Данилова, 2008).

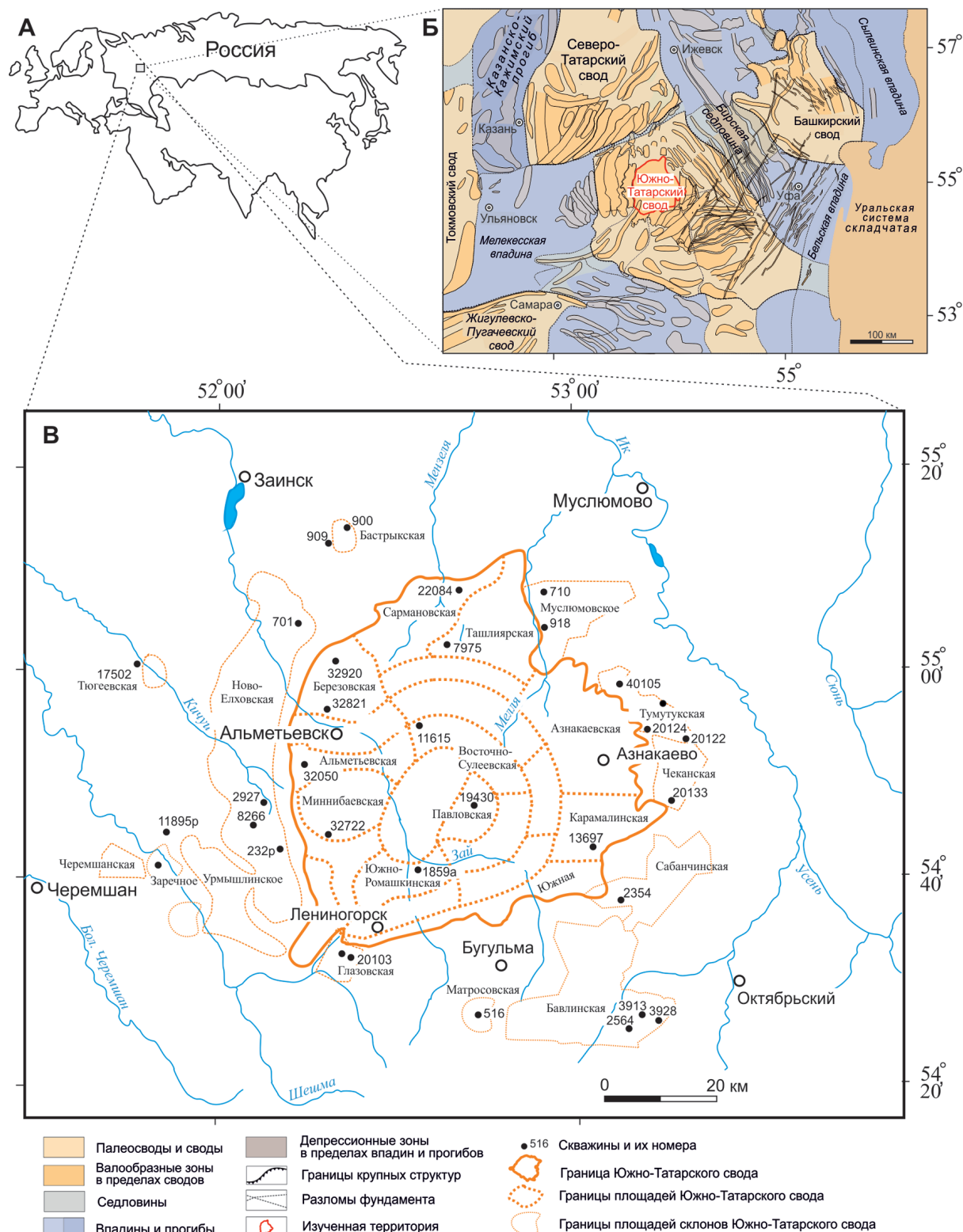


Рис. 1. Местоположение Южно-Татарского свода на обзорной (А) и тектонической (Б) картах; В – расположение изученных скважин; тектоническая карта дана по (Шаргородский и др., 2004)

В этих работах реконструкция условий осадконакопления и выделение фаций основаны на комплексном литологическом анализе, включающем макроописание керна, изучение шлифов, гранулометрию и т.д., на данных геофизических исследований скважин (ГИС) и иных методах.

Цель данной статьи – разработка и обоснование модели осадконакопления пашийского горизонта, объясняющей причины фациальной пестроты пашийских отложений. Достижение цели включало решение следующих задач:

- комплексный анализ ГИС-данных по 25040 скважинам;
- построение карт коэффициентов песчаности, расчлененности и мощностей для нижней и верхней части пашийского горизонта математическим методом пространственной интерполяции «Natural Neighbor» (Sibson, 1981), визуализированного с помощью продукта ArcGIS Pro;
- детальное изучение керна более 40 скважин ПАО «Татнефть», пробуренных как на самом ЮТС, так и на его склонах (рис. 1);
- сравнительный анализ обстановок осадконакопления пашийского горизонта с обстановками современных и древних бассейнов.

Стратиграфический объем пашийского горизонта: история и современность

Детальная литологическая, палеонтологическая, петрофизическая, фациальная, характеристика пашийского горизонта приведена в многочисленных публикациях (Мирополюская и др., 1956, 1960; Мальцев, 1959; Саркисян, Михайлова, 1961; Михайлова, 1973, 1977; Тихий, 1973, 1975; Алиев и др., 1978; Губарева, 2003; Шакиров, 2003; Муслимов и др., 2007a, b; Данилова, 2008; Ларочкина, 2008; Фортунатова и др., 2013; Лощева и др., 2017 и др.). Информация, содержащаяся в этих работах, различается шириной охвата территории, методологией, количеством анализируемого материала.

Пашийские отложения залегают в верхней части ТТД, начиная завершающий (пашийско-тиманский) этап ее накопления. История их формирования неотделима от истории формирования всей ТТД и поэтому рассматривается как часть единого геологического процесса. Термин «*пашийский горизонт*» (слои, свита) стал использоваться в геологии ВЕП с 1951 г. С этого времени и до 2018 г. включительно его стратиграфическое положение неоднократно уточнялось, а объем постепенно уменьшался.

История изменения объема пашийского горизонта. В пределах ЮТС отложения ТТД впервые были вскрыты в 1940 г. на Туймазинской структуре Западной Башкирии, а чуть позже, в 1945–1946 гг., на смежной территории юго-востока Татарии в районе сс. Шугурово и Бавлы.

Первоначальная технологическая схема ТТД ЮТС, включающая песчаные пласты D_{IV} – D_{III} – D_{II} – D_I , была разработана А.А. Трофимуком (1947) на разрезах Туймазинской структуры. Биостратиграфический вид ей придали М.Ф. Микрюков и К.Р. Тимергазин (Микрюков, Тимергазин, 1948), доработав на основе принципа цикличности, лито- и биостратиграфических данных. Первоначальная схема ТТД оказалась очень удобной для всех видов геологических работ и стала основой всех последующих стратиграфических схем.

В первоначальной схеме ТТД (90–120 м) была выделена в *туймазинскую свиту*, которая состояла из трех «горизонтов» (снизу вверх): *ардатовского*, *нарышевского*, *михайловского*, названных по разрезам скважин, расположенным у сс. Ардатовка, Нарышево и Михайловка Западной Башкирии (Микрюков, Тимергазин, 1948).

Ардатовский горизонт включал (снизу вверх): песчаный пласт D_{IV} , глинистую пачку, песчаный пласт D_{III} , репер «средний известняк».

Нарышевский горизонт включал (снизу вверх): нижнюю глинистую пачку, песчаный пласт D_{II} , среднюю глинистую пачку, песчаный пласт D_I , верхнюю глинистую пачку, репер «верхний известняк».

Михайловский горизонт включал карбонатно-терригенные отложения, залегающие между «верхним известняком» и *доманиковой свитой*.

Всесоюзное совещание по девонским отложениям Русской платформы и Западного склона Урала, состоявшееся в 1951 г., утвердило первую *Унифицированную стратиграфическую схему девонской системы Волго-Уральской области*, упразднив все стратиграфические подразделения ТТД, выделенные по разрезам Башкирии (Решения..., 1951). Вместо них, предлагалось использовать либо общие стратиграфические подразделения (например, *верхнеживетский подъярус* как аналог *ардатовского горизонта*), либо местные свиты Западного Урала (*пашийская*, *кыновская*, *саргаевская*), которым (административным методом) был придан ранг *региональных слоев*, прослеживаемых от Урала на всю территорию ВЕП.

Так, *пашийские слои*, обозначенные как нижнее подразделение франского яруса, впервые были введены в практику работ геологов Башкирии и Татарии. По Схеме 1951 г. *пашийские слои* включали: пласт D_{III} , среднюю глинистую пачку, пласт D_I и верхнюю глинистую пачку. «Верхний известняк» был выделен как базальная часть вышележащих *кыновских слоев*.

Унифицированная схема девона Волго-Уральской нефтегазоносной провинции 1960 г. повысила ранг западноуральских подразделений до *горизонтов* (*пашийский*, *кыновский*) и, наряду с ними, стала использовать горизонты Воронежской антеклизы – *воробьевский* и *старооскольский* (Решения..., 1962). Объем *пашийского горизонта* был уменьшен: теперь он включал только пласт D_I и верхнюю глинистую пачку первоначальной схемы (Микрюков, Тимергазин, 1948). Нижняя часть пашийских слоев Схемы 1951 г., т.е. пласт D_{II} и средняя аргиллитовая пачка с репером «черный известняк», была выделена в *муллинский горизонт* со стратотипом в Западной Башкирии (скважина 17 Муллинская, Туймазы).

Таким образом, схемы 1951 и 1960 гг. предлагали расчленять разрезы ТТД ЮТС на подразделения, установленные либо на Западном Урале (в 1000 км восточнее), либо на Воронежской антеклизе (в 1000 км западнее). Стратотипические разрезы этих горизонтов существенно отличаются от разрезов ТТД ЮТС. Проблема решалась выделением для одного и того же горизонта нескольких типов разрезов (например, Алиев и др., 1978).

Унифицированная схема девонской системы Русской платформы 1965 г. оставила без изменений объем и возраст *пашийского горизонта* (Решения..., 1965). Изменения затронули нижележащие отложения ТТД: они были

выделены в *старооскольский горизонт*, включающий *воробьевские*, *ардатовские* (подразделение было восстановлено) и *муллинские* слои.

В 1970–1980-х гг. глобальная стратиграфия девонской системы была существенно уточнена, благодаря использованию фауны конодонтов, позволяющих проводить широкие межрегиональные корреляции. К сожалению, конодонты распространены преимущественно в карбонатных и кремнистых отложениях. В терригенных породах они встречаются редко. Из-за этого, стратиграфия ТТД ВЕП к 1990-м гг. осталась на прежнем уровне и, как и прежде, базировалась на «цикличности разреза» и фациально зависимых группах ископаемых остатков: остракодах, брахиоподах и миоспорах.

Межведомственное стратиграфическое совещание по девону Русской платформы 1988 г. внесло в схему ТТД лишь формальные изменения, повысив ранг подразделений предыдущей схемы. *Старооскольский надгоризонт*, отвечающий всему объему живетского яруса, стал включать в себя три горизонта: *воробьевский*, *ардатовский* и *муллинский* (Решение..., 1990).

Положение пашийского горизонта в современной стратиграфической шкале является неопределенным. Это происходит из-за отсутствия в нем руководящих морских ископаемых и прежде всего конодонтов, которые лежат в основе зональной стратиграфии девона. Данные по конодонтам из смежных стратиграфических интервалов (*воробьевский*, *ардатовский*, *тиманский*) позволяют (Халымбаджа, Чернышева, 1970; Аристов, 1988; Ovnatanova, Konoнова, 2008; Назарова, Кононова, 2016, 2020) определять место *пашийского* горизонта в верхней части живетского яруса (Aleksiev et al., 1996; Фортунатова и др., 2013; Унифицированная субрегиональная стратиграфическая схема..., 2018) (рис. 2).

В 2018 г. Межведомственный стратиграфический комитет России утвердил новую Унифицированную стратиграфическую схему верхнего девона отложений Волго-Уральского субрегиона, в которой пашийский горизонт перенесен из франского яруса в живетский, а граница между средним и верхним девонem (живетским и франским ярусами) совмещена с подошвой тиманского горизонта (Унифицированная субрегиональная стратиграфическая схема..., 2018). При этом объем пашийского горизонта снова сокращен: теперь в нем осталась только алевроитово-песчаная толща пласта D_1 с низкими значениями ГК. Верхняя глинистая пачка первоначальной схемы (Микрюков, Тимергазин, 1948), подстилающая репер «верхний известняк», отчленена от пашийского горизонта и присоединена к вышележащему тиманскому горизонту франского яруса. Предполагается, что эта пачка фиксирует трансгрессию, произошедшую в начале тиманского времени (Фортунатова и др., 2013).

В данной статье принята схема расчленения ТТД, используемая ПАО «Татнефть» (Муслимов и др., 2007 а, б; Смелков, Тухватуллин и др., 2007) и основанная на Схеме 1990 г. (Решение..., 1990). Соответственно, используются следующие объемы подразделений: *эйфельский ярус* включает (здесь и далее, снизу вверх) гравийно-песчаный пласт D_v и карбонатно-аргиллитовую пачку (репер «нижний известняк»); *воробьевский* горизонт включает пласт D_{IV} и аргиллитово-алевролитовую пачку

(Микрюков, Тимергазин, 1948); *ардатовский* – пласт D_{III} , «средний известняк» и аргиллитово-алевролитовую пачку; *муллинский* – пласт D_{II} и аргиллитовую пачку с репером «черный известняк»; *пашийский* горизонт – пласт D_I и верхнюю аргиллитовую пачку. Граница между живетским и франским ярусами и спорное стратиграфическое положение пашийского горизонта не имеют принципиального значения для тематики данной статьи и здесь специально не обсуждаются.

Изменение объема пашийского горизонта, его не вполне определенное стратиграфическое положение свидетельствуют с одной стороны об условности расчленения всей ТТД ЮТС, а с другой – о внутреннем единстве ТТД и генетической близости всех входящих в нее подразделений.

Пашийский горизонт в терригенной толще девона. Характеристика полных разрезов ТТД ЮТС, включающая послойные описания фрагментов скважин и/или их литологические колонки, содержится в фондовых отчетах и ряде публикаций (Антропов, Батанова, 1960; Саркисян, Михайлова, 1961; Алиев и др., 1978 и др.). Обобщенные сведения приведены в сводных работах (Михайлова, 1977; Губарева, 2003; Смелков, Тухватуллин, 2007). Подробная информация о породах-коллекторах пашийского и тиманского горизонта дана Т.Е. Даниловой (Данилова, 2008). Краткие сведения о ТТД, изложенные ниже, основаны на фондовых, опубликованных и собственных материалах и сфокусированы главным образом на литотипах, их особенностях (сортировка, зрелость), ихнотекстурах, биотурбации, ископаемых остатках, т.е. на признаках, позволяющих реконструировать условия осадкообразования.

Эйфельский ярус начинается стратиграфическую последовательность ТТД, трансгрессивно перекрывая кристаллический фундамент и/или верхнепротерозойские образования платформы. Наиболее полные разрезы расположены на С-В и Ю-В склонах ЮТС.

На Бавлинской площади разрез эйфельского яруса (18 м) включает две пачки: нижнюю – гравийно-песчаную (пласт D_v) и верхнюю – карбонатно-аргиллитовую. Нижняя пачка (9 м) представлена неотсортированными разномерными песчаниками, прослоями гравийными, с большим количеством обугленных растительных остатков и стяжениями пирита; отмечаются прослои сидерит-шамозитовых железных руд. Верхняя пачка (9 м) сложена известняками и доломитами глинистыми битуминозными, участками органогенными (криноидными), включающими прослойки пород доманикоидного облика (репер «нижний известняк»).

На юге ЮТС (Южно-Ромашкинская площадь) эйфельские отложения (32,5 м) залегают на элювии кристаллического фундамента и представлены только терригенными породами с отсутствием сортировки (аналоги пласта D_v): аргиллитами песчано-алевроитовыми с углистым детритом и песчаниками кварцевыми средне- и крупнозернистыми с примесью гравийного материала.

Палеонтологические данные позволяют сопоставлять эйфельские отложения ЮТС с *мосоловским* горизонтом эйфельского яруса центральных областей ВЕП (Антропов, Батанова, 1960). Соответственно, длительность перерыва между отложениями эйфеля и живета на ЮТС оценивается в объеме *черноярского* горизонта (рис. 2) (Aleksiev et al., 1996; Губарева, 2003).

Рис. 2. Положение пашийского горизонта в Международной хроностратиграфической шкале. События глобальной аноксии морских бассейнов (доманиковые и доманикоидные фауны), глобальные биокризисы и эвстатические трансгрессивно-регрессивные циклы даны по (Becker et al., 2020); слои с фауной конодонтов Центрального Девонского поля даны по (1) (Аристов, 1988); (2) (Назарова, Кононова, 2016, 2020); красным цветом выделены конодонтовые зоны, прослеживаемые на Восточно-Европейской платформе; FOD pristina – первое местонахождение вида *Ancyrodella pristina* (Халымбаджа, Чернышева, 1970).



Рис. 3. Некоторые разрезы ТТД ЮТС, иллюстрирующие фаціальную изменчивость стратиграфических подразделений и чередование в разрезе сортированных и несортированных пород (по Саркисян, Михайлова, 1961, с изменением)

Воробьевский горизонт прослеживается не во всех разрезах и часто бывает не отделен от вышележащего арда-товского горизонта. В тех разрезах, где горизонт (5–30 м) выделяется, он обычно сложен в основании крупно- и мелкозернистыми песчаниками пласта D_{IV} , выше сменяющимися полосчатыми алевролитами и аргиллитами. В верхней части горизонта иногда прослеживается тонкий прослой известняка (репер «фонарик»), представленного разнообразными биокластовыми, остракодовыми и микробиально-водорослевыми типами. Породы горизонта часто сильно биотурбированы, в т.ч. многоуровневыми структурами *Zoophycos* и *Spirophyton*.

В ряде разрезов (рис. 3) горизонту соответствует пачка пород с полным отсутствием сортировки: песчаники и гравелиты кварцевые (иногда с примесью полевых шпатов и обломков пород) и высоким содержанием каолинита.

Арда-товский горизонт (10–35 м) включает две пачки: нижнюю, алеврито-песчаниковую (пласт D_{III}) и верхнюю, глинисто-карбонатную (репер «средний известняк»).

Нижняя пачка (14–20 м) в тех разрезах, где выделяется пласт D_{III} , сложена отсортированными песчаниками крупно- и мелкозернистыми, алевролитами глинистыми крупнозернистыми слоистыми, включающими прослой оолитовых шамозитовых и лептохлорит-сидеритовых руд. В некоторых разрезах песчаники отсутствуют и замещены алевролитами и/или плотными аргиллитами. В этом случае пласт D_{III} не выделяется.

Верхняя пачка представлена алевролитами глинистыми мелкозернистыми слоистыми, переходящими вверх по разрезу в аргиллиты бурые плитчатые с растительным детритом и/или, при повышенной известковости, с фосфоритовыми конкрециями и обломками раковин головоногих моллюсков (*Agoniatites*), лингулид, конхострак, обломками панцирей рыб. Алевролиты часто сильно биотурбированы (до 100 % переработки осадка организмами), ихнофоссилии представлены *Zoophycos*, *Spirophyton* и *Planolites*.

Репер «средний известняк» залегает в нижней части верхней пачки и представлен, как правило, скрытокристаллическими биокластовыми известняками, часто с примесью алеврито-песчаного материала (до 20–30 %).

Муллинский горизонт (8–30 м) содержит две пачки: нижнюю, алеврито-песчаниковую (пласт D_{II}) и верхнюю, глинисто-карбонатную (репер «черный известняк»).

Нижняя пачка (7–25 м), в тех разрезах, в которых выделяется пласт D_{II} , сложена отсортированными песчаниками мелкозернистыми; песчаники представлены либо одним (15–20 м) пластом, либо разделены полосчатыми алевролитами на несколько прослоев (по 2–7 м). В некоторых разрезах песчаники полностью отсутствуют и замещены интенсивно биотурбированными или «червявыми» (Михайлова, 1977, стр. 12) алевролитами, иногда включающими прослой (2–3 м) алевропесчаников.

Ихноразнообразие в горизонте увеличивается: ихнокомплекс *Zoophycos*, *Spirophyton* и *Planolites* дополняется ходами *Teichichnus*. Степень биотурбации слабеет, в среднем, породы переработаны на 60 %.

Верхняя пачка (5–10 м) сложена преимущественно алевролитами и аргиллитами. Алевролиты песчаные мелкозернистые биотурбированные, включают линзы сидерита и лептохлорит-сидерита. Аргиллиты бурые,

почти черные, пиритизированные, иногда битуминозные, с растительным и раковинным детритом, со стяжениями сидерита, конкрециями фосфоритов и остатками головоногих моллюсков (*Orthoceras*), кораллов, замковых брахиопод, лингулид, конхострак. В середине пачки – репер «черный известняк» – известняк биокластовый, в основании песчано-алевритовый, включающий прослой почти черной доманикоидной породы.

Пашийский горизонт (10–60 м) сложен типичными для него хорошо отсортированными мелкозернистыми песчаниками и крупнозернистыми алевролитами (пласт D_I), биотурбированными алевролитами и аргиллитами, несортированными глинисто-алевритовыми породами со сферосидеритом. В некоторых разрезах песчаники составляют 80–90 % от мощности горизонта, в некоторых – полностью отсутствуют (рис. 3).

На ЮТС пласт D_I технологически разделяется на пять основных и пять дополнительных технологических пропластков, имеющих свою собственную буквенно-численную номенклатуру (рис. 4). Репер «аргиллит» отделяет два нижних пропластка от трех верхних. Его кровля служит поверхностью условного деления горизонта на нижнюю и верхнюю части (Данилова, 2008).

Тиманский горизонт (5–40 м). Стратотип – тиманская свита, р. Ухта, Южный Тиман; был введен в Стратиграфическую схему девона ВЕП (Решение ..., 1990) взамен кыновского, нижняя часть которого в стратотипе на Западном Урале имеет живетский возраст (Artyushkova et al., 2011).

Нижняя граница горизонта совпадает с подошвой репера «верхний известняк». Выше следует пачка шоколадно-бурых и зеленых аргиллитов, постепенно сменяющаяся «ритмитами» – тонким переслаиванием (5–12 мм) аргиллитов и крупнозернистых алевролитов, осложненными многочисленными ходами илоедов. На этом уровне в разрезах северного и западного склонов ЮТС распространены прослой (от 1 до 5) хорошо отсортированных песчаников и алевролитов пласта D_0 . Верхняя половина горизонта складывается «среднекыновским известняком» (репер «аякс») и перекрывающей его пачкой глинисто-алевритовых пород.

Тиманский горизонт ихнологически разнообразен: к тонкослоистым аргиллитам приурочены ходы *Lingulichnus*, в алевролитах преобладают *Skolithos* и *Planolites* с редкими *Scolicia*. Степень биотурбации увеличивается от 0–10 % в аргиллитах до 100 % в алевролитах.

«Среднекыновский известняк» является типовым стратиграфическим интервалом конодонтов *Ancyrodella pristina* Khalymbadzha and Chernysheva (1970), служащего маркером нижней границы франского яруса Евразии (Liao, Valenzuela-Ríos, 2008; Becker et al., 2020) (рис. 2).

Приведенные материалы по ТТД ЮТС дают возможность отметить следующие особенности: 1) начиная с воробьевского горизонта, каждый стратиграфический интервал характеризуется как песчаным, так и глинисто-алевритовым типами разреза; 2) мощность интервалов (горизонтов) выдержана независимо от типа разреза; 3) на всех интервалах наблюдается чередование сортированных и несортированных пород; 4) вверх по разрезу сортировка и зрелость песчаников увеличивается; 5) различие пород

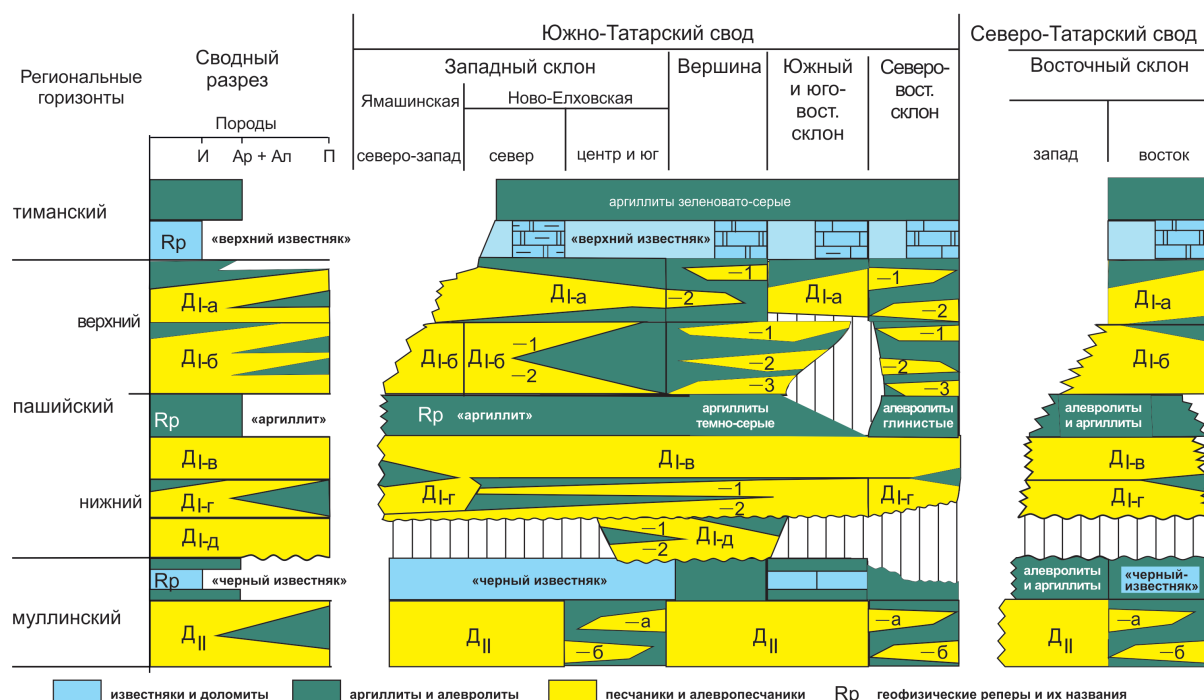


Рис. 4. Схема пласта Д₁ пашийского горизонта (вне масштаба); обращает внимание, что во многих разрезах соотношение коллектор/неколлектор составляет примерно равное (50/50) соотношение (по Данилова, 2008, с изменением)

по степени сортировки материала наблюдается в пределах «литотипов»; 6) вверх по разрезу, начиная с воробьевского горизонта, увеличивается биотурбация (особенно заметная в алевролитах) и начинают встречаться ихнотаксоны – индикаторы морских условий; 7) на многих уровнях разреза встречаются тонкие прослои фосфоритовых конкреций, доманикоидных пород, сидеритовых и шамозитовых железных руд; 8) количество песчаных тел в пределах стратиграфических интервалов (горизонтов) достаточно выдержано; 9) грубообломочные породы (гравелиты) имеют подчиненное значение и приурочены к нижней части ТТД.

Материал

Построение карт основано на выборке данных каротажа, состоящей из более 25000 скважин в пределах сводовой части ЮТС и Ново-Елховской площади. Материал включал в себя комплекс геофизических параметров, необходимый для оценки глинистых и песчаных компонентов в разрезе. Количественная оценка ФЕС проведена по 27000 образцов.

Литологический и ихнологический анализ проведен по керну 30 скважин, хранящихся в кернохранилище ПАО «Татнефть» в г. Бугульма. Дополнительно были изучены и опробованы две скважины, хранящиеся в кернохранилище Казанского федерального университета. Всего описано и опробовано 530 м пород, вскрывших пашийские отложения в интервале пластов Д₁-а, Д₁-б, Д₁-в. Отобрано и изучено 350 образцов керна, описано более 250 шлифов, проведен рентгено-структурный анализ 124 образцов.

Методы и их задачи

Литологическое расчленение разреза скважин на основе комплекса признаков на каротажных кривых является одним из основных результатов интерпретации скважинных данных. Глинистые породы характеризуются

повышенными показаниями на кривой естественной радиоактивности (ГК) и положительными значениями на кривой самопроизвольной поляризации (ПС), а пласты песчаника, напротив, характеризуются пониженными значениями на кривой ГК и отрицательной амплитудой на кривых ПС. Глинистые песчаники и алевролиты занимают промежуточную нишу значений.

Стратиграфическая разбивка проводилась согласно схеме, принятой в ПАО «Татнефть». В основу отнесения отдельных выделенных пластов к определенному литотипу было положено уточненное макроскопическое описание. В дальнейшем для каждого выделенного пласта производилось снятие отсчетов с кривых каротажа. При этом применялись традиционные подходы оценки среднего в мощных пластах или экстремальных значений кривой в тонких пластах. В качестве критерия соответствия пласта категории «тонкого» была принята мощность 0,4 м.

Разделение на литотипы по гранулометрическому составу проведено с учетом макроописания керна и ГИС-данных по 1500 скважинам на основании процентного содержания псаммитовой фракции. Литотип «песчаник» определялся в случае, если доля псаммитовой фракции составляет более 70 %, в противном случае литотип считался «алевролитом».

Данное разделение подтверждается кросс-плотами распределения грансостава по $A_{пс} = f(A_{гк})$ (рис. 5, 6). Так, пластам, характеризующимся минимальными значениями $A_{гк}$ соответствует литотип «песчаник». Пласты, имеющие повышенные показания $A_{гк}$ по сравнению с песчаниками могут именоваться «алевролитами» или «песчаниками глинистыми» с различными вариациями. Максимальные показания кривой $A_{гк}$ соответствуют пластам «аргиллитов». В ходе выполнения работы было решено остановиться на выделении по различным признакам на каротажных кривых трех литотипов: «песчаник», «алевролит», «аргиллит». При этом литотип «алевролит»

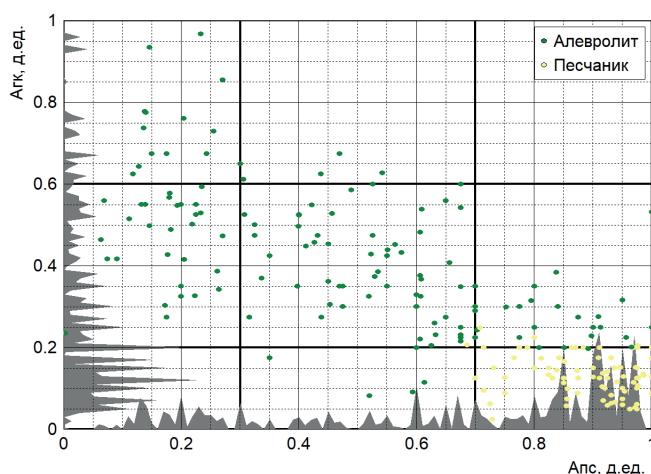


Рис. 5. Кросс-плот разделения на литотипы по гранулометрическому составу для западного склона ЮТС

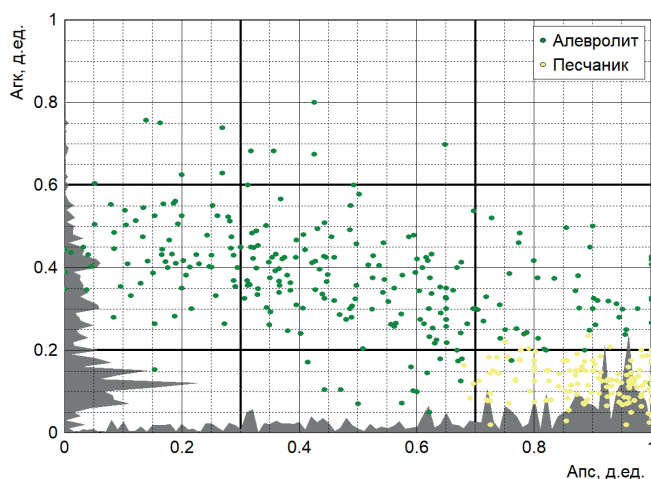


Рис. 6. Кросс-плот разделения на литотипы по гранулометрическому составу для сводовой части ЮТС

может быть назван в более широком понимании «алевриты и заглинизированные песчаники».

Построение карт проводилось с помощью детерминированного метода пространственной интерполяции «Natural Neighbor» (Sibson, 1981) с размером ячейки 50 м. Выбор данного метода обусловлен тем, что он способен обрабатывать до 15 млн входных точек и интерполировать значения с определением веса каждой точки, основываясь на пропорциональных областях («естественных соседях»). Еще одно достоинство метода заключается в том, что он не выводит тренды и не создает пики, ямы или точки минимума, которые не представлены входными данными. Это позволяет получать более гладкую результирующую поверхность.

Коэффициент песчанистости. Для выявления пластов песчаных тел по данным ГИС были использованы нормированные кривые Агк для нижней и верхней части пашийского горизонта. Значения Агк меньше 0,2 принимались за граничный уровень песчаников, а значения Агк более 0,6 – за граничный уровень аргиллитов. Таким образом, область всех значений кривой делилась на три части. Принималось, что песчаникам соответствует значение $Агк < 0,2$, аргиллитам: $0,2 < Агк \leq 0,6$, алевритам: $Агк > 0,6$.

Значения глубин, отвечающие точкам пересечения Агк с линиями $Агк = 0,2$ и $Агк = 0,6$, считались границами

интервала, в пределах которого область кривой нужно отнести к песчаникам, алевритам или аргиллитам.

Минимальная мощность анализируемого интервала принята равной 0,4 м. Интервалы мощностью менее 0,4 м не анализировались и объединялись с соседними более мощными интервалами.

Последовательность интервалов (мощностью 0,4 м и более), определенных в каждой скважине, анализировалась следующим образом: осуществлялся подсчет количества интервалов, отнесенных к песчаникам; рассчитывалось процентное содержание песчаников, т.е. отношение суммарной мощности интервалов с песчаником к общей мощности исследуемого разреза.

Распределение коэффициента песчанистости было ранжировано на пять расчетных классов, для каждого из которых в пределах пашийского горизонта было определено среднее количество пластов и мощность (табл. 1).

Каждый из пяти классов отвечает определенному типу разреза пашийского горизонта: *глинистому* (класс 1; коэфф. песч. 0–10 %), *алеврито-глинистому* (класс 2; коэфф. песч. 10–30 %), *переходному или песчано-алеврито-глинистому* (класс 3; коэфф. песч. 30–40 %), *алеврито-песчаному* (класс 4; коэфф. песч. 40–60 %) и *песчаному* (класс 5; коэфф. песч. 60–100 %).

Изолинии количества пластов песка учитывали каждый пласт песчаника мощностью 0,4 м. Изопахиты мощности стратиграфических интервалов проводились через 10 м. Визуализация расчетных данных проведена программным продуктом ArcGIS Pro.

Литологические исследования керн включали: макроскопическое описание, изучение петрографических шлифов и рентгенографический анализ.

Описание керн проводилось поинтервально снизу-вверх с определением основных характеристик пород: цвет, структура, текстура, минеральный состав, взаимоотношение слоев, состав органических остатков и прочих особенностей. Границы интервалов определялись по литологическим признакам с учетом нефтенасыщения пород. Обращалось внимание на последовательность напластования, литологический состав, структуру и текстуру пород, характер нефтенасыщенности и др. Описание шлифов проводилось с помощью оптического поляризационного микроскопа «Axio Imager A2». Анализ шлифов включал определение минерального состава, выявление микротекстуры и структуры пород. По шлифам также оценивался гранулометрический состав терригенного материала (песок/алеврит/пелит), а для песчаников и

Класс	Песчанистость, %	Количество пластов	Мощность, м
1	0–10	0–2	10–20
2	10–30	1–3	10–20, реже до 30
3	30–40	2–3	20–30
4	40–60	3–4, реже 1 или 5	30–40, реже 10
5	60–100	3–4, реже 2 или 5	10–20, реже до 30

Табл. 1. Ранжирование отложений пашийского горизонта по коэффициенту песчанистости

алевролитов – сортированность обломочного материала.

Количественный минеральный состав пород определялся с помощью рентгенографического анализа на дифрактометре D2 Phaser. Данные этого анализа использовались для оценки степени минералогической зрелости терригенного материала различных литотипов, т.е. отношения содержания кварца к сумме содержаний кварца и других обломков (полевые шпаты, слюды, глинистые минералы).

Задачами литологического изучения керна служили: выявление основных литотипов и их последовательностей, минералого-петрографическая характеристика литотипов, определение их диагностических признаков.

Ихнологические исследования. Ихнофациальный и ихнотекстурный анализы проводились одновременно с послойным описанием керна как непосредственно в кернохранилище, так и в лабораторных условиях. Детальность изучения составила 0,1 м. Одновременно с ихнологическими исследованиями отмечались и определялись остатки скелетной фауны.

Изучение керна и анализ условий осадкообразования проведены по методике, предложенной Е.Ю. Барабошкиным (2007) и В.П. Алексеевым (2014). Определения ихнофоссилий и биотурбации в керне проведено по методике Д. Кнаушта (Knaust, 2017).

Ихнофациальный анализ включал определение ихнофоссилий и их группировку в комплексы. **Ихнотекстурный анализ** включал: 1) определение размещения ихнофоссилий в осадочной толще, 2) определение степени биотурбации (перемешивания осадка жившими в нем организмами) и ее стадийности.

Результаты

Результаты литологических исследований терригенных отложений пашийского горизонта позволили разработать их классификацию (табл. 2) и обосновать основные характеристики, полученные при макро- и микроскопическом изучении керна и шлифов (рис. 7).

Минералого-литологический анализ подтверждает присутствие среди терригенных отложений различных литотипов, основными из которых являются песчаники, алевролиты и аргиллиты. Каждый из них в изученных разрезах образует пласты различной мощности.

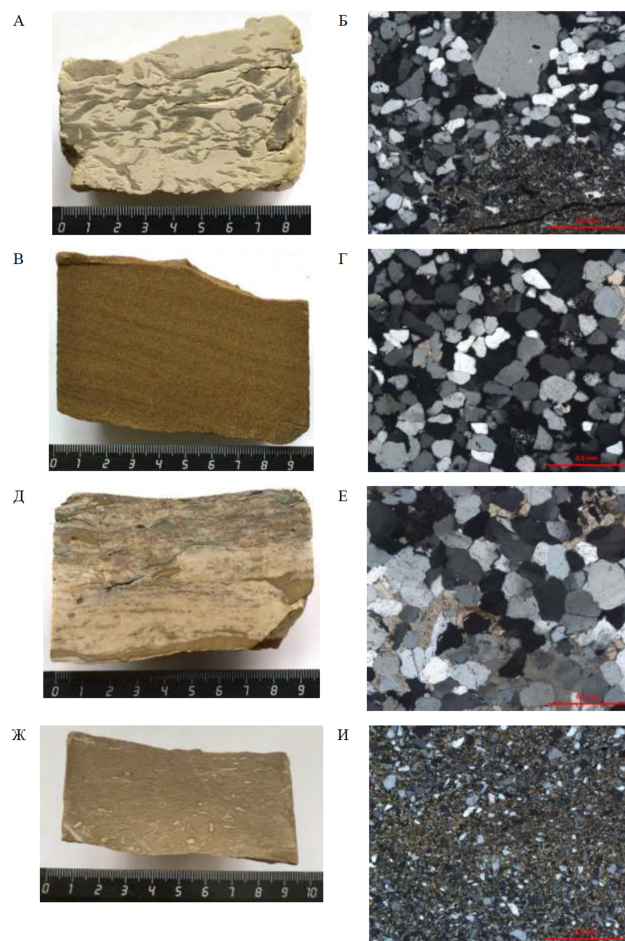


Рис. 7. Основные литотипы терригенных пород пашийского горизонта. Слева – образец, справа – шлиф; А, Б – песчаник пористый нефтенасыщенный. Черемшанская площадь. Сква. 11895, гл. 1767,6 м; В, Г – алевролит пористый слабо нефтенасыщенный. Куакбайская площадь. Сква. 38273, гл. 1792,9 м; Д, Е – алевролит плотный карбонатный. Ново-Елховское месторождение. Сква. 701, гл. 1819,1 м; Ж, И – аргиллит алевритистый. Восточно-Сулеевская площадь. Сква. 11615, гл. 1741,2 м.

Результаты ихнологических исследований

Ихнофоссилии (следы жизнедеятельности фауны, в том числе и бесскелетной) сохранились в большом количестве и разнообразии, что позволило определить их состав, выявить распределение по типам разреза (классы

Литотипы		Сортировка терригенного материала (песок/алеврит/пелит)	Минералогическая зрелость пород	Окатанность обломков
Литотипы I уровня	Литотипы II уровня			
Песчаники	Песчаники пористые	95–75/5–25/до 1–2 преимущественно хорошая	>0,97	хорошая и средняя
	Песчаники плотные карбонатные	95–75/5–25/до 1–2 преимущественно хорошая		
Алевролиты	Алевролиты пористые	10–25/75–85/5–10 преимущественно хорошая	0,90–0,99	хорошая и средняя
	Алевролиты плотные глинистые	5–25/40–85/10–35 средняя и плохая	0,60–0,95	средняя и плохая
	Алевролиты плотные карбонатные	25/75/0 преимущественно хорошая	0,75–0,95	хорошая и средняя
Аргиллиты	Аргиллиты, в т.ч. алевритистые и карбонатные	0–10/10–30/70–90 хорошая, средняя или плохая в зависимости от содержания алевритовой компоненты	0,25–0,70	алевритовый материал плохой окатанности

Табл. 2. Классификация терригенных пород пашийского горизонта

1–5, табл. 1), увязать типы разреза с активностью водной среды и фаціальными обстановками (рис. 8). Остатки скелетной фауны, напротив, сохранились в малом количестве, часто плохо определимы, что может указывать на неблагоприятные условия fossilization.

Аргиллиты количественно наиболее насыщены окаменелостями. Лингулы и двустворчатые моллюски с сохранившимся раковинным веществом зафиксированы на поверхностях напластования аргиллитов, редко встречаются конхостраки и сколекодонты. Ихнофоссилии в аргиллитах представлены ходами *Lingulichnus* и *Arenicolites*. Биотурбация слабая: поверхности напластования гладкие, тонкая слоистость сохранена. Возможно, результаты биотурбации скрыты в результате уплотнения глинистого осадка при литификации породы.

Алевролиты при максимальном разнообразии и количестве ихнофоссилий, сильной биотурбации, слабо насыщены скелетными остатками. Тонкодисперсный растительный детрит часто покрывает поверхности напластования алевролитов и подчеркивает их слоистость. Глинистые алевролиты включают остатки чешуйки панцирных рыб (очень редко), раковины конхострак и двустворок. Комплекс ихнофоссилий пашийских алевролитов наиболее богат и разнообразен. Ихнофоссилии представлены вертикальными ходами *Arenicolites*, *Skolithos*, *Spirophyton*, *Thalassinoides* и *Zoophycos*, горизонтальными *Palaeophycos* и *Planolites* (рис. 9, 10). Степень биотурбации варьирует от 0–10% в глинистых алевролитах до полной 100% переработки пористых алевролитов с вторичными, наложенными ходами.

Песчаники слабо охарактеризованы палеонтологическими остатками. Очень редко встречаются чешуйки

рыб, чаще тонкий и фрагментарный растительный детрит. Детрит, как и нефтеносность, подчеркивает параллельную слоистость в песчаниках: косую или горизонтальную. Ихнофоссилии встречаются очень редко и представлены хорошо укрепленными вертикальными ходами *Skolithos*.

Карбонатные породы включают большое количество слоевищ известковых водорослей и замковых брахиопод, в том числе захороненных в прижизненном состоянии.

Карты коэффициента песчаности, коэффициента расчлененности и мощностей пашийских отложений

Карта нижней части пашийского горизонта (пласты Д₁-в, Д₁-г, Д₁-д) отражает пространственное взаимоотношение песчаников и глинистых пород. В целом характерно мозаичное распределение без конкретной закономерности (рис. 11).

Песчаные тела *разрезов песчаного типа* (класс 5; коэфф. песч. 60–100%; табл. 1, рис. 8) условно формируют две неоднородных группы. Одна группа песчаных тел располагается на северо-западе и западе ЮТС, другая – на юго-востоке и юге. Отдельные тела в пределах групп характеризуются изометричной формой от 2,5 до 10,0 км по длинной оси (например, Ново-Елховское месторождение, Карамалинская, Восточно-Ленинградская и Южная площади Ромашкинского месторождения). Большинство тел образует линейно-вытянутые скопления общей протяженностью от 10,4 до 25,2 км. Примечательно, что ориентировка тел различная: на западе они прерывисто протягивают в субмеридиональном направлении, на юго-востоке они постепенно выклиниваются в северо-западном направлении.

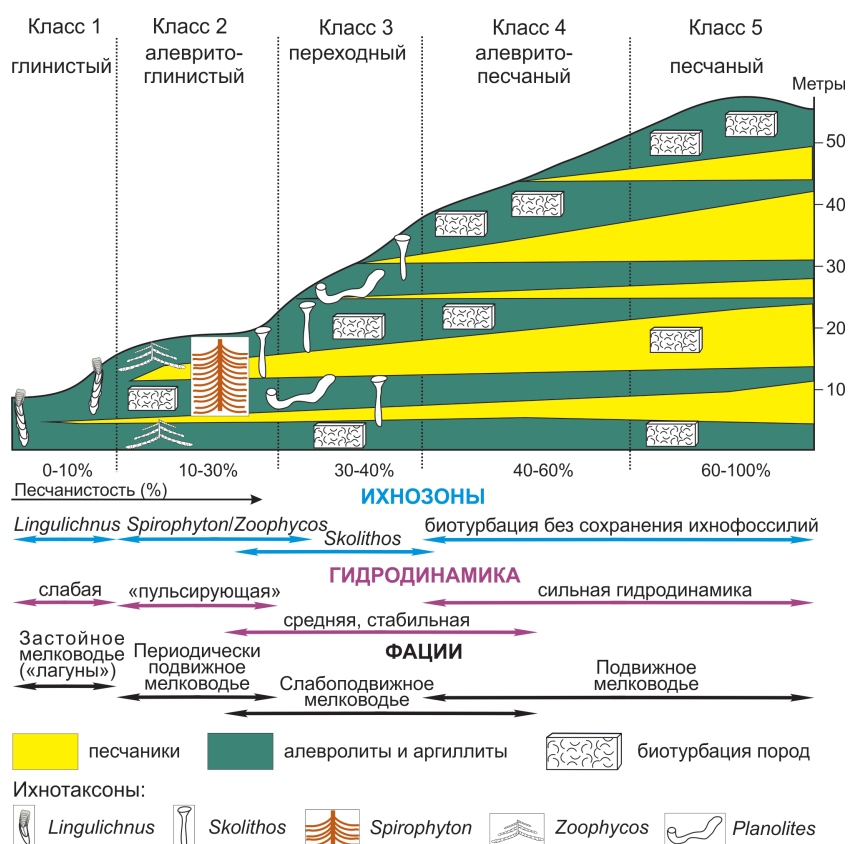


Рис. 8. Распределение ихнофоссилий и биотурбации по пяти литологическим типам (классам) разреза пашийского горизонта (см. табл. 1)

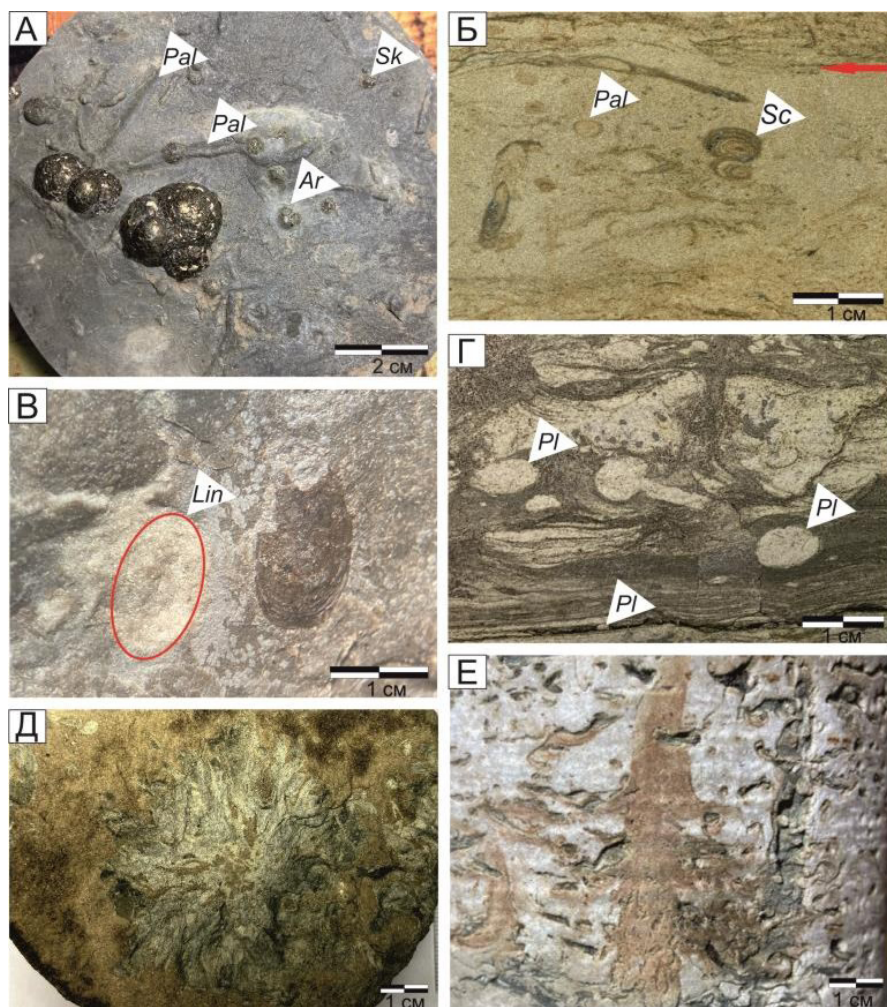


Рис. 9. Ихнофоссилии пашийского горизонта Южно-Татарского свода. А) Ходы *Arenicolites* (Ar), *Skolithos* (Sk), *Palaeophycos* (Pal) на поверхности напластования алевролита. Сечение вертикальных ходов пиритизировано. Скв. 32821, Березовская, гл. 1738 м. Б) Ходы *Scolicia* (Sc) и *Palaeophycos* (Pal) в полностью биотурбированном и гомогенизированном алевролите (100 % переработки). Красная стрелка указывает на поверхность внутриформационного перерыва – диастему. Выше – степень биотурбации снижается. Скв. 22084, Сармановская, гл. 1669,1 м; масштабная линейка 1 см. В) Ходы *Lingulichthus* (красный овал), заполненные алевритистым материалом, на верхней поверхности напластования аргиллита с лингулами. Скв. 20109, Глазовская, гл. 1704,5 м; масштабная линейка 1 мм. Г) Ходы *Planolites* (Pl) в поперечном сечении алевролита. В нижней части – тонкая волнистая слоистость со слабой (30 %) биотурбацией. Вверху степень биотурбации резко увеличивается (до 100 %). Скв. 918, Муслумовская, гл. 1683,4 м; масштабная линейка 1 см. Д) Ходы *Zoophycos* на поверхности напластования песчаника. Скв. 909, Бастрыкская, гл. 1698 м. Е) Ходы *Spirophyton* в поперечном сечении биотурбированного алевролита. Ход подчеркивается вторичной сидеритизацией. Скв. 8266, Ново-Елховская, гл. 1679,2 м. Масштабная линейка на всех фотографиях – 1 см.

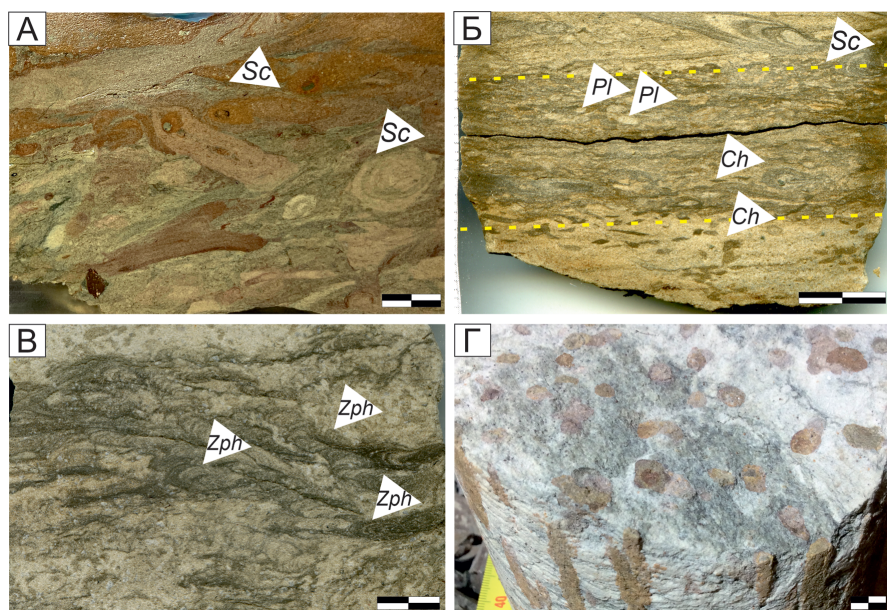


Рис. 10. Основные ихнотаксоны терригенной толщи девона Южно-Татарского свода. А) Ходы *Scolicia* (Sc) в поперечном сечении биотурбированного алевролита (100 % переработки). Биотурбация подчеркнута вторичной сидеритизацией. Ардатовский горизонт, скв. 2354, Сабанчинская, гл. 1814,8 м. Б) Этажная биотурбация в поперечном сечении алевролита (желтые пунктирные линии). Нижний этаж полностью гомогенизирован (100 % переработки) с вторичной биотурбацией и ходами *Chondrites* (Ch). Средний этаж сильно биотурбирован (100% переработки) с сечениями ходов, похожих на *Planolites* (Pl) и *Chondrites* (Ch). Верхний этаж со средней биотурбацией (50 % переработки) и продольным сечениями ходов *Scolicia* (Sc) с заполнением в форме вытянутых контрастных менисков. Ардатовский горизонт, скв. 11615, Восточно-Сулеевская, гл. 1745,1 м. В) Ламини ходы *Zoophycos* (Zph) в поперечном сечении биотурбированного алевролита (100 % переработки). Воробьевский горизонт, скв. 19430, Павловская, гл. 1792,5 м. Г) Ходы *Skolithos* в алевролите с волнистой слоистостью. Ходы подчеркнуты вторичной сидеритизацией. Тиманский горизонт, скв. 900, Бастрыкская, гл. 1759,5 м. Масштабная линейка на всех фотографиях – 1 см.

Песчаные тела располагаются в среднем на расстоянии от 1,5 до 3 км друг от друга. Местами они разделены небольшими участками (1,0–1,5х0,8–2,5 км) песчано-глинистых отложений, типичных для *разрезов алеврито-глинистого типа* (класс 2; коэфф. песч. 10–30 %) (например, Холмовская и Зеленогорская площади). На периферии ЮТС песчаные тела *разрезов песчаного типа* приобретают линейно-вытянутую форму, протягиваясь на 9,0–15,5 км (Ерсубайкинское месторождение на западном склоне и юго-восточный склон ЮТС).

Разрезы переходного типа (класс 3; коэфф. песч. 30–40 %) и *разрезы алеврито-песчаного типа* (класс 4; коэфф. песч. 40–60 %) имеют пятнистый, мозаичный характер распределения песчаных тел. Тела различной формы: округлые (диаметр 0,7–1,5 км) (например, Ташлиярская площадь), вытянутые в одном направлении (3,0–12,0 км) (например, Чишминская площадь), сложные (8,0–16,5х5,5–7,5 км) (например, Миннибаевская

площадь). Ориентировка тел хаотичная. В центральной части ЮТС песчаные тела располагаются на расстоянии 0,6–3,0 км друг от друга, на периферии удаленность возрастает до 3,0–9,0 км. Песчаные тела этих типов разделяются участками, представленными в сводовой части ЮТС *разрезами глинистого типа* (класс 1; коэфф. песч. 0–10 %), а на юге ЮТС – *разрезами алеврито-глинистого типа* (класс 2; коэфф. песч. 10–30 %).

На южной, северной и северо-восточной частях карты преобладают глинистые отложения – *разрезы глинистого* (класс 1) и *алеврито-глинистого типа* (класс 2). Глинистые тела имеют разнообразную форму с доминированием сложной. Расстояние между ними меняется от 1,5 до 7,5 км. Тела ориентированы в диагональном направлении (северо-западное–юго-восточное простирание длинных осей).

Карта верхней части пашийского горизонта (пласты D_1 -а, D_1 -б, D_1 -в) сохраняет мозаичный рисунок

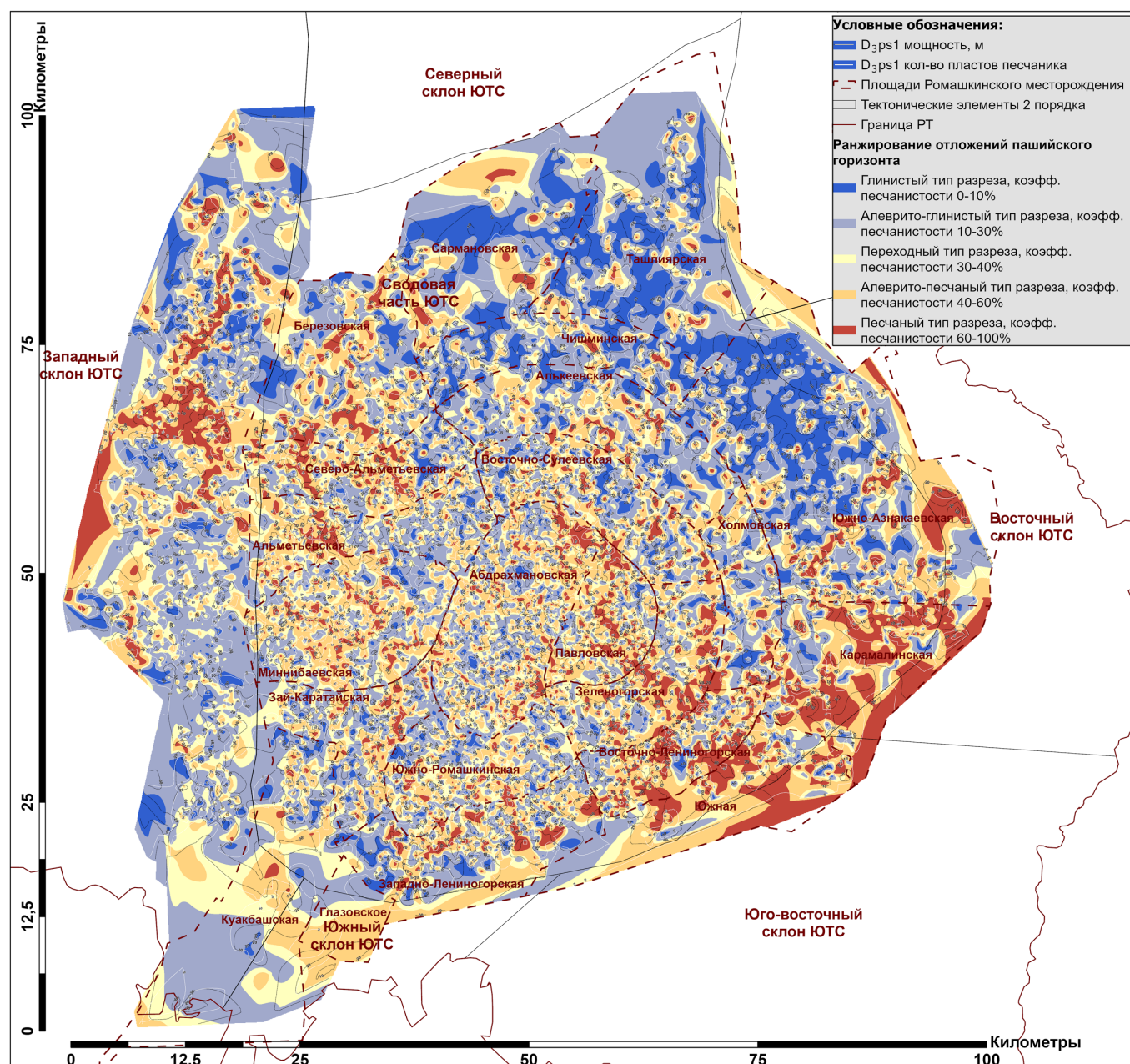


Рис. 11. Карта коэффициента песчаности, коэффициента расчлененности и мощностей для нижней части пашийского горизонта (D_{3rs1} ; пласты D_1 -в, D_1 -г, D_1 -д)

распределения песчаников и глинистых пород; одновременно меняется характер распределения геологических тел (рис. 12).

Песчаные тела *разрезов песчаного типа* (класс 5) в незначительном количестве остаются на северо-западе и западе. Они представлены двумя линейно-вытянутыми скоплениями размером 1,5–3,2х37,5 км (на северо-западе) и 7,8х18,7 км (в западной части). В пределах этих скоплений тела располагаются в среднем на расстоянии от 1,5 до 4,5 км друг от друга. Местами песчаные тела разделены отложениями *разрезов алеврито-глинистого типа* (класс 2) размером 1,0–1,5х0,8–2,5 км и *разрезов глинистого типа* (класс 1) – размером в среднем 0,9х2,2 км.

Характер распределения песчаных тел *разрезов переходного типа* (класс 3) и *разрезов алеврито-песчаного типа* (класс 4) крайне неравномерный. Повышенная концентрация песчаных тел свойственна западной, северной и восточной частям карты. Разнообразие форм

по сравнению с началом пашийского времени сохраняется. Представлены округлые тела диаметром 0,6–1,5 км, вытянутые в одном направлении и протяженностью 7,0–9,3 км (напр., Абдрахмановская площадь), сложные тела – размером 4,6–14,0х3,5–7,5 км (напр., Чишминская площадь). Ориентировка тел либо субмеридиональная (в центральной и западной частях ЮТС), либо дугообразная (в восточной и северной частях). Песчаные тела располагаются на расстоянии 2,1–7,8 км друг от друга. Глинистые отложения, разделяющие песчаные тела, в центре ЮТС преимущественно представлены *разрезами алеврито-глинистого типа* (класс 2); по периферии ЮТС – *разрезами глинистого типа* (класс 1).

Доля глинистых отложений в верхней части пашийского горизонта возрастает. Они образуют *разрезы глинистого* (класс 1) и *алеврито-глинистого* (класс 2) типа. Глинистые тела разнообразной формы с доминированием сложной. Расстояние между ними варьирует от 1,5 до

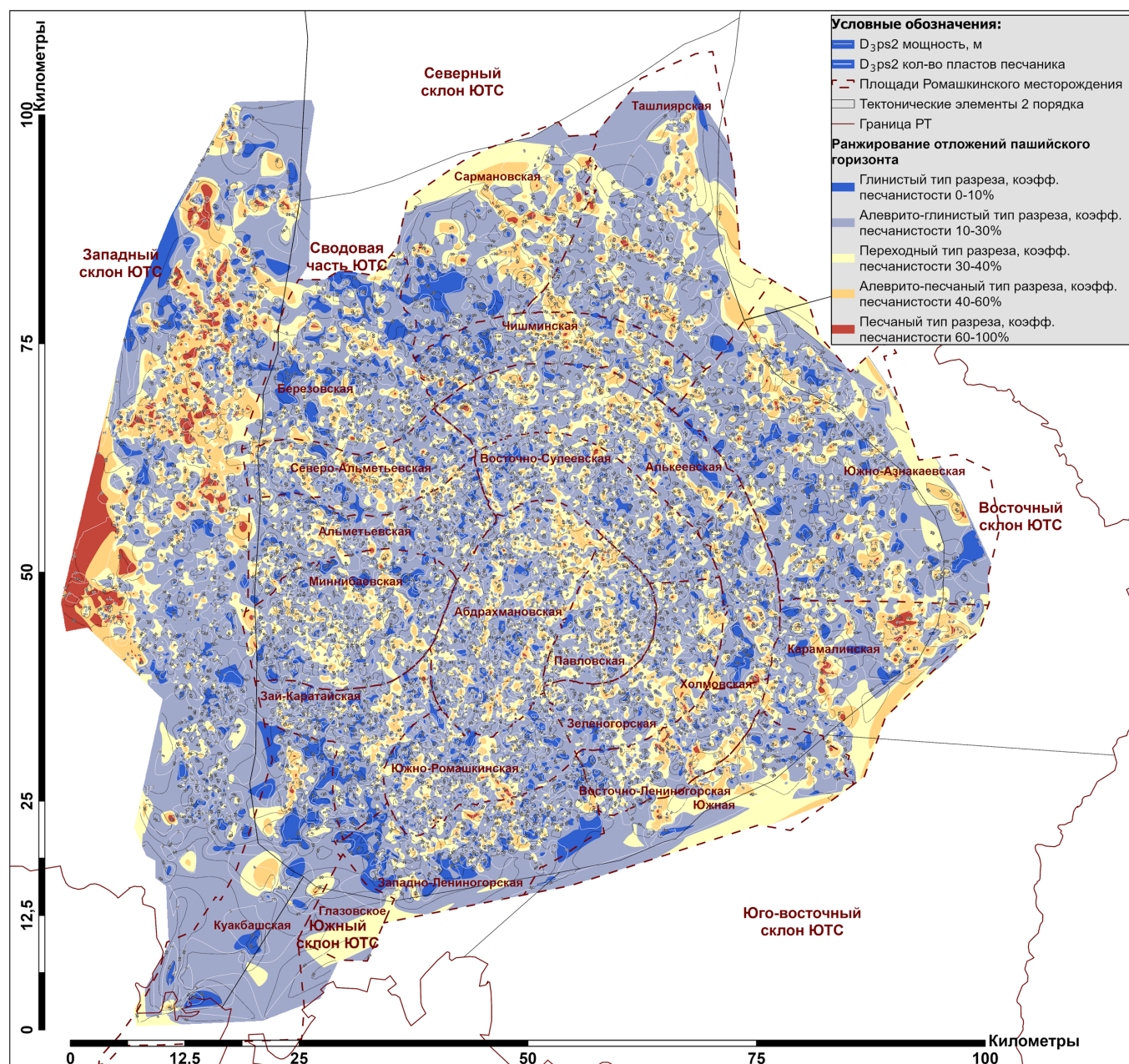


Рис. 12. Карта коэффициента песчаности, коэффициента расчлененности и мощностей для верхней части пашийского горизонта (D_{3ps2} ; пласты D_1-a , D_1-b)

6,2 км. Тела располагаются по своеобразным концентрическим линиям с выраженным понижением значений коэффициента песчаности к периферии.

Обсуждение результатов

Палеогеографическое положение ЮТС в среднем девоне. Среднедевонская зона сочленения Уральского палеоокеана и Восточно-Европейской платформы, согласно тектонической классификации (Kingston et al., 1983; Mitchell, Reading, 1986), соответствует крупному сложно построенному (субдукционному) океаническому бассейну, включающему широкую континентальную окраину (Einsele, 2000). В целом, здесь прослеживается нормальный фациальный ряд, протягивающийся от области сноса (суши) и континентально-дельтовых обстановок через мелководный морской бассейн различной солёности к континентальному склону и, далее, к океаническим обстановкам: преддуговому прогибу, островным дугам

и задуговому бассейну Уральского палеоокеана (Пучков, 2010) (рис. 13).

Пассивная континентальная окраина ВЕП представляла собой широкий (500–1000 км в поперечнике) континентальный шельф, полого погружающийся к перегибу континентального склона и обменивающийся водой с открытым океанским бассейном.

Территория ЮТС, которая ниже обозначена термином *бассейн ЮТС*, представляла в среднем девоне небольшую, относительно приподнятую и мелководную часть континентального шельфа, обозначенную на рис. 13 как морской бассейн с солёностью, близкой к нормальной. Бассейн ЮТС располагался на значительном удалении (около 500–1000 км) как от предполагаемой основной береговой линии суши, так и от границы (бровки) континентального склона (активной окраины). Удаленность ЮТС от основной береговой линии суши должна была повышать значимость локальных областей сноса – Северо-Татарского,

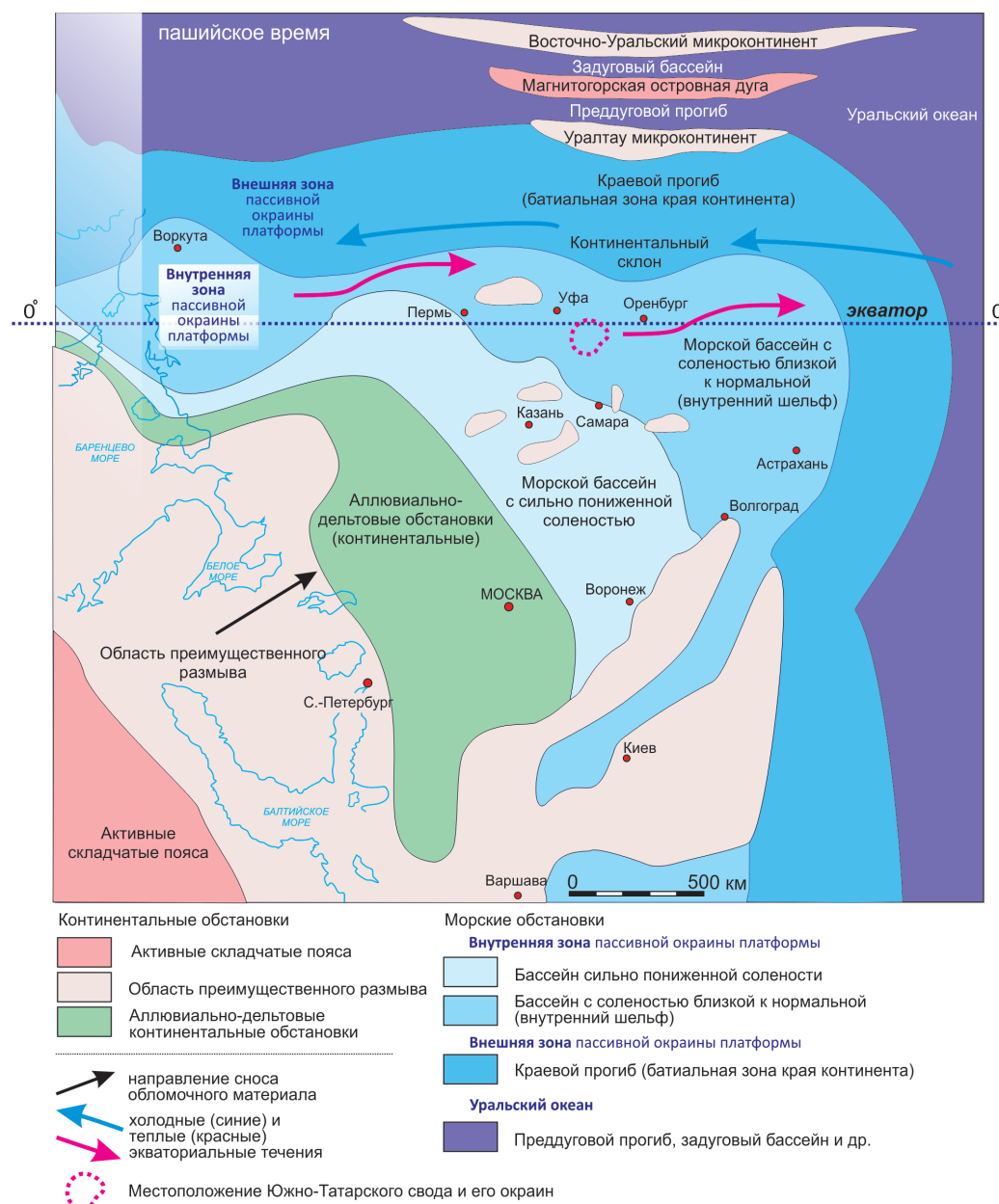


Рис. 13. Палеогеографическая схема пашийского времени Восточно-Европейской платформы и Уральского палеоокеана; составлена по данным (Афанасьева, Амон, 2012; Тихомиров, 1995; Тихий, 1956, 1975; Родионова и др., 1995; Nikishin et al., 1996; Мизенс, Свяжжина, 2007; Пучков, 2010; Шеин и др., 2020)

Башкирского, Жигулевско-Оренбургского сводов (Тихий, 1975; Peterson, Clarke, 1983), и возможность неоднократной переработки ранее накопившихся внутрибассейновых осадков. Удаленность ЮТС от границы континентального склона и относительно большое количество локальных областей сноса («островов») могли являться факторами, снижающими интенсивность волновой деятельности (Долотов, 1989; Einsele, 2000), а также опосредованно влияющими на соленость бассейна: при обильном поступлении пресных вод с суши бассейн мог становиться, хотя бы на недолгое время, солоноватоводным. Большая ширина (1000–2000 км) континентального шельфа предполагает наличие интенсивных приливно-отливных течений (Reynaud, Dalrymple, 2012), которые дополнительно усиливались в пределах бассейна ЮТС его расположением в экваториальной зоне. Приливно-отливные течения приводят, как правило, к активным морским течениям, направленным вдоль береговой линии.

Основные особенности терригенной толщи девона – геологические, литологические и ихнологические

признаки, в т.ч. рассмотренные отдельно для пашийского горизонта, приведены в табл. 3. Пространственное распределение основных типов разрезов (*классов*, табл. 1) пашийского горизонта по площади ЮТС показано выше на рис. 11, 12.

Используя эти данные, можно попытаться сравнить среднедевонский бассейн ЮТС с современными и древними бассейнами, имеющими сходные черты, и после этого попробовать реконструировать условия осадконакопления.

Отметим, что современная Земля содержит далеко не все обстановки, существовавшие в геологическом прошлом. В частности, это связано с тем, что континентальные шельфы современной Земли еще не пришли в равновесие с водным режимом и источниками сноса (Emery, 1952; Мурдмаа, 1979; Johnson, Baldwin, 1986; Galloway, Hobday, 1996). В большинстве случаев современные шельфы отражают низкое стояние моря, связанное с четвертичными оледенениями. То есть соответствуют условиям, во время которых уровень океана был ниже

		Воробьевско-муллинский интервал	Пашийский горизонт
Мощность всей толщи, м		30–50	40–60
Песчано-алевритовые тела	Мощность, м	От 0,5 до 10 (средняя: 4–8)	От 0,5 до 30 (средняя: 0,5–9)
	Состав	кварцевый	
	Сортировка (зрелость)	плохая (низкая)/хорошая (высокая)	хорошая (высокая)
	Размер зерен	разный	мелкий
	Слюда, %	до 3–4	< 1
	Детрит растений	редко	редко, дисперсный
Размеры песчаных тел, км			ширина 0,7–5; длина 2–20; системы тел длиной до 40
Размеры глинистых тел			ширина 0,7–5; длина 2–20
Алевриты	Мощность, м	5–10	1–5
	Состав	кварцевый	
	Сортировка (зрелость)	Средняя, реже плохая	Хорошая и средняя
	Размер зерен	Разная	крупный
	Слюда, %	До 4–5	До 2
	Детрит растений	редко	редко
Биотурбация	аргиллиты	Слабая. Фиксируется на поверхностях напластования с остатками фауны	
	алевриты	Сильная. Интервал интенсивно переработан. Слоистость сохранилась в ритмитах	От средней до сильной, в среднем 40–60%, до 100% в верхней части интервала
	песчаники	Преимущественно отсутствует. Редкие прослои с 100% биотурбацией	
Ихно-таксоны	аргиллиты	<i>Lingulichnus</i>	<i>Lingulichnus</i>
	алевриты	<i>Chondrites</i> , <i>Planolites</i> , <i>Skolithos</i> , <i>Spirophyton</i> , <i>Zoophycos</i>	<i>Arenicolites</i> , <i>Palaeophycos</i> , <i>Planolites</i> , <i>Scolicia</i> , <i>Skolithos</i> , <i>Spirophyton</i> , <i>Zoophycos</i>
	песчаники	нет	<i>Skolithos</i>
Ихнофашии	аргиллиты	<i>Cruziana</i>	
	алевриты	<i>Zoophycos</i>	От <i>Skolithos</i> до <i>Cruziana</i>
	песчаники	<i>Skolithos</i> (?)	<i>Skolithos</i>
Карбонатные прослои		Есть	
Доманикоидные фашии		Есть, тонкие	–
Фауна (body fossils)		Лингулы в аргиллитах, конхостраки, двустворки, тентакулиты, офиуры	Лингулы в аргиллитах, брахиоподы, рыбы, конхостраки
Флора листовая		в отдельных прослоях	редко
Дополнительные признаки		Фосфориты В аргиллитах и алевритовых – сидеритизация и пиритизация	Пиритизация, в т.ч. в песчаниках Сидеритизация

Табл. 3. Основные признаки терригенных отложений девона Южно-Татарского свода

современного более чем на 100 м (Einsele, 2000). Это ограничивает возможности актуалистического метода.

Поиск аналогов ТТД ЮТС в современных обстановках логично начать с анализа различных зон прибрежной области современных морей и океанов: размеров, формы и состава песчаных тел (рис. 14), особенностей рельефа, гидродинамики и осадков (табл. 4). Сравнение этих данных с признаками ТТД ЮТС (рис. 11, 12, табл. 3) позволяет сделать предположение о наибольшем сходстве среднедевонского бассейна ЮТС со *средним шельфом* или так называемой зоной открытого (offshore¹) моря (ориентировочные глубины 50–100 м). В этой зоне доминируют течения разной природы (волновые, приливные, постоянные), и образуются связанные с этими течениями формы подводного рельефа. Признаки песчаных тел пашийского горизонта ЮТС имеют сходство с признаками подводных валов (баров) (longshore bars), формирующимися как в зоне открытого моря, так и в смежной прибрежной зоне внутреннего шельфа (табл. 4).

«Мозаичное» распределение в пространстве глинистых и песчаных осадков является, вероятно, наиболее характерным и необычным признаком пашийского горизонта ЮТС (рис. 11, 12). Интересно, что мозаичное или пестрое латеральное чередование терригенных – илистых, алевроитовых и песчаных осадков обычно для современных шельфов.

Шельф современного океана – пример мозаичного распределения осадков. Примерно до середины 1930-х гг. считалось, что осадки континентального шельфа закономерно и постепенно изменяются от крупнозернистых у берега до мелкозернистых на глубине. Океанологические исследования середины XX века показали, что распределение разных по зернистости типов осадков на поверхности шельфа представляет собой сложную мозаику. Мозаика состоит из участков, сложенных различными по составу (в т.ч. зернистости) и возрасту, современными и реликтовыми осадками, в разной степени переработанными

современными процессами переноса, отмучивания и аккумуляции (Emery, 1952; Мурдмаа, 1979).

В настоящее время мозаичное распределение осадков (а также высокая мобильность осадочных тел и быстрая фациальная перестройка дна бассейна) подтверждено детальными картами океанического дна: тектонически стабильного среднего шельфа южного моря Кореи (Park et al., 2003), гидродинамически активного внутреннего и среднего шельфа Ирландского моря (Van Landeghem et al., 2009; Ward et al., 2015, 2020) и Новой Зеландии (Bostock et al., 2019), широкого шельфа северо-восточной Австралии (Lewis et al., 2014); узкого шельфа Иберийского моря (Jouanneau et al., 2002), внутреннего илистого шельфа Атлантического океана у северо-восточного побережья между устьями Амазонки и Ориноко (Anthony et al., 2010, 2014) и у восточного побережья Бразилии (Vieira et al., 2019).

Мозаичное распределение осадков на шельфе зависит главным образом от интенсивности поступления терригенного материала и динамики вод.

Вынос терригенного материала с континентов в океан имеет отчетливый «очаговый» характер (Лисицын, 1974, 1978 и др.): подавляющая часть материала выносится небольшим количеством гигантских рек (Амазонка, Ориноко и др.), тогда как все остальные денудационные процессы (малые реки, абразия берегов, эоловый вынос и т.д.) имеют подчиненное значение. Очаговый характер выноса терригенного материала определяет разнообразие поперечных (по отношению к береговой линии) фациальных рядов, протягивающихся вдоль побережий континентов. То есть, поперечные ряды фаций у устьев крупных рек коренным образом отличаются от рядов фаций тех областей, где вынос терригенного материала ограничен или отсутствует (Мурдмаа, 1979). Обращает на себя внимание закономерность, что большинство крупных рек дренирует гумидные зоны континентов, отражая климатическую зональность планеты.

Таким образом, шельф современных морей (особенно широкий) характеризуется одновременным «пятнистым» сосуществованием в одном и том же диапазоне глубин глинистых, алевроитовых, песчаных (и иногда карбонатных) фаций (Emery, 1952; Vieira et al., 2019 и др.).

¹ Эта зона (offshore) часто понимается либо как нижняя, наиболее удаленная от береговой линии часть прибрежной области, находящаяся в сфере деятельности трансформирующихся волн; либо как часть шельфа, находящаяся уже за пределами прибрежной области, ниже нормальной волновой базы, т.е. ниже глубины воздействия на дно максимальных из регулярно повторяющихся волнений (Долотов, 1989).

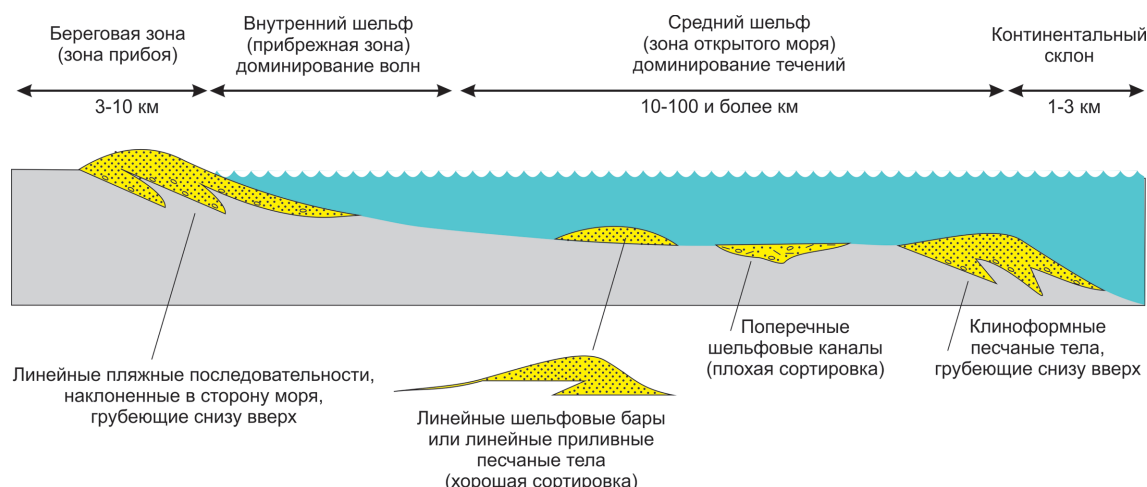


Рис. 14. Схема поперечного разреза от берега до континентального склона, иллюстрирующая профиль, размер и форму песчаных тел (по Pettijohn et al., 1987; Долотов, 1989, с дополнением)

Береговая зона (coastal) – зона прибоа <i>Син.</i> : зона пляжа; зона заплеска волн (swash zone); зона прибойного потока; тыльная часть берега (backshore)	Прибрежная зона (nearshore) – зона волн (внутренний шельф, до глубины 50 м) <i>Син.</i> : зона подводных валов и ложбин; зона разрушения волн (breaker zone); прибрежные мелководья	Зона открытого моря (offshore) – зона течений (средний шельф, 50–100 м) <i>Син.</i> : внешняя зона подводного берегового склона; зона волн мелководья (zone of shoaling waves)
Формы рельефа: песчаный пляж с надводной (субаэральной) и подводной (субаквальной) частями	Формы рельефа: Один-два или целая система подводных валов и ложбин (bars and troughs, ridges and runnels); каналы разрывных течений , направленные в сторону открытого моря и являющиеся путями оттока нагонных вод от берега	Формы рельефа: плащеобразные тела; изолированные удлиненные песчаные тела, перпендикулярные или субпараллельные береговой линии; вблизи каналов разрывных течений – песчаные дюны;
Водная толща: сложная структура – часть потоков направлена в сторону суши, между ними часть – в сторону моря; большая скорость и малая глубина потока; имеются зоны спокойной воды	Водная толща: разрушение волн – высокая турбулентность, возникновению сильных разнонаправленных волновых течений: у валов – в сторону берега и в сторону моря; в ложбинах – вдольбереговых течений	Водная толща: доминирование течений – волновых (в верхней части зоны) или постоянных (в нижней части зоны)
Скорость течений: очень высокая	Скорость течений: валы – до 1–1,5 м/с; ложбины – до 0,5–0,75 м/с	Скорость течений: 0,4 м/с (достаточная для переноса песчаного материала)
Форма переноса осадков: доминирование волочения и сальтации; во взвеси	Форма переноса осадков: волочение, сальтация (скачками), во взвеси	Форма переноса осадков: во взвеси
Осадочный материал: в нижней части пляжа – грубый материал (крупный песок, гравий и галька); в средней части – средне- и мелкозернистый хорошо отсортированный песок, в верхней части – мелкий песчаный материал со следами эоловой переработки и максимальным содержанием фракции тяжелых минералов	Осадочный материал: валы – мелкий, хорошо сортированный материал; ложбины – плохая сортировка осадков; смесь тонкого и грубозернистого, гравийного и галечного материала; разрывные каналы – крупный и грубозернистый материал	Осадочный материал: песчаный, алевритовый, глинистый; однородный и мелкий; сортировка хорошая С глубиной уменьшается содержание крупного песчаного материала и возрастает содержание илистого материала
Биотурбация: нет	Биотурбация: нет или не сохраняется	Биотурбация интенсивная; возрастает с глубиной; уменьшается при усилении гидродинамики
Штормовые волнения: в верхней части – полосы гальки и остатки штормовых валов;	Штормовые волнения: не сохраняется	Штормовые волнения: эпизодические; линзы грубозернистого материала среди тонкозернистого
Слоистость: в нижней части – круто- и пологонаклонная (в сторону моря); в средней части – тонкая параллельная; пологонаклонная (в сторону суши); в верхней части – чередование тонких, извилистых слойков, отличающихся содержанием тяжелой фракции	Слоистость: валы – чередование пакетов с горизонтальной и разнонаправленной наклонной слоистостью; ложбины – мелкая слоистость ряби (small-scale ripple lamination); беспорядочная и градационная (при резком и медленном ослаблении динамики среды); каналы – типичная косая слоистость	Слоистость: горизонтальная или пологонаклонная (parallel laminated sheet); градационная слоистость штормовых событий
Знаки ряби: нет	Знаки ряби: валы – симметричные, или слабо ассиметричные	Знаки ряби: ассиметричные
Мобильность форм рельефа: высокая	Мобильность форм рельефа: высокая; латеральное перемещение до 50 м/год, скорость накопления осадка – до 1 м/год	
Смежные обстановки: эоловые дюны, болота, солончаки (в зависимости от климата), речные и приливные каналы, дамбы и озера	Смежные обстановки: пляжи, приливные отмели и дельты, намывные валы, эстуарии, бухты и заливы, морские острова во время разрушения дельты	Смежные обстановки: каналы разрывных течений, подводные валы и ложбины прибрежной (nearshore) зоны

Табл. 4. Особенности рельефа, гидродинамики и осадков различных зон прибрежной области шельфа морей и океанов; составлено по данным (Мурдмаа, 1979; Pettijohn et al., 1987; Долотов, 1989)

Это означает, что переход от терригенных отложений к глинистым, и далее к карбонатным, не всегда свидетельствует об изменении глубины шельфа. Зона мозаичных «лоскутных» смешанных фаций может занимать обширный интервал глубин.

Локализация накопления осадков пашийского горизонта ЮТС в пределах среднего шельфа подтверждается следующими соображениями. На современном шельфе аккумулируется и захороняется лишь незначительная часть поступающего в него с суши терригенного материала. Большая часть проносится через шельф (благодаря высокой подвижности вод) и либо выносится на континентальный склон, либо поступает в общий баланс океана. Таким образом, современные шельфы – это главным образом зона переноса терригенного материала, на которой недолговечные (эфемерные, транзитные) обстановки чередуются либо с участками устойчивого осадконакопления, либо с участками размыва осадков (Мурдмаа, 1979).

Поступление терригенного материала с суши, размыв, перенос и повторная аккумуляция уже существующих осадков позволяет выделять *автохтонные* и *аллохтонные* осадки. *Автохтонные* осадки образуются в результате эрозии осадков, слагающих дно шельфа, эрозии береговой поверхности во время трансгрессии, а также биогенного или химического осаждения *in situ*. Как правило, автохтонные песчаные тела вытянуты параллельно береговой линии. *Аллохтонные* осадки поступают на шельф в результате штормовых потоков (песок), приливных потоков (ил и песок), выноса фронта дельты (очень мелкий песок и ил) и шлейфов берегового сноса (мелкий песок и ил). Аллохтонные песчаные тела демонстрируют ярко выраженные фациальные закономерности вдоль линии движения формирующего их потока (Galloway, Hobday, 1996).

Устойчивое осадконакопление (часто с большими скоростями) характерно главным образом для *средней части шельфа* (50–100 м), в осадках которого резко возрастает содержание тонких фракций – ила и алеврита (Anthony et al., 2010, 2014 и др.), уменьшается количество слоистых текстур и увеличивается биотурбация (Galloway, Hobday, 1996). Увеличение биотурбации связано с существенными изменениями в составе донной фауны – фильтраторы, доминирующие в прибрежной зоне, сменяются илоедами: извлекать пищу из грунта, обогащенного органикой, становится эволюционно выгоднее (Нейман и др., 1977; Seilacher, 1967, 2007).

Пески и песчаники среднего шельфа (зоны открытого моря) являются, как правило, в высокой или средней степени зрелыми, хорошо отсортированными; могут содержать окаменелости и глауконит (Pettijohn et al., 1987).

Внешний шельф (100–200 м), в отличие от среднего шельфа, характеризуется пониженными и даже часто нулевыми скоростями осадконакопления из-за сильных придонных течений и активного воздействия длинных волн (приливных, гравитационных, цунами).

Внутренний шельф (прибрежное мелководье) – зона активного волнового воздействия – основная зона механической дифференциации (отмучивания и разделения) грубообломочных, песчаных, алевритовых и илистых частиц. Илистый, алевритовый и песчаный материал частично выносится из внутреннего шельфа на средний шельф и в более глубокие зоны океана, частично накапливается в

виде подвижных (в направлении вдоль берега), хорошо сортированных песчаных тел, алевритовых и илистых банок (Мурдмаа, 1979; Anthony et al., 2010, 2014; Vieira et al., 2019 и др.). Подвижность осадков внутреннего шельфа затрудняет процесс их захоронения и фиксации в геологической летописи.

Устойчивое осадконакопление пашийского горизонта, сформировавшее хорошо отсортированные и зрелые песчаные тела, отвечает условиям современного среднего шельфа и смежных с ним обстановок.

Геометрия, расположение и размеры песчаных тел пашийского горизонта ЮТС (рис. 11, 12, табл. 3) сопоставимы с песчаными телами современных шельфов.

На современном среднем шельфе песчаные тела образуют как продольные (параллельные береговой линии), так и поперечные (перпендикулярные береговой линии) формы донного рельефа (песчаные бары, гряды, ленты, каналы и борозды). Продольные песчаные тела обычно имеют мощность в несколько метров и протяженность от метров до километров. Поперечные песчаные тела, как правило, крупнее.

Например, на стабильном среднем шельфе южного моря Кореи поперечные песчаные тела обычно имеют мощность до 20 м, ширину до 10 км и протяженность от сотен метров до 60 км (Park et al., 2003). Седиментационные текстуры включают косую слоистость, знаки ряби и биотурбацию.

На активном приливно-отливном внутреннем и среднем шельфе (tidal shelf) современных морей, омывающих Британские острова, где сильные приливные течения существуют на большом расстоянии от берега и переносят, перемалывают и откладывают песчаный материал, распространены группы хорошо выраженных удлиненных песчаных тел мощностью до 15 м, шириной до 2 км и длиной от 10 до 15 км. Длинные оси этих тел располагаются субпараллельно береговой линии (Van Landeghem et al., 2009; Ward et al., 2015, 2020); другие примеры (Reynaud, Dalrymple, 2012).

Как правило, у песчаных тел шельфа подошва и кровля резкие, сортировка хорошая, изменение зернистости по вертикали выражено незначительно; поэтому кривая гамма-каротажа имеет тенденцию к блоковой конфигурации (Pettijohn et al., 1987). Подобная конфигурация кривой гамма-каротажа часто (но не всегда) встречается у песчаников пашийского горизонта.

Трансгрессивная последовательность осадков пашийского горизонта и всей ТТД ЮТС в целом хорошо согласуется с основными закономерностями трансгрессивных шельфовых образований.

Поверхность шельфа стремится достигнуть профиля равновесия – уменьшить энергию всех происходящих на нем процессов. Соответственно, глубокие и крутые уступы дна бассейна отражают высокую энергию волн по отношению к количеству поступающего осадочного материала. Мелководное и пологое дно свидетельствует о значительном поступлении осадочного материала и недостаточности энергии волн воспрепятствовать его отложению. Относительное повышение уровня (трансгрессия) моря предсказуемо вызывает эрозию береговой поверхности и осаждение материала на прилегающих участках шельфа. И наоборот, относительное падение

уровня моря вызывает эрозию дна шельфа и смыв шельфовых отложений.

Трансгрессивные шельфовые последовательности возникают, когда аккомодация преобладает над сносом материала. Шельфовые осадки последовательно накладываются на прибрежные образования. Там, где энергия вод достаточна, формируются песчаные бары, располагаясь вдоль внутреннего шельфа; по мере трансгрессии и углубления воды эти тела захороняются.

Основание трансгрессивной серии сложено базальным гравием и крупнозернистыми косослоистыми песками (аналог в ТТД – воробьевский горизонт). Вышележащие образования представлены мелкозернистыми отложениями, сформированными слабыми течениями на более значительных глубинах (аналог в ТТД – ардатовско-муллинский интервал и пашийский горизонт). Например, крупные косослоистые напластования, соответствующие фазе максимальной аккумуляции песчаных тел, могут быть перекрыты постепенно утончающимися пачками песков с широким диапазоном направлений палеотечений. Верхняя поверхность сглаживается течениями, перерабатывается илоедами и перекрывается биотурбированными шельфовыми алевритовыми и иловыми осадками (Galloway, Hobday, 1996).

Концентрическое (дуговое) расположение некоторых песчаных тел пашийского горизонта можно объяснить направлениями течений. Шельфовые потоки, как правило, параллельны батиметрическому контуру (Csanady, 1981). Поперечное шельфовое течение возникает значительно реже из-за разделения и отклонения потоков прибрежными мысами и подводными батиметрическими особенностями (Galloway, Hobday, 1996). В целом, дугообразные линии песчаных тел пашийского горизонта повторяют контуры береговой линии и границы континентального склона, т.е. более или менее параллельны батиметрическому контуру (рис. 13).

Близость глинистых и песчаных тел пашийского горизонта ЮТС имеет много аналогий на современном шельфе. Известно, что ил может накапливаться в условиях относительно сильных волн или течений при условии, что концентрация взвешенных частиц составляет не менее 100 мг/л. Биологическое осаждение ила, например илоедами, может вызвать оседание илстых частиц при меньших концентрациях. На большинстве шельфов концентрация ила составляет не более 1 мг/л, поэтому ил накапливается в основном в более глубоких или защищенных зонах, где течения не препятствуют его осаждению.

Высокая скорость поступления ила, связанная с дельтовыми системами, и вдольбереговые течения создают грязевые потоки, формирующие иловые покровы (пояса) по всему шельфу: в пределах среднего и даже внешнего шельфа.

Слоистые глинистые отложения, содержащие редкие норы, широко распространенные в верхах пашийского горизонта ЮТС, указывают на быстрое осаждение или частую переработку осадка. Тонкослоистые илы без биотурбации, распространенные в нижней части пашийского горизонта (и ниже по разрезу), указывают на стратификацию водной массы и застойные условия на дне. *Биотурбированные* илы (аргиллиты), указывающие на хорошо перемешанную придонную воду и умеренную

или низкую скорость осаждения, в ТТД ЮТС практически не встречаются.

Рассмотренные закономерности накопления осадков на современном шельфе подтверждают высказанные выше предположения о наибольшем сходстве осадков пашийского горизонта ЮТС с осадками шельфа зоны открытого моря – или средней части шельфа.

Модель осадконакопления пашийского горизонта

Трансгрессия моря, происходившая в среднем, предполагает наличие морских течений, достаточных для перераспределения поступающих с суши осадков и формирования линейных песчаных тел, протягивавшихся вдоль берега. Известно, что в экваториальной зоне широко распространены разнонаправленные течения широтного направления; можно предположить их наличие и в девонском бассейне ЮТС. Можно также отметить, что в литературе имеются примеры линейных песчаных тел, параллельных и перпендикулярных береговой линии, сформировавшихся в результате деятельности приливных течений (Burnett, Adams, 1977; Pettijohn et al., 1987). Широкий шельф окраины ВЕП способствовал интенсивным приливно-отливным течениям в пашийском бассейне ЮТС.

Удаленность источников сноса и береговой линии, переработка осадков течениями привели к формированию песчаных тел, сложенных зрелым, хорошо сортированным кварцевым материалом. Песчаные тела включали тонкие протяженные глинистые прослои (например, репер «аргиллит», разделяющий нижне- и верхнепашийские отложения). Указанные признаки песчаных тел – зрелость, сортированность, глинистые прослои – характерны для шельфовых песков (Pettijohn et al., 1987).

Приведенные выше факты дали возможность предположить схему геоморфологии дна морского бассейна территории ЮТС во время отложения осадков пашийского горизонта (рис. 15).

Предположительно, дно бассейна представляло собой относительно ровное плато, на котором происходило накопление алеврито-глинистого материала, выделенного в класс 2 или песчано-алеврито-глинистого (переходного) типа разреза, выделенного в класс 3 (коэфф. песч. 10–30 %; табл. 1, рис. 8). Глубина моря была примерно одинаковой в пределах всего бассейна и примерно соответствовала глубине среднего шельфа, составляя 50–100 м. Участки дна, защищенные от действия течений формами рельефа и/или относительными понижениями дна, характеризовались преимущественным накоплением илов (глинистого материала) (коэфф. песч. 0–10 %); такие участки выделены в класс 1 или в глинистый тип разреза. Условно их можно рассматривать как аналоги лагун. От настоящих лагун они отличаются тем, что распространены по всей территории бассейна, а не приурочены только к береговой линии.

Положительные формы рельефа морского дна, сложенные песчано-алеврито-глинистым (коэфф. песч. 30–40 %), алеврито-песчаным (коэфф. песч. 30–40 %) и песчаным материалом (коэфф. песч. 60–100 %) (классы 3–4–5), могут рассматриваться как автохтонные подводные песчаные валы, формировавшие обширные системы (рис. 15, 16).

Одновременно с подводными песчаными валами в подводных ложбинах, образованных поперечными течениями (со стороны берега в сторону моря), формировались плохо отсортированные аллохтонные осадки, принесенные с суши.

Основными процессами, формировавшими подводные песчаные валы и разделяющими их глинистые тела, являлись: 1) переработка, сортировка, перенос и аккумуляция поступавшего с суши материала морскими течениями во время трансгрессии моря; 2) неоднократный латеральный (боковой) перенос песчаного и алевритового материала песчаных валов течениями; 3) эрозия и разрушение уже сформировавшегося осадка во время регрессивных фаз моря.

Подчеркнем, что традиционные представления о формировании песчаных тел во время регрессии, а глинистых – во время трансгрессии, имеют подчиненное значение (а именно «не работают»), так как на широком шельфе девонского моря ЮТС обстановки, в которых накапливались глинистые тела и обстановки, в которых накапливались песчаные тела, сосуществовали одновременно.

Таким образом, фациальный ряд отложений пашийского горизонта целесообразно рассматривать в виде «типов разрезов» (классов) (табл. 1; рис. 8), отражающих песчаность/глинистость разреза. Каждому типу разреза

отвечают определенные типы кривых каротажа, что позволяет выделять их по данным ГИС.

Полученные новые материалы и, прежде всего, составленные карты (рис. 11, 12) позволили уточнить схему обстановок накопления осадков пашийского горизонта (рис. 16).

Основное отличие данной схемы от предыдущих заключается в том, что вся изученная территория ЮТС включена в зону морского мелководья широкого эпиконтинентального шельфа. Прибрежные обстановки (аллювиальные, пляжевые, дельтовые), по-видимому, располагаются за пределами района исследований. Это же можно сказать и о более глубоководных морских обстановках. Мы не исключаем присутствия на данной территории отдельных реликтов прибрежных обстановок, тем более, что они широко упоминаются в литературных источниках (Шакиров, 2003; Лощева и др., 2017 и др.), однако в настоящее время у нас нет прямых керновых данных для их подтверждения.

Выводы

Формирование пашийских отложений в условиях среднего шельфа морского бассейна подтверждается комплексом литологических, палеонтологических и ихнологических данных.

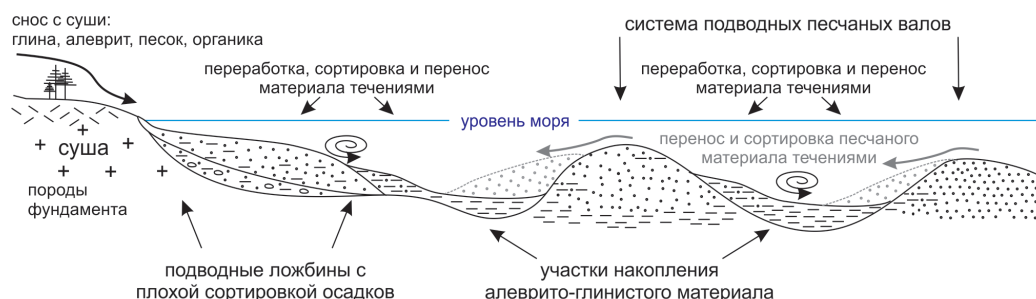


Рис. 15. Гипотетическая схема геоморфологии дна морского бассейна во время формирования осадков пашийского горизонта ЮТС

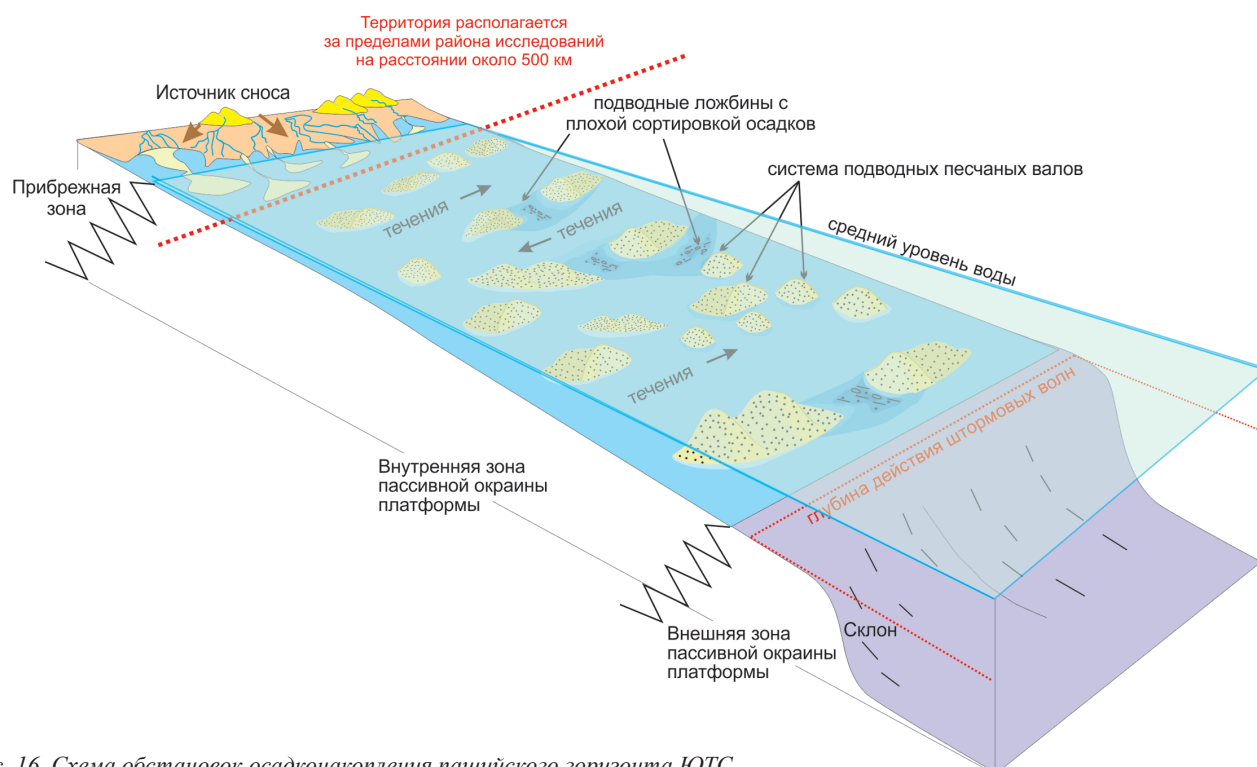


Рис. 16. Схема обстановок осадконакопления пашийского горизонта ЮТС

Пашийские отложения ЮТС содержат многочисленные следы жизнедеятельности организмов. Биотурбация затронула практически весь интервал, достигая максимальной степени в алевролитах.

Минимальная биотурбация зафиксирована в песчаных телах, которые «зажаты» между глинисто-алевритовыми пачками, содержащими морскую фауну и ихнотаксоны морской природы: *Spirophyton*, *Skolithos* и *Thalassinoides*.

Глинисто-алевритовые пачки формировались в условиях ихнофагии *Sruziana*, которая приурочена к хорошо сортированным субстратам, между уровнями действия слабых и штормовых волн. Ходы *Spirophyton* и *Zoophycos* в ихноценозе пашийского горизонта ЮТС могли появиться вследствие очень медленного осадконакопления, позволяющего организмам-иллодам заселить нижний ярус осадка (Bromley, 1996).

Песчаные пачки могли сформироваться в условиях ихнофагии *Skolithos*, приуроченной, чаще всего, к хорошо сортированным песчанкам, находящимся в постоянном передвижении и подверженным внезапной эрозии или отложению (Микулаш, Дронов, 2006; Bromley, 1996).

Дно пашийского бассейна представляло собой относительно ровное плато, на котором происходило одновременное накопление песчаного и глинистого материала. Между этими крайними типами осадочных тел накапливались алеврито-глинистые, песчано-алеврито-глинистые или алеврито-песчаные осадки. Накопление всех типов осадков происходило во время трансгрессии морского бассейна. Регрессия моря приводила к эрозии и разрушению уже сформированных осадков.

Положительные формы рельефа морского дна, сложенные песчано-алеврито-глинистым, алеврито-песчаным и песчаным материалом, могут рассматриваться как автохтонные подводные песчаные валы, формировавшие обширные системы. Одновременно с подводными песчаными валами в подводных ложбинах, образованных поперечными течениями (со стороны берега в сторону моря), формировались плохо отсортированные аллохтонные осадки, принесенные с суши.

Модель формирования пашийского горизонта ЮТС может быть экстраполирована на формирование всей ТТД ЮТС.

Основными процессами осадконакопления ТТД ЮТС являлись: 1) переработка, сортировка, перенос и аккумуляция поступавшего с суши материала морскими течениями во время трансгрессии моря; 2) неоднократный латеральный (боковой) перенос песчаного и алевритового материала подводных песчаных валов течениями; 3) эрозия и разрушение уже сформировавшегося осадка во время регрессивных фаз моря. В истории накопления ТТД ЮТС эта последовательность процессов неоднократно повторялась. По крайней мере, все эти три процесса происходили во время формирования отложений каждого горизонта – воробьевского, ардатовского, муллинского, пашийского и тиманского.

Благодарности/Финансирование

Мы благодарим компанию ПАО «Татнефть» за предоставленные данные и разрешение на их использование в данной публикации.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2022-299 в рамках программы развития НЦМУ «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты».

Литература

- Алексеев В.П. (2014). Атлас субаквальных фаций нижнемеловых отложений Западной Сибири (ХМАО-Югра). Екатеринбург: УГТУ, 284 с.
- Алиев М.М., Батанова Г.П., Хачатрян Р.О., Ляшенко А.И., Новожилова С.И., Назаренко А.М., Адлер М.Г., Федорова Т.И., Тюрин А.М., Михайлова Н.А. (1978). Девонские отложения Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. Москва: Недра, 216 с.
- Антропов И.А., Батанова Г.Н. (1960). Стратиграфия девона востока Татарии. *Нефтегазоносность девона востока Татарии*. Т. 1. Тр. КФАН СССР, 6, с. 8–88.
- Аристов В.А. (1988). Девонские конodontы Центрального девонского поля (Русская платформа). Москва: Наука, 120 с.
- Афанасьева М.С., Амон Э.О. (2012). Биостратиграфия и палеобиогеография радиоларий девона России. Москва: ПИН РАН, 280 с.
- Барабошкин Е.Ю. (2007). Практическая седиментология (терригенные коллекторы). Томск: Центр профессиональной переподготовки специалистов нефтегазового дела ТПУ, 154 с.
- Губарева В.С. (2003). Девонская система. *Геология Татарстана: Стратиграфия и тектоника*. Под ред. Б.В. Бутова. Москва: ГЕОС, с. 87–102.
- Данилова Т.Е. (2008). Атлас пород основных нефтеносных горизонтов палеозоя республики Татарстан. Терригенные породы девона и нижнего карбона. Казань: Плутон, 440 с.
- Долотов Ю.С. (1989). Динамические обстановки прибрежно-морского рельефообразования и осадконакопления. Москва: Наука, 269 с.
- Лисицын А.П. (1974). Осадкообразование в океанах. Количественное распределение осадочного материала. Москва: Наука, 438 с.
- Лисицын А.П. (1978). Процессы океанской седиментации. Литология и геохимия. Москва: Наука, 366 с.
- Ларочкина И.А. (2008). Геологические основы поисков и разведки нефтегазовых месторождений на территории Республики Татарстан. Казань: ООО ПФ «Гарт», 210 с.
- Лошцева З.А., Магдеев М.Ш., Агафонов С.Г., Федотов М.В., Магдеева О.В. (2017). Новый взгляд на геологическое строение пашийского горизонта (D3ps) Азнакаевской площади Ромашкинского месторождения нефти. *Георесурсы*, 19(1), с. 21–26. <http://doi.org/10.18599/grs.19.1.4>
- Мальцев М.В. (1959). Некоторые особенности строения терригенного девона на Южном куполе Татарского свода. *Ученые записки Казанского университета*, 119(2), с. 112–130.
- Мизенс Г.А., Свяжина И.А. (2007). О палеогеографии Урала в девоне. *Литосфера*, 2, с. 29–44.
- Микрюков М.Ф., Тимергазин К.Р. (1948). Новые данные по стратиграфии и литологии терригенных отложений девона Бавлинско-Туймазинского нефтеносного района. *Нефтяное хозяйство*, 9, с. 43–53.
- Микулаш Р., Дронов А.В. (2006). Палеоихнология – введение в изучение ископаемых следов жизнедеятельности. Прага: Геологический институт Академии наук Чешской Республики, 122 с.
- Миропольская Г.Л., Герасимова Е.Т., Ерофеев Н.С. (1956). Литология пашийской свиты юго-востока Татарии. *Нефтегазоносность Урало-Волжской области*. Москва: Изд-во Академ. наук СССР, с. 255–272.
- Миропольская Г.Л., Герасимова Е.Т., Логинова В.Н., Тузава Л.С. (1960). Нефтегазоносность девона востока Татарии. Т. 2. Литология и фации. Тр. КФАН СССР, 6, 428 с.
- Михайлова Н.А. (1973). Методика составления крупномасштабных литолого-фациальных и палеогеографических карт. Москва: Наука, 54 с.
- Михайлова Н.А. (1977). Зоны выклинивания и неструктурные ловушки (в терригенной толще девона Волго-Уральской провинции). Москва: Наука, 92 с.
- Мурдмаа И.О. (1979). Океанские фации. Приконтинентальные фации. Фации океанских шельфов. *Океанология. Геология океана. Осадкообразование и магматизм океана*. Под ред. П.Л. Безрукова. Москва: Наука, с. 269–285.
- Муслимов Р.Х. (2007). Совершенствование принципов разработки нефтяных месторождений. *Нефтегазоносность Республики Татарстан. Геология и разработка нефтяных месторождений*. Т. 1. Под ред. Р.Х. Муслимова. Казань: Фэн, с. 174–197.

- Муслимов Р.Х., Абдулмизитов Р.Г., Хисамов Р.Б., Миронова Л.М. (2007а). Геологическое строение и нефтеносность Ромашкинского месторождения. *Нефтегазоносность Республики Татарстан. Геология и разработка нефтяных месторождений*. Т. 1. Казань: Фэн, с. 236–243.
- Муслимов Р.Х., Абдулмизитов Р.Г., Хисамов Р.Б., Миронова Л.М. (2007б). Геологическое строение и нефтеносность Ново-Елховского месторождения. *Нефтегазоносность Республики Татарстан. Геология и разработка нефтяных месторождений*. Т. 1. Казань: Фэн, с. 268–289.
- Назарова В.М., Кононова Л.И. (2016). Руководящие виды конodontов среднего девона Воронежской антеклизы. *Материалы совещания: Состояние стратиграфической базы центра и юго-востока Восточно-Европейской платформы*. Москва: ФГБУ «ВНИГНИ», с. 51–55.
- Назарова В.М., Кононова Л.И. (2020). Комплексы конodontов из живецких отложений (средний девон) скважины Щигры-16 (Воронежская антеклиза). *ПАЛЕОСТРАТ–2020. Годишное собрание (научная конференция) секции палеонтологии МОИП и Московского отделения Палеонтологического общества при РАН*. Москва: Палеонтологический ин-т им. А.А. Борисяка РАН, с. 41–42.
- Нейман А.А., Зезина О.Н., Семенов В.Н. (1977). Донная фауна шельфа и материкового склона. *Биология океана*. Т. 1. Под ред. А.С. Мониной. Москва: Наука, 415 с.
- Пучков В. Н. (2010). Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ООО ДизайнПолиграфСервис, 280 с.
- Решения Всесоюзного совещания по выработке общей унифицированной схемы стратиграфии девонских и додевонских отложений Русской платформы и западного склона Урала (1951). Ленинград: Госоптехиздат, 37 с.
- Решение межведомственного регионального стратиграфического совещания по среднему и верхнему палеозою Русской платформы с региональными стратиграфическими схемами. Девонская система (1988). Ленинград, 60 с.
- Решение Межведомственного совещания по разработке унифицированных стратиграфических схем верхнего докембрия и палеозоя Русской платформы (1965). Ленинград, 79 с.
- Решения по уточнению унифицированных стратиграфических схем верхнего протерозоя и палеозоя Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (1962). Москва, 48 с.
- Родионова Г.Д., Умнова В.Т., Кононова Л.И., Овнатанова Н.С., Ржонсницкая М.А., Федорова Т.И. (1995). Девон воронежской антеклизы и Московской синеклизы. Москва: Центральный региональный геологический центр, 265 с.
- Саркисян С.Г., Михайлова Н.А. (1961). Палеогеография времени образования терригенной толщи девона Башкирии и Татарии. Москва: Изд-во АН СССР, 262 с.
- Смелков В.М., Тухватуллин Р.К. (2007). Стратиграфия палеозойских отложений. *Нефтегазоносность Республики Татарстан. Геология и разработка нефтяных месторождений*. Т. 1. Под ред. Р.Х. Муслимова. Казань: Фэн, с. 52–65.
- Тихий В.Н. (1956). Новые данные по стратиграфии и геологической истории девона Волго-Уральской области. *Труды совещания 10–15 мая 1954 г.: Нефтегазоносность Урало-Волжской области*. Москва: Изд-во Акад. наук СССР, с. 127–134.
- Тихий В.Н. (1969). Девонский период. *Атлас литолого-палеогеографических карт СССР: Т. II. Девонский, каменноугольный и пермский периоды*. Москва: ГУГК, 68 л.
- Тихий В.Н. (1973) Волго-Уральская нефтеносная область. *Стратиграфия СССР. Девонская система*. Кн. 1. Под ред. Б.П. Марковского, Д.В. Наливкина, М.А. Ржонсницкой. Москва: Недра, с. 128–144.
- Тихий В.Н. (1975). Девонский период. Палеогеография. *Палеогеография СССР. Объяснительная записка к Атласу литолого-палеогеографических карт СССР. Т. 2. Девонский, каменноугольный, пермский периоды*. Москва: Недра, с. 12–40.
- Тихомиров С.В. (1995). Этапы осадконакопления девона Русской платформы и общие вопросы развития и строения стратисферы. Москва: Недра, 445 с.
- Трофимук А.А. (1947). Законтурный флудинг в Туймазах. *Нефтяное хозяйство*, 4, с. 13–19.
- Унифицированная субрегиональная стратиграфическая схема верхнедевонских отложений Волго-Уральского субрегиона. Объяснительная записка (2018). Под ред. Н.К. Фортунатовой, Е.Л. Зайцевой, М.А. Бушуевой и др. Москва: ФГБУ «ВНИГНИ», 64 с.
- Фортунатова Н.К., Зайцева Е.Л., Карцева О.А. (2013). Строение девонского терригенного комплекса и положение границы среднего и верхнего девона на западе Татарстана. *Бюллетень МОИП. Отдел геологический*, 88(3), с. 22–41.
- Халымбаджа В.Г., Чернышева Н.Г. (1970). Конodontы рода *Ansuroidella* из отложений востока Русской платформы и Западного Приуралья и их стратиграфическое значение. *Биостратиграфия и палеонтология палеозойских отложений востока Русской платформы западного Приуралья*. Казань: Казан. ун-т, с. 81–103.
- Шакиров А.Н. (2003). Литолого-фациальные исследования продуктивных пластов палеозоя Татарстана в связи с проблемой повышения нефтеотдачи. Дис. д. геол.-мин. н. Санкт-Петербург, 435 с.
- Шаргородский И.Е., Либерман В.Б., Казаков Э.Р., Зинатова М.Ф., Гирин И.Н., Зиганшин А.А. (2004). Составление тектонической схемы центральных районов Приволжского федерального округа. *Георесурсы*, 1(15), с. 12–15.
- Шейн В.С., Алференок А.В., Долматова И.В., Мельникова Н.А. (2020). Геодинамические условия формирования осадочного чехла палеобассейнов Восточно-Европейского палеоконтинента. *Геология нефти и газа*, 1, с. 35–55. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2020-1-35-55>
- Alekseev A.S., Kononova L.I., Nikishin A.M. (1996). The Devonian and Carboniferous of the Moscow Syncline (Russian Platform): Stratigraphy and sea-level changes. *Tectonophysics*, 268(1–4), pp. 149–168. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00229-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00229-6)
- Anthony E.J., Gardel A., Gratiot N. (2014). Fluvial sediment supply, mud banks, cheniers and the morphodynamics of the coast of South America between the Amazon and Orinoco river mouths. *Geological Society Special Publication*, 388(1), pp. 533–560. <https://doi.org/10.1144/SP388.8>
- Anthony E.J., Gardel A., Gratiot N., Proisy C., Allison M. A., Dolique F., Fromard F. (2010). The Amazon-influenced muddy coast of South America: A review of mud-bank-shoreline interactions. *Earth-Science Reviews*, 103(3–4), pp. 99–121. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.09.008>
- Artushkova O.V., Maslov V.A., Pazukhin V.N. et al. (2011). Devonian and Lower Carboniferous type sections of the western South Urals: Pre-Conference Field Excursion Guidebook. *Int. Conf.: Biostratigraphy, Paleogeography and Events in Devonian and Lower Carboniferous*. Ufa, 92 p.
- Becker R.T., Marshall J.E.A., Da Silva A.-C., Agterberg F.P., Gradstein F.M., Ogg J.G. (2020). The Devonian Period. *The Geological Time Scale V. 2*. Eds. Gradstein F., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. Amsterdam: Elsevier, pp. 733–810. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824360-2.00022-X>
- Bostock H., Jenkins C., Mackay K., Carter L., Nodder S., Orpin A., Pallentin A., Wysoczanski R. (2019). Distribution of surficial sediments in the ocean around New Zealand/Aotearoa. Part B: continental shelf. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 62(1), pp. 24–45. <https://doi.org/10.1080/00288306.2018.1523199>
- Bromley R.G. (1996). Trace fossils. Biology, taphonomy and applications. London: Chapman and Hall, 361 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2875-7>
- Csanady G.T. (1981). Circulation in the Coastal Ocean. *Advances in Geophysics*, 23, pp. 101–183. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60331-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60331-3)
- Einsele G. (2000). Sedimentary Basins. Evolution, Facies, and Sediment Budget. 2nd ed. Heidelberg: Springer Berlin, 792 p.
- Emery K.O. (1952). Continental shelf sediments of Southern California. *Bulletin of the Geological Society of America*, 63(11), pp. 1105–1108. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1105:CSSOSC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1105:CSSOSC]2.0.CO;2)
- Galloway W.E., Hobday D.K. (1996). Terrigenous Shelf Systems. *Terrigenous Clastic Depositional Systems*. Heidelberg: Springer Berlin, pp. 159–185. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61018-9_7
- Johnson H.D., Baldwin C.T. (1986). Shallow siliciclastic seas. *Sedimentary environments and facies*. 2nd ed. Ed. H.G. Reading. Oxford: Blackwell, pp. 229–252.
- Jouanneau J.M., Weber O., Drago T., Rodrigues A., Oliveira A., Dias J.M.A., Garci, C., Schmidt S., Reyss J. L. (2002). Recent sedimentation and sedimentary budgets on the western Iberian shelf. *Progress in Oceanography*, 52(2–4), pp. 261–275. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00010-1)
- Kingston D.R., Dishroon C.P., Williams P.A. (1983). Global basin classification system. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 67, pp. 2175–2193. <https://doi.org/10.1306/AD460936-16F7-11D7-8645000102C1865D>
- Knaust D. (2017). Atlas of Trace Fossils in Well Core: Appearance, Taxonomy and Interpretation. Springer, Switzerland, 209 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49837-9>
- Lewis S.E., Olley J., Furuichi T., Sharma A., Burton J. (2014). Complex sediment deposition history on a wide continental shelf: Implications for the calculation of accumulation rates on the Great Barrier Reef. *Earth and Planetary Science Letters*, 393, pp. 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.02.038>
- Liao J.-C., Valenzuela-Rios J. I. (2008). Givetian and early Frasnian conodonts from the Compte section (Middle-Upper Devonian, Spanish Central Pyrenees). *Geol. Quart.*, 52(1), pp. 1–18.
- Mitchell A.H.G., Reading H.G. (1986). Sedimentation and tectonics. *Sedimentary environments and facies*. 2nd ed. Ed. H.G. Reading. Oxford: Blackwell, pp. 471–519.

Nikishin A.M., Ziegler P.A., Stephenson R. A., Cloetingh S.A.P.L., Furne A. V., Fokin P.A., et al. (1996). Late Precambrian to Triassic history of the East European Craton: Dynamics of sedimentary basin evolution. *Tectonophysics*, 268(1–4), pp. 23–63. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00228-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00228-4)

Ovnatanova N.S., Kononova L.I. (2008). Frasnian Conodonts from the Eastern Russian Platform. *Paleontological Journal*, 42(10), pp. 997–1166. <https://doi.org/10.1134/S0031030108100018>

Park S.C., Han H.S., Yoo D.G. (2003). Transgressive sand ridges on the mid-shelf of the southern sea of Korea (Korea Strait): Formation and development in high-energy environments. *Marine Geology*, 193(1–2), pp. 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00611-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00611-4)

Peterson J.A., Clarke J.W. (1983). Geology of the Volga-Ural Petroleum Province and detailed description of the Romashkino and Arlan oil fields. Reston: United States Department of the Interior Geological Survey, 90 p. <https://doi.org/10.3133/ofr83711>

Pettjohn F., Potter P.E., Siever R. (1987). Sandy Depositional Systems. *Sand and Sandstone*, pp. 341–423. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5_10

Reynaud J.-Y. and Dalrymple R.W. (2012). Shallow-Marine Tidal Deposits. *Principles of Tidal Sedimentology*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., pp. 335–369. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0123-6_13

Seilacher A. (1967). Bathymetry of trace fossils. *Marine Geology*, 5(5–6), pp. 413–428. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(67\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0025-3227(67)90051-5)

Seilacher A. (2007). Trace fossil analysis. Berlin: Springer-Verlag, 226 p. <https://doi.org/10.1017/S0016756808004378>

Selley R.C. (1972). Diagnosis of marine and non-marine environments from the Cambro-Ordovician sandstones of Jordan. *Journal of the Geological Society*, 128(2), pp. 135–150. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.128.2.0135>

Sibson R. (1981). A brief description of natural neighbor interpolation (Ch. 2). *Interpreting Multivariate Data*. Chichester: John Wiley, pp. 21–36.

Van Landeghem K.J.J., Uehara K., Wheeler A.J., Mitchell N.C., Scourse J.D. (2009). Post-glacial sediment dynamics in the Irish Sea and sediment wave morphology: Data-model comparisons. *Continental Shelf Research*, 29(14), pp. 1723–1736. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.05.014>

Vieira F.V., Bastos A.C., Quaresma V.S., Leite M.D., Costa A., Oliveira K.S.S., Dalvi C.F., Bahia R.G., Holz V.L., Moura R.L., Amado Filho G.M. (2019). Along-shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. *Continental Shelf Research*, 187(September), 103964. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.103964>

Ward S.L., Neill S.P., Van Landeghem K.J.J., Scourse J.D. (2015). Classifying seabed sediment type using simulated tidal-induced bed shear stress. *Marine Geology*, 367, pp. 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.05.010>

Ward S.L., Scourse J.D., Yokoyama Y., Neill S.P. (2020). The challenges of constraining shelf sea tidal models using seabed sediment grain size as a proxy for tidal currents. *Continental Shelf Research*, 205(December), 104165. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104165>

Ziegler W. (1962). Taxonomie und Phylogenie oberdevonischer Conodonten und ihre stratigraphische Bedeutung. *Abh. Hess. L.-Amt Bodenforsch*, 38, pp. 1–166.

Ziegler W. (1971). Conodont Stratigraphy of the European Devonian. *Geol. Soc. Am. Mem. Bould.*, 127, pp. 227–284. <https://doi.org/10.1130/MEM127-p227>

Ziegler W., Sandberg, C. (1990). The Late Devonian Standard Conodont Zonation. *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg*, 121, pp. 1–115.

Сведения об авторах

Владимир Владимирович Силантьев – доктор геол.-мин. наук, заведующий кафедрой палеонтологии и стратиграфии, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет; Филиал Казанского (Приволжского) федерального университета в городе Джизаке, Узбекистан

Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

e-mail: Vladimir.Silantiev@kpfu.ru

Марат Фанисович Валидов – ведущий инженер, начальник петрофизического отдела, Центр превосходства цифровых технологий в нефтегазовой отрасли, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет

Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Динара Надировна Мифтахутдинова – ассистент кафедры палеонтологии и стратиграфии, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет

Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Владимир Петрович Морозов – доктор геол.-мин. наук, профессор, заведующий кафедрой минералогии и литологии, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет

Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Булат Галиевич Ганиев – кандидат техн. наук, начальник департамента, Департамент разработки месторождений, Татнефть-Добыча, ПАО «Татнефть»

Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, д. 75

Азат Абузарович Лутфуллин – кандидат техн. наук, заместитель начальника департамента, Департамент разработки месторождений, Татнефть-Добыча, ПАО «Татнефть»

Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, д. 75

Кирилл Дмитриевич Шуматбаев – кандидат геол.-мин. наук, главный эксперт (по петрофизическим исследованиям), Департамент разработки месторождений, Татнефть-Добыча, ПАО «Татнефть»

Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, д. 75

Рушат Минехарисович Хабилов – начальник отдела мониторинга разработки месторождений и недропользования, Департамент разработки месторождений, Татнефть-Добыча, ПАО «Татнефть»

Россия, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, д. 75

Нурия Гавазовна Нургалеева – доктор геол.-мин. наук, профессор кафедры геологии нефти и газа имени акад. А.А. Трофимука, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет

Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Зоя Алексеевна Толоконникова – кандидат геол.-мин. наук, доцент, Кубанский государственный университет

Россия, 353400, Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149

Эдуард Анатольевич Королев – кандидат геол.-мин. наук, заведующий кафедрой общей геологии и гидрогеологии, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет

Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Владислав Анатольевич Судаков – заместитель директора института по инновационной деятельности, директор НОЦ «Моделирование ТРИЗ», Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Анастасия Викторовна Смирнова – инженер-проектировщик, Центр превосходства цифровых технологий в нефтегазовой отрасли, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет

Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Ксения Андреевна Голод – инженер, Центр превосходства цифровых технологий в нефтегазовой отрасли, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Алексей Александрович Леонтьев – ведущий инженер, начальник отдела интерпретации ГИС, Центр превосходства цифровых технологий в нефтегазовой отрасли, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Руслан Рамилевич Шамсиев – лаборант, Центр превосходства цифровых технологий в нефтегазовой отрасли, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Михаил Владимирович Нойкин – инженер, Центр превосходства цифровых технологий в нефтегазовой отрасли, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18

Виктор Евгеньевич Косарев – старший преподаватель кафедры геофизики и геоинформационных технологий, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Дарья Александровна Никонорова – лаборант, Научный центр международного уровня, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Радик Фанусович Ахметов – лаборант, Научный центр международного уровня, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) Федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Статья поступила в редакцию 09.09.2022;

Принята к публикации 19.11.2022;

Опубликована 20.12.2022

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Sedimentation model of the middle Devonian clastic succession of the South Tatar Arch, Pashyian Regional stage, Volga-Ural Oil and Gas Province, Russia

V.V. Silantiev^{1,4}, M.F. Validov¹, D.N. Miftakhutdinova¹, V.P. Morozov¹, B.G. Ganiev², A.A. Lutfullin², K.D. Shumatbaev², R.M. Khabipov², N.G. Nurgalieva¹, Z.A. Tolokonnikova^{1,3}, E.A. Korolev¹, V.A. Sudakov¹, A.V. Smirnova¹, K.A. Golod¹, A.A. Leontiev¹, R.R. Shamsiev¹, M.V. Noykin¹, V.E. Kosarev¹, D.A. Nikonorova¹, R.F. Akhmetov¹

¹Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

²Tatneft PJSC, Almetyevsk, Russian Federation

³Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation

⁴Branch of the Kazan (Volga Region) Federal University in the city of Jizzakh, Jizzakh, Republic of Uzbekistan

*Corresponding author: Vladimir V. Silantiev, e-mail: Vladimir.Silantiev@kpfu.ru

Abstract. The Pashyian Regional stage (horizon) is the main productive unit of the middle Devonian clastic succession of the South Tatar arch. This article presents, for the first time, maps of the lower and upper parts of the Pashyian, including data on sand-shale ratio, number of sand layers (reservoirs) and thickness, based on the analysis of logging data from 25,000 wells. The maps were created by spatial interpolation of Natural Neighbor and ArcGIS Pro software.

The model of sedimentation of the Pashyian Regional stage reflects the interpretation of the plotted maps as well as the synthesis of the results of detailed core investigations (lithological, sedimentological, ichnotextural, petrophysical, etc.) and analysis of archive and published materials.

The main points of the proposed model are as follows. The Pashyian sediments were formed in a marine basin, in an environment comparable to that of the middle shelf of modern seas – in an offshore zone dominated by current activity. The basin floor was a relatively flat plateau, on which sandy, silty and clay sediments were simultaneously accumulated. Sediments of all types accumulated during sea transgression. Sea regression caused erosion and destruction of the already formed sediments.

Positive landforms of seabed relief, composed predominantly of sandy well-sorted material, comprised autochthonous underwater sand bars, formed by constant currents parallel to the bathymetric contour of the seabed. Underwater sand bars formed extensive systems nearly throughout the entire territory of the modern South Tatar arch. At the same time, allochthonous, poorly sorted, less mature sediments were formed in underwater troughs produced by transversal currents (directed from the shore towards the sea).

The proposed model explains the consistent thickness of the Pashyian Regional stage, the mosaic distribution of sand bodies over the area, and the lens-like shape of the sand and siltstone reservoirs. The model can be extrapolated to other stratigraphic intervals of the Devonian clastic succession with similar sedimentological features.

Keywords: sedimentation model, clastic sediments, Devonian, Pashyian Regional stage (horizon), Volga-Ural Oil and Gas Province, oil-bearing capacity, reservoir

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under

agreement No. 075-15-2022-299 within the framework of the development program for a world-class Research Center “Efficient development of the global liquid hydrocarbon reserves”.

Recommended citation: Silantiev V.V., Validov M.F., Miftakhutdinova D.N., Morozov V.P., Ganiev B.G., Lutfullin A.A., Shumatbaev K.D., Khabipov R.M., Nurgalieva N.G., Tolokonnikova Z.A., Korolev E.A., Sudakov V.A., Smirnova A.V., Golod K.A., Leontiev A.A., Shamsiev R.R., Noykin M.V., Kosarev V.E., Nikonorova D.A., Akhmetov R.F. (2022). Sedimentation model of the middle Devonian clastic succession of the South Tatar Arch, Pashyian Regional stage, Volga-Ural Oil and Gas Province, Russia. *Georesursy = Georesources*, 24(4), pp. 12–39. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.4.2>

References

- Afanasieva M.S., Amon E.O. (2012). Biostratigraphy and paleobiogeography of the Devonian radiolarians of Russia. Moscow: Paleontological Institute of the RAS, 280 p. (In Russ.)
- Alekseev V.P. (2014). Atlas of subaqual facies of Lower Cretaceous deposits of Western Siberia (KhMAO–Ugra). Ekaterinburg: Ural State Mining University, 284 p. (In Russ.)
- Alekseev A.S., Kononova L.I., Nikishin A.M. (1996). The Devonian and Carboniferous of the Moscow Syncline (Russian Platform): Stratigraphy and sea-level changes. *Tectonophysics*, 268(1–4), pp. 149–168. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00229-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00229-6)
- Aliiev M.M., Batanova G.P., Khachatryan R.O., Lyashenko A.I., Novozhilova S.I., Naearenko A.M., Adler M.G., Fedorova T.I., Tyurikhun A.M., Mikhaylova N.A. (1978). Devonian deposits of the Volga-Ural oil and gas province. Moscow: Nedra Publ., 216 p. (In Russ.)
- Anthony E.J., Gardel A., Gratiot N. (2014). Fluvial sediment supply, mud banks, cheniers and the morphodynamics of the coast of South America between the Amazon and Orinoco river mouths. *Geological Society Special Publication*, 388(1), pp. 533–560. <https://doi.org/10.1144/SP388.8>
- Anthony E.J., Gardel A., Gratiot N., Proisy C., Allison M.A., Dolique F., Fromard F. (2010). The Amazon-influenced muddy coast of South America: A review of mud-bank-shoreline interactions. *Earth-Science Reviews*, 103(3–4), pp. 99–121. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.09.008>
- Antropov I.A., Batanova G.N. (1960). The Devonian stratigraphy of Eastern Tataria. Vol. 1. Oil bearing Devonian of Eastern Tataria. *Tr. KFN SSSR*, 6, pp. 8–88 p. (In Russ.)
- Aristov V.A. (1988). Devonian conodonts of the Central Devonian Field (Russian platform). Moscow: Nauka Publ., 120 p. (In Russ.)
- Artyushkova O.V., Maslov V.A., Pazukhin V.N. et al. (2011). Devonian and Lower Carboniferous type sections of the western South Urals: Pre-Conference Field Excursion Guidebook. *Int. Conf.: Biostratigraphy, Paleogeography and Events in Devonian and Lower Carboniferous*. Ufa, 92 p.
- Baraboshkin E.Yu. (2007). Practical sedimentology (terrigenous reservoirs). Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 154 p. (In Russ.)
- Becker R.T., Marshall J.E.A., Da Silva A.-C., Agterberg F.P., Gradstein F.M., Ogg J.G. (2020). The Devonian Period. *The Geological Time Scale V. 2*. Eds. Gradstein F., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. Amsterdam: Elsevier, pp. 733–810. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824360-2.00022-X>
- Bostock H., Jenkins C., Mackay K., Carter L., Nodder S., Orpin A., Pallentin A., Wysoczanski R. (2019). Distribution of surficial sediments in the ocean around New Zealand/Aotearoa. Part B: continental shelf. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 62(1), pp. 24–45. <https://doi.org/10.1080/00288306.2018.1523199>
- Bromley R.G. (1996). Trace fossils. Biology, taphonomy and applications. London: Chapman and Hall, 361 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2875-7>
- Csanady G.T. (1981). Circulation in the Coastal Ocean. *Advances in Geophysics*, 23, pp. 101–183. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60331-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60331-3)
- Danilova T.E. (2008). Atlas of rocks of the main oil-bearing horizons of the Paleozoic of the Republic of Tatarstan. Terrigenous rocks of Devonian and Lower Carboniferous. Kazan: Pluton, 440 p. (In Russ.)
- Decisions of the All-Union Conference on the Development of a Unified Stratigraphic Scheme for the Devonian and Pre-Devonian Deposits of the Russian Platform and the Western Slope of the Urals (1951). Leningrad, Gostoptekhizdat, 37 p. (In Russ.)
- Decision of the interdepartmental regional stratigraphic meeting on the Middle and Upper Paleozoic of the Russian platform with regional stratigraphic schemes. Devonian system (1990). Leningrad, 60 p. (In Russ.)
- Decisions of the Interdepartmental Meeting on the development of unified stratigraphic schemes of the Upper Precambrian and Paleozoic of the Russian Platform (1965). Leningrad, 79 p. (In Russ.)
- Decisions on the refinement of unified stratigraphic schemes of the Upper Proterozoic and Paleozoic of the Volga-Ural oil and gas province (1962). Moscow, All-Russian Scientific Research Geological Petroleum Institute, 48 p. (In Russ.)
- Dolotov Yu. S. (1989). Dynamic conditions of coastal-marine relief formation and sedimentation. Moscow: Nauka, 269 p. (In Russ.)
- Einsele G. (2000). Sedimentary Basins. Evolution, Facies, and Sediment Budget. 2nd ed. Heidelberg: Springer Berlin, 792 p.
- Emery K.O. (1952). Continental shelf sediments of Southern California. *Bulletin of the Geological Society of America*, 63(11), pp. 1105–1108. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1105:CSSOSC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1105:CSSOSC]2.0.CO;2)
- Fortunatova N.K., Zaytseva E.L., Kartseva O.A. (2013). The structure of the Devonian terrigenous complex and the position of the border of the Middle and Upper Devonian in the west of Tatarstan. *Byull. MOIP. Otd. geol. = Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geological Department*, 88(3), pp. 22–41. (In Russ.)
- Galloway W.E., Hobday D.K. (1996). Terrigenous Shelf Systems. *Terrigenous Clastic Depositional Systems*. Heidelberg: Springer Berlin, pp. 159–185. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61018-9_7
- Gubareva V.S. (2003). Devonian system. *Geology of Tatarstan: Stratigraphy and tectonics*. Ed. B.V. Burov. Moscow: GEOS, pp. 87–102. (In Russ.)
- Johnson H.D., Baldwin C.T. (1986). Shallow siliciclastic seas. *Sedimentary environments and facies*. 2nd ed. Ed. H.G. Reading. Oxford: Blackwell, pp. 229–252.
- Jouanneau J.M., Weber O., Drago T., Rodrigues A., Oliveira A., Dias J.M.A., Garci, C., Schmidt S., Reyss J. L. (2002). Recent sedimentation and sedimentary budgets on the western Iberian shelf. *Progress in Oceanography*, 52(2–4), pp. 261–275. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00010-1)
- Khalymbadza V.G., Chernysheva N.G. (1970). Conodonts of the genus *Ancyrodella* from the deposits of the East of the Russian Platform and the Western Urals and their stratigraphic significance. *Biostratigraphy and paleontology of Paleozoic deposits of the East of the Russian Platform of the Western Urals*. Kazan: Kazan University, pp. 81–103. (In Russ.)
- Kingston D.R., Dishroon C.P., Williams P.A. (1983). Global basin classification system. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 67, pp. 2175–2193. <https://doi.org/10.1306/AD460936-16F7-11D7-8645000102C1865D>
- Knaust D. (2017). Atlas of Trace Fossils in Well Core: Appearance, Taxonomy and Interpretation. Springer, Switzerland, 209 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49837-9>
- Lisitsyn A.P. (1974). Sedimentation in the oceans. Quantitative distribution of sedimentary material. Moscow: Nauka, 438 p. (In Russ.)
- Lisitsyn A.P. (1978). Processes of oceanic sedimentation. Lithology and geochemistry. Moscow: Nauka, 366 p. (In Russ.)
- Larochkina I.A. (2008). Geological bases of prospecting and exploration of oil and gas fields on the territory of the Republic of Tatarstan. Kazan: OOO Gart, 210 p. (In Russ.)
- Lewis S.E., Olley J., Furuichi T., Sharma A., Burton J. (2014). Complex sediment deposition history on a wide continental shelf: Implications for the calculation of accumulation rates on the Great Barrier Reef. *Earth and Planetary Science Letters*, 393, pp. 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.02.038>
- Liao J.-C., Valenzuela-Ríos J. I. (2008). Givetian and early Frasnian conodonts from the Compte section (Middle-Upper Devonian, Spanish Central Pyrenees). *Geol. Quart.*, 52(1), pp. 1–18.
- Loshcheva Z.A., Magdeev M.Sh., Agafonov S.G., Fedotov M.V., Magdeeva O.V. (2017). A new look at the geological structure of the Pashian horizon (D3ps) of the Aznakaevskaya area of the Romashkinskoye oil field. *Georesursy = Georesources*, 19(1), pp. 21–26. (In Russ.) <http://doi.org/10.18599/grs.19.1.4>
- Mal'tsev M.V. (1959). Some features of the structure of the terrigenous Devonian on the Southern dome of the Tatar vault. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta = Proceedings of Kazan University*, 119(2), pp. 112–130. (In Russ.)
- Mikhaylova N.A. (1973). Methodology of drawing up large-scale lithological-facies and paleogeographic maps. Moscow: Nauka, 54 p. (In Russ.)
- Mikhaylova N.A. (1977). Fringes and non-structural traps (in the terrigenous series of the Devonian of the Volga-Ural province). Moscow: Nauka, 92 p. (In Russ.)

- Mikryukov M.F., Timergazin K.R. (1948). New data on stratigraphy and lithology of terrigenous deposits of the Devonian of the Bavlinsko-Tuymazinsky oil-bearing area. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil industry*, 9, pp. 43–53. (In Russ.)
- Mikulash R., Dronov A.V. (2006). Paleoichnology is an introduction to the study of fossil traces of vital activity. Prague: Geological Institute of the Academy of Sciences of the Czech Republic, 122 p. (In Russ.)
- Miropol'skaya G.L., Gerasimova E.T., Erofeev N.S. (1956). Lithology of the Pashian formation of the south-east of Tatarstan. *Oil-and-gas content of the Ural-Volga region* [Moscow: Academy of Sciences of the USSR, pp. 255–272. (In Russ.)
- Miropolskaya G.L., Gerasimova E.T., Loginova V.N., Tuzava L.S. (1960). Lithology and facies. *Oil bearing Devonian of Eastern Tataria*. Vol. 2. Tr. KFA N SSSR, 6, 428 p. (In Russ.)
- Mitchell A.H.G., Reading H.G. (1986). Sedimentation and tectonics. *Sedimentary environments and facies*. 2nd ed. Ed. H.G. Reading. Oxford: Blackwell, pp. 471–519.
- Mizens G.A., Svyazhina, I.A. (2007). About the paleogeography of the Urals in Devon. *Litosfera = Lithosphere*, 2, pp. 29–44. (In Russ.)
- Murdmay I.O. (1979). Oceanic facies. Continental facies. Facies of ocean shelves. *Oceanology. Ocean geology. Sedimentation and magmatism of the ocean*. Ed. P.L. Bezrukov. Moscow: Nauka, pp. 269–285. (In Russ.)
- Muslimov R.Kh. (2007). Improving the principles of oil field development. *Oil-and-gas content of the Republic of Tatarstan. Geology and development of oil fields*. Vol. 1. Ed. R.Kh. Muslimov. Kazan: Fen, pp. 174–197. (In Russ.)
- Muslimov R.Kh., Abdulmazitov R.G., Khisamov R.B., Mironova L.M. (2007a). Geological structure and oil content of the Romashkinskoye field. *Oil-and-gas content of the Republic of Tatarstan. Geology and development of oil fields*. Vol. 1. Ed. R.Kh. Muslimov. Kazan: Fen, pp. 236–243. (In Russ.)
- Muslimov R.Kh., Abdulmazitov R.G., Khisamov R.B., Mironova L.M. (2007b). Geological structure and oil content of the Novo-Elkhovskiy field. *Oil-and-gas content of the Republic of Tatarstan. Geology and development of oil fields*. Vol. 1. Ed. R.Kh. Muslimov. Kazan: Fen, pp. 268–289. (In Russ.)
- Nazarova V.M., Kononova L.I. (2016). Markers of conodonts of the Middle Devonian of the Voronezh anticline. *Proc. Meet.: The state of the stratigraphic base of the center and the southeast of the East European Platform*. Moscow: All-Russian Scientific Research Geological Petroleum Institute, pp. 51–55. (In Russ.)
- Nazarova V.M., Kononova L.I. (2020). Conodont complexes from the Zhivet deposits (Middle Devonian) of the Shchigry-16 well (Voronezh anticline). *PALEOSTRATUS 2020. Annual meeting (scientific conference) of the Paleontology Section of the Moscow Society of Naturalists and the Moscow Branch of the Paleontological Society at the Russian Academy of Sciences*. Moscow: Paleontological Institute of the Russian Academy of Sciences, pp. 41–42. (In Russ.)
- Neyman A.A., Zvezina O.N., Semenov V.N. (1977). Bottom fauna of the shelf and the continental slope. *Biology of the ocean*. Vol. 1. Ed. A.S. Monin. Moscow: Nauka, 415 p. (In Russ.)
- Nikishin A.M., Ziegler P.A., Stephenson R.A., Cloetingh S.A.P.L., Furne A.V., Fokin P.A., et al. (1996). Late Precambrian to Triassic history of the East European Craton: Dynamics of sedimentary basin evolution. *Tectonophysics*, 268(1–4), pp. 23–63. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00228-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00228-4)
- Ovnatanova N.S., Kononova L.I. (2008). Frasnian Conodonts from the Eastern Russian Platform. *Paleontological Journal*, 42(10), pp. 997–1166. <https://doi.org/10.1134/S0031030108100018>
- Park S.C., Han H.S., Yoo D.G. (2003). Transgressive sand ridges on the mid-shelf of the southern sea of Korea (Korea Strait): Formation and development in high-energy environments. *Marine Geology*, 193(1–2), pp. 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00611-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00611-4)
- Peterson J.A., Clarke J.W. (1983). Geology of the Volga-Ural Petroleum Province and detailed description of the Romashkino and Arlan oil fields. Reston: United States Department of the Interior Geological Survey, 90 p. <https://doi.org/10.3133/ofr83711>
- Pettijohn F., Potter P.E., Siever R. (1987). Sandy Depositional Systems. *Sand and Sandstone*, pp. 341–423. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5_10
- Puchkov V.N. (2010). Geology of the Urals and Cisurals (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa: DizaynPoligrafServis, 280 p. (In Russ.)
- Reynaud J.-Y. and Dalrymple R.W. (2012). Shallow-Marine Tidal Deposits. *Principles of Tidal Sedimentology*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., pp. 335–369. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0123-6_13
- Rodionova G.D., Umnova V.T., Kononova L.I., Ovnatanova N.S., Rzhonsnitskaya M.A., Fedorova T.I. (1995). Devon of Voronezh anticline and Moscow syncline. Moscow: Central Regional Geological Center, 265 p. (In Russ.)
- Sarkisyan S.G., Mikhaylova N.A. (1961). Paleogeography of the time of formation of the terrigenous series of the Devonian Bashkiria and Tartary. Moscow: Academy of Sciences of USSR, 262 p. (In Russ.)
- Selacher A. (1967). Bathymetry of trace fossils. *Marine Geology*, 5(5–6), pp. 413–428. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(67\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0025-3227(67)90051-5)
- Selacher A. (2007). Trace fossil analysis. Berlin: Springer-Verlag, 226 p. <https://doi.org/10.1017/S0016756808004378>
- Selley R.C. (1972). Diagnosis of marine and non-marine environments from the Cambro-Ordovician sandstones of Jordan. *Journal of the Geological Society*, 128(2), pp. 135–150. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.128.2.0135>
- Shakirov A.N. (2003). Lithological and facies studies of productive strata of the Paleozoic of Tatarstan in connection with the problem of enhanced oil recovery. Dr. geol. and min. sci. diss. Saint Petersburg, 435 p. (In Russ.)
- Shargorodsky I.E., Lieberman V.B., Kazakov E.R., Zinatova M.F., Girina I.N., Ziganshin A.A. (2004). Drawing up a new tectonic scheme of the central regions of the Volga Federal District. *Georesursy = Georesources*, 1, pp. 12–15. (In Russ.)
- Shein V.S., Alferenok A.V., Dolmatova I.V., Mel'nikova N.A. (2020). Geodynamic conditions for the formation of the sedimentary cover of the paleobasins of the Eastern European paleocontinent. *Geologiya nefi i gaza = Geology of oil and gas*, 1, pp. 35–55. (In Russ.) DOI: 10.31087/0016-7894-2020-1-35-55
- Sibson R. (1981). A brief description of natural neighbor interpolation (Ch. 2). *Interpreting Multivariate Data*. Chichester: John Wiley, pp. 21–36.
- Smelkov V.M., Tikhvatullin R.K. (2007). Stratigraphy of Paleozoic deposits. *Oil-and-gas content of the Republic of Tatarstan. Geology and development of oil fields*. Vol. 1. Kazan: Fen, pp. 52–65. (In Russ.)
- Tikhviy V.N. (1956). New data on the stratigraphy and geological history of the Devonian of the Volga-Ural region. *Proc. Meet.: Oil-and-gas content of the Ural-Volga region*. Moscow: Academy of Sciences of USSR, pp. 127–134. (In Russ.)
- Tikhviy V.N. (1969). Devonian period. *Atlas of Lithological and paleogeographic maps of the USSR*. Vol. 2. Devonian, Carboniferous and Permian periods. Moscow: Main Directorate of Geodesy and Cartography, 68 p. (In Russ.)
- Tikhviy V.N. (1973). Volga-Ural oil-bearing region. *Stratigraphy of the USSR. Devonian System*. Book 1. Eds. B.P. Markovskiy, D.V. Nalivkin, M.A. Rzhonsnitskaya. Moscow: Nedra, pp. 128–144. (In Russ.)
- Tikhviy V.N. (1975). Devonian period. Paleogeography. *Paleogeography of the USSR. Explanatory note to the Atlas of Lithological and paleogeographic maps of the USSR*. Vol. 2. Devonian, Carboniferous, Permian periods. Moscow: Nedra, pp. 12–40. (In Russ.)
- Tikhomirov S.V. (1995). Stages of sedimentation of the Devonian of the Russian Platform and general issues of the development and structure of the stratosphere. Moscow: Nedra, 445 p. (In Russ.)
- Trofimuk A.A. (1947). Petroleum flood in Tuimaz. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil industry*, 4, pp. 13–19. (In Russ.)
- Unified regional stratigraphic scheme of the Upper Devonian sediments of the Volga-Ural subregion (2018). Explanatory note. Eds. N.K. Fortunatova, E.L. Zaytseva, M.A. Bushueva et al. Moscow: All-Russian Scientific Research Geological Petroleum Institute, 64 p. (In Russ.)
- Van Landeghem K.J.J., Uehara K., Wheeler A.J., Mitchell N.C., Scourse J.D. (2009). Post-glacial sediment dynamics in the Irish Sea and sediment wave morphology: Data-model comparisons. *Continental Shelf Research*, 29(14), pp. 1723–1736. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.05.014>
- Vieira F.V., Bastos A.C., Quaresma V.S., Leite M.D., Costa A., Oliveira K.S.S., Dalvi C.F., Bahia R.G., Holz V.L., Moura R.L., Amado Filho G.M. (2019). Along-shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. *Continental Shelf Research*, 187(September), 103964. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.103964>
- Ward S.L., Neill S.P., Van Landeghem K.J.J., Scourse J.D. (2015). Classifying seabed sediment type using simulated tidal-induced bed shear stress. *Marine Geology*, 367, pp. 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.05.010>
- Ward S.L., Scourse J.D., Yokoyama Y., Neill S.P. (2020). The challenges of constraining shelf sea tidal models using seabed sediment grain size as a proxy for tidal currents. *Continental Shelf Research*, 205(December), 104165. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104165>
- Ziegler W. (1962). Taxonomie und Phylogenie oberdevonischer Conodonten und ihre stratigraphische Bedeutung. *Abh. Hess. L.-Amt Bodenforsch*, 38, pp. 1–166.
- Ziegler W. (1971). Conodont Stratigraphy of the European Devonian. *Geol. Soc. Am. Mem. Bould.*, 127, pp. 227–284. <https://doi.org/10.1130/MEM127-p227>
- Ziegler W., Sandberg, C. (1990). The Late Devonian Standard Conodont Zonation. *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg*, 121, pp. 1–115.

About the Authors

Vladimir V. Silantiev – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of Department of Paleontology and Stratigraphy, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University; Branch of the Kazan Federal University in the city of Jizzakh of Republic of Uzbekistan

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation
e-mail: Vladimir.Silantiev@kpfu.ru

Marat F. Validov – Leading Engineer, Head of Petrophysical Department, Center for Excellence of Digital Technologies in the Oil and Gas Industry, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation

Dinara N. Miftakhutdinova – Assistant, Department of Paleontology and Stratigraphy, Kazan Federal University

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation

Vladimir P. Morozov – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Head of Department of Mineralogy and Lithology, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation

Bulat G. Ganiev – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Field Development, Tatneft-Dobycha, Tatneft PJSC

Lenin str., 75, Almetyevsk, 423450, Russian Federation

Azat A. Lutfullin – Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of the Department of Field Development, Tatneft-Dobycha, Tatneft PJSC

Lenin str., 75, Almetyevsk, 423450, Russian Federation

Kirill D. Shumatbaev – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Chief Expert (on petrophysical research), Department of Field Development, Tatneft-Dobycha, Tatneft PJSC

Lenin str., 75, Almetyevsk, 423450, Russian Federation

Rishat M. Khabipov – Head of the Field Development and Subsoil Use Monitoring Department, Department of Field Development, Tatneft-Dobycha, Tatneft PJSC

Lenin str., 75, Almetyevsk, 423450, Russian Federation

Nouria G. Nurgalieva – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Department of Oil and Gas Geology named after Academician A. A. Trofimuk, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation

Zoya A. Tolokonnikova – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Assistant Professor, Kuban State University

Stavropolskaya str., 149, Krasnodar, 353400, Russian Federation

Eduard A. Korolev – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of Department of General Geology and Hydrogeology, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation

Vladislav A. Sudakov – Deputy Director of the Institute for Innovations, Director of Hard-to-Recover Reserves Simulation Research and Educational Center, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University

Bolshaya Krasnaya str., 4, Kazan, 420111, Russian Federation

Anastasiya V. Smirnova – Design Engineer, Center for Excellence of Digital Technologies in the Oil and Gas Industry, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation

Kseniya A. Golod – Engineer, Center for Excellence of Digital Technologies in the Oil and Gas Industry, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation

Aleksey A. Leontiev – Leading Engineer, Head of Well Logging Interpretation Department, Center for Excellence of Digital Technologies in the Oil and Gas Industry, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation

Ruslan R. Shamsiev – Laboratory Assistant, Center for Excellence of Digital Technologies in the Oil and Gas Industry, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation

Mikhail V. Noykin – Engineer, Center for Excellence of Digital Technologies in the Oil and Gas Industry, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation

Viktor E. Kosarev – Senior Lecturer, Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation

Darya A. Nikonorova – Laboratory Assistant, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation

Radik F. Akhmetov – Laboratory Assistant, Institute of Geology and Petroleum Technology, Kazan Federal University

Kremlevskaya str., 18, Kazan, 420008, Russian Federation

Manuscript received 9 September 2022;

Accepted 19 November 2022; Published 20 December 2022