

УДК 551.351

**СЕДИМЕНТОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ РИФОВ И КАРБОНАТНЫХ ПЛАТФОРМ И ПРОЕЦИРОВАНИЕ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ НА ДРЕВНИЕ АНАЛОГИ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ПРОВИНЦИЙ РОССИИ****Вилесов А.П., Вахрушева И.А.**

ООО «Тюменский нефтяной научный центр»

**E-mail: [apvilesov@rosneft.ru](mailto:apvilesov@rosneft.ru)**

Рассмотрены ключевые направления седиментологических исследований современных рифов и карбонатных платформ, результаты которых важны для понимания строения ископаемых аналогов. К этим направлениям отнесены работы по изучению морфологии платформ, закономерностей распределения в их пределах различных фациальных зон, особенностей латеральной аккреции, формирования карбонатных микробиалитов, строения внутриплатформенных лагун и карбонатной седиментации в условиях интенсивного терригенного влияния. Приведены примеры сопоставления современных и ископаемых аналогов.

**Ключевые слова:** карбонатные платформы, рифы, морфология, фации, фациальные зоны, лагунная седиментация, карбонатные микробиолиты, смешанные седиментационные системы

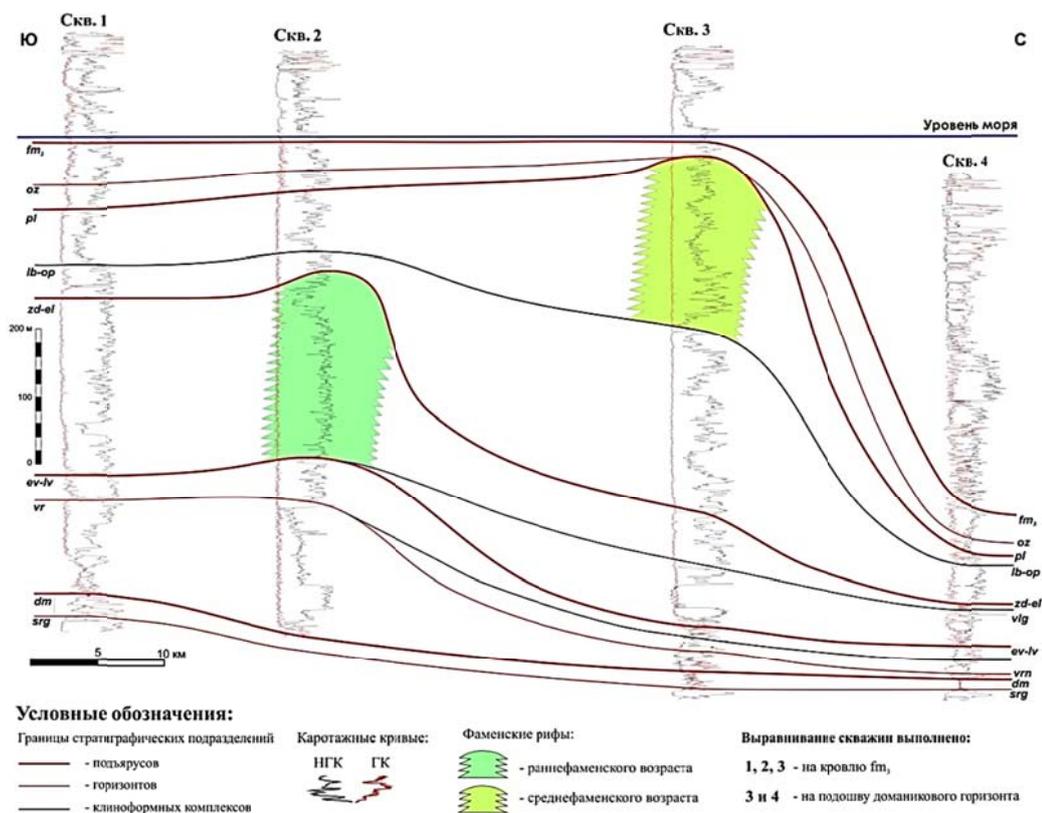
Развитие седиментологических исследований современных коралловых рифов и карбонатных платформ на протяжении последних десятилетий происходит по нарастающей. Комплекс используемых методов постоянно расширяется и, в результате, уже накопленная информация нередко требует проверки и переосмысления. Одним из методов, который стал активно применяться в исследованиях последнего десятилетия, является анализ космических снимков высокого разрешения. Благодаря его использованию оказался возможен выход на новый уровень понимания процессов карбонатонакопления, взгляд на карбонатные платформы и группы платформ в буквальном смысле сверху. Кроме этого, в целом наметился четкий тренд к системности исследований, анализу целого комплекса факторов, определяющих карбонатную седиментацию.

Результаты исследований таких специфичных, казалось бы, объектов, важны для понимания закономерностей формирования и строения древних (в том числе палеозойских) карбонатных комплексов и нередко могут оказаться полезны при создании седиментационных и геологических моделей продуктивных природных резервуаров. Во всем разнообразии седиментологических исследований современных рифов и карбонатных платформ можно выделить ряд направлений, которые, на наш взгляд, имеют несомненную ценность и возможность практического применения в работах с древними карбонатными платформами и рифами.

**Морфология карбонатных платформ.** Современные карбонатные платформы подразделяются на три морфологических группы: рампы, окаймленные шельфы, изолированные платформы. Как показал анализ большого количества материала по современным карбонатным платформам и рифам (в том числе космических снимков), доминирующей структурной формой карбонатных тел различного порядка является так называемая «ковшевидная структура» – *bucket structure* [1]. Она проявляется в форми-

ровании рифового кольца, которое обрамляет более глубокие внутренние зоны платформы. Кольцо формируется благодаря опережающему росту рифового обрамления платформы при повышении относительного уровня моря (ОУМ). Принцип *bucket structure* применим как для изолированных платформ, так и для протяженных окаймленных платформ. Кроме того, он проявляется и в развитии карбонатных тел более мелкого масштаба – одиночных рифов, пач-рифов, биогермных построек на карбонатных рамках. Внутренние зоны платформы могут представлять собой как относительно глубокие, так и крайне мелководные лагуны. По мере заполнения внутренней лагуны «пустой ковш» трансформируется в «заполненный ковш», т.к. после стабилизации ОУМ лагунная седиментация «догоняет» рифовое обрамление в пространстве аккомодации.

По мнению В.Шлагера [2] ковшевидная структура карбонатных платформ формируется в результате деятельности тропических бентосных карбонатных фабрик. Прослеживание границы смены бентосных фабрик в фаменском ярусе южной части Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (НГП) показало, что концепция ковшевидной структуры применима и для микробиальных карбонатных платформ (**рисунок 1**). Этот вывод важен для выбора направлений поисков новых нефтяных залежей в структурах облекания зоны забарьерной лагуны [3].



**Рисунок 1.** Палеогеологический профильный разрез через краевую зону Бобровско-покровской карбонатной платформы (южная бортовая зона Муханово-Ероховского прогиба)

Закономерности строения фациальных зон карбонатных платформ и рифов. Р. Harris и В. Vlaswinkel [4], используя космоснимки высокого разрешения, проанализиро-

вали фациальное строение большой выборки карбонатных платформ трех размерных групп (мелкие, средние, крупные) из тропических областей Индокитая, Тихого океана и Карибского бассейна. В результате анализа и статистической обработки информации были сделаны следующие выводы: 1) набор фаций не зависит от размера платформы и включает устойчивый ряд фациальных зон; 2) платформы имеют ассиметричное распределение фаций; 2) контуры фациальных зон отражает форму карбонатной платформы. Проведенные статистические исследования продемонстрировали, что существуют устойчивые связи между конфигурацией и структурой фациальных зон в пределах изолированных карбонатных платформ. Получены вероятностные характеристики для различных фациальных зон платформ малых, средних и крупных размеров, в частности, ширины фациальной зоны рифового шлейфа, ширины рифовой зоны и т.д. Полученные статистические характеристики имеют прогностическое значение для построения геологических моделей древних изолированных платформ.

*Латеральная аккреция платформ и рифов.* Это направление исследований важно для понимания первичной неоднородности карбонатных осадочных тел. Анизотропия проницаемости карбонатных коллекторов, которую необходимо учитывать при построении геолого-гидродинамических моделей, обычно связывается только с развитием систем трещиноватости, хотя ее природа может быть значительно сложнее. Нередко предпосылки анизотропии закладываются уже на этапе седиментации. В серии работ, проведенных на Большом барьерном рифе [5], для анализа аккреции были использованы материалы бурения, выполненные по серии профилей, перпендикулярно пересекающих край рифа в различных его частях. При выборе профилей учитывались такие важные факторы физического воздействия на осадочную рифовую систему, как преобладающие ветра и волновая гидродинамика. Возраст пород определялся радиоизотопным методом. Результаты исследований показали, что наиболее значительная латеральная аккреция рифа происходит в двух направлениях: первое – от наветренной стороны рифа в сторону рифовой лагуны, второе – от подветренного края в сторону моря. Более молодые осадки латерально надстраивают более старые, формируя систему проградирующих линз. Сходное латеральное наращивание, только более низкого порядка, установлено по материалам скважинной сейсморазведки в Нечинском верхнедевонском рифе на юге Тимано-Печорской НГП [6] (**рисунок 2**).

*Детализация строения фациальных зон.* Одним из примеров детализации фациальных зон рифов являются исследования коллектива австралийских седиментологов на Большом барьерном рифе [7]. Для изучения строения верхней части рифового склона, включающего такие специфические морфологические элементы, как шпоры и желоба (spur and grooves) был применен широкий комплекс данных – космические снимки высокого разрешения, батиметрия, результаты гидрологических наблюдений. Всего было проанализировано более 11 тыс. желобов. В результате исследований была выполнена классификация рельефа шпор и желобов. Каждый из выделенных четырех классов имеет специфические морфологические особенности и встречается в зоне рифового склона с определенной гидродинамикой. Например, класс 2 (шпоры и желоба,

подверженные волновому воздействию) характерен для верхней части передового рифового склона. Для него характерны крутые стенки желобов, грубообломочный материал на дне желобов, табулярные и инкрустирующие формы кораллов. Класс 4 (глубокие короткие желоба, защищенные от волнового воздействия), напротив, встречается преимущественно в тыловой части рифов. Формирование рельефа шпор и желобов происходит в результате сложного взаимодействия волновой энергии моря и жизнедеятельности рифостроителей. Выполненная классификация может быть использована для диагностики различных частей рифового склона в органогенных постройках различного возраста.

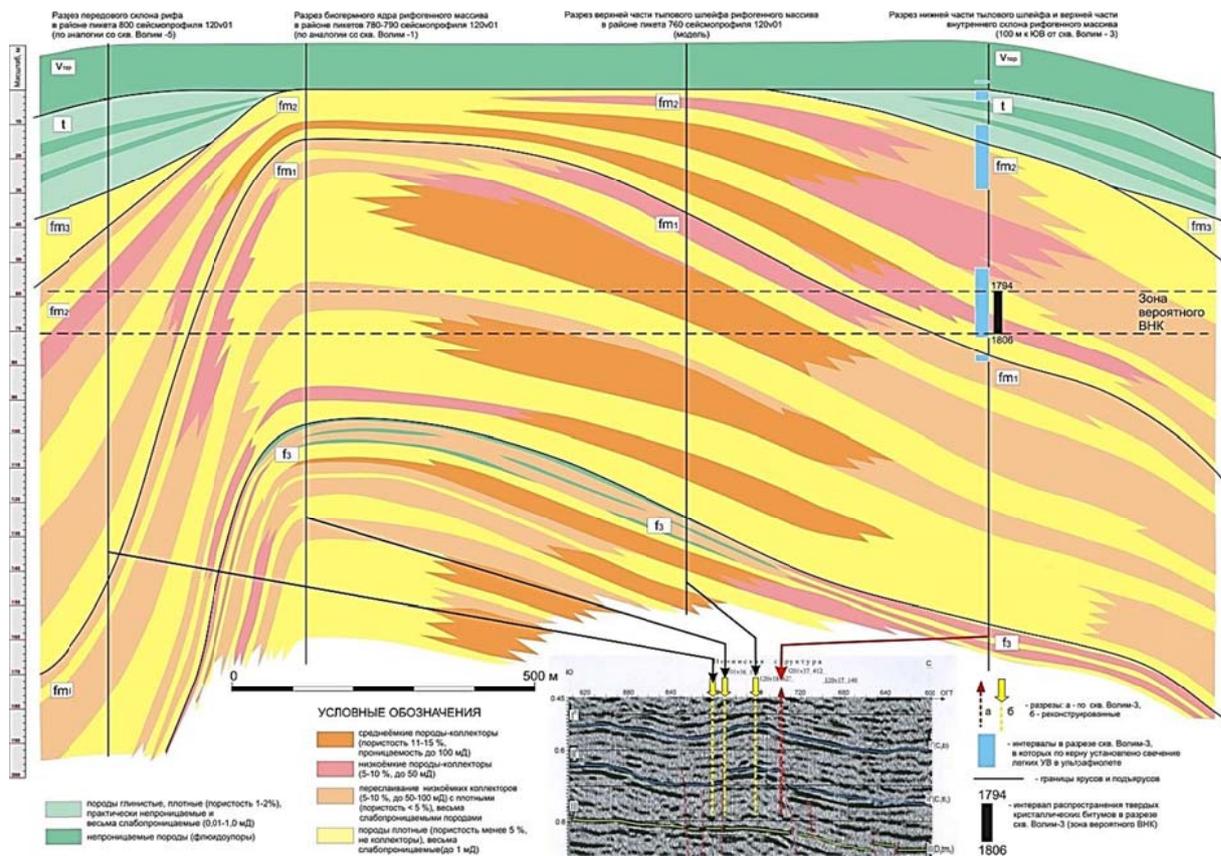


Рисунок 2. Латеральная проградация илейфовых осадков в верхнедевонском одиночном рифе, Тимано-Печерская НГП. Фильтрационно-емкостная модель [6]

**Особенности лагунной седиментации.** Это направление исследований включает серию интересных работ [8 и др.], посвященных специфике лагунной седиментации рифов и изолированных карбонатных платформ. В частности, анализируется такая особенность структуры лагунных осадков, как сетчатое распределение коралловых построек. Ранее для объяснения этой особенности привлекали данные по рельефу закарстованной поверхности, сформированной в плейстоценовый ледниковый этап низкого стояния ОУМ. Как показывают современные исследования, карстовый рельеф не играет главную роль в сложном распределении лагунных осадков. На первую роль выдвинута способность самоорганизации мелководных коралловых и водорослево-коралловых по-

строек. В процессе роста организмы-фильтраторы (какими являются все каркасообразующие метазойные организмы) стремятся занять максимально выгодное положение в пределах постройки, где бы они наиболее эффективно снабжались питательной взвесью и кислородом. Это краевая часть пач-рифов. Кроме этого, краевое положение минимизирует негативное воздействие продуктов жизнедеятельности самих фильтраторов. В глубокой части лагуны пач-риффы приобретают кольцевую форму. Между ними накапливаются зернистые осадки. По мере заполнения лагуны кольцевые пач-риффы латерально разрастаются и начинают смыкаться, на участках смыкания появляются и растут в обратном направлении новые линейно-полукольцевые постройки. В итоге, по мере заполнения лагуны происходит трансформация кольцевых пач-риффов в линейные извилистые малоамплитудные постройки, формирующие сложную сеть.

Кольцевое строение шельфовых биогермов по результатам сейсморазведки и бурения установлено так же в пермских отложениях Баренцевоморской плиты [9]. Знание закономерностей строения лагунных карбонатных отложений важно для построения адекватных геолого-гидродинамических моделей. В частности, в верхнедевонских отложениях Волго-Уральской НГП и нижнекембрийских Восточно-Сибирской НГП отложения забарьерной лагуны являются продуктивными на многих месторождениях.

**Исследование карбонатных микробиалитов и образующих их микробиальных сообществ.** Направление по исследованию современных карбонатобразующих микробиальных сообществ и микробиалитов особенно активно развивается в последние десятилетия. Понимание роли кальцимикробов в карбонатной седиментации пополняется всё новыми фактами, нередко совершенно неожиданными. Карбонатные осадки, которые ранее считались хомогенными, оказываются при детальном изучении биохомогенными, сформированными при активном участии микробиальной биоты.

Одно из активно развивающихся направлений микробиальной карбонатной седиментологии – изучение микробных матов, образующих в процессе своей жизнедеятельности строматолиты. Показательно, что современные строматолиты формируются не только в экстремальных условиях литорали, но и в сублиторальных обстановках. В настоящее время они детально изучены из мелководных шельфовых обстановок Багамской карбонатной платформы [10, 11 и др.]. В структуре сублиторальных строматолитов наблюдается чередование микритовых корочек и слойков зернистого материала. Коллективом седиментологов и микробиологов [там же] изучен процесс формирования строматолита микробиальным сообществом. Накопление и закрепление аллохтонного зернистого материала происходит на пионерной стадии микробиальной сукцессии, при интенсивном поступлении на поверхность строматолита разнообразных карбонатных и кремнистых зерен (скелеты фораминифер и диатомей). Зерна улавливаются и стабилизируются слизистыми внеклеточными полимерами (extracellular polymeric substances – EPS) фотосинтезирующих цианобактерий. При ослаблении поступления зернистого материала и образовании на поверхности строматолита сплошного слизистого чехла из EPS происходит переход к более зрелой стадии развития бактериального сообщества с многоуровневой структурой. В поверхностной части чехла происходит выделение мик-

рокристаллического арагонита. На климаксовой стадии развития бактериального сообщества происходит интенсивное преобразование цианобактериями-эндолитами аллохтонных карбонатных зерен, включенных в EPS, в результате чего они скрепляются между собой и включаются в скелет строматолита.

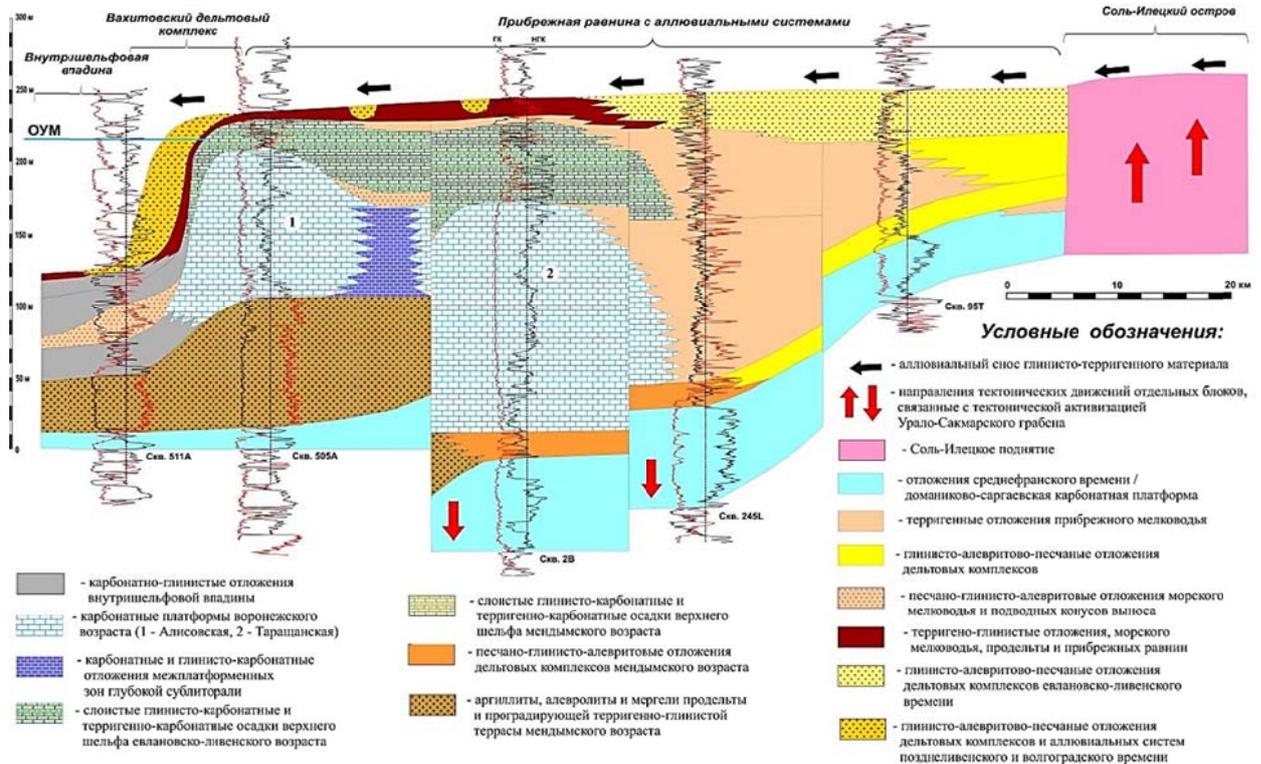
Понимание особенностей образования современных агглютинирующих строматолитов в условиях сублиторали имеет важное значение для экстраполяции этих данных на древние обстановки седиментации. В частности, в разрезах ВУНГП установлено, что столбчатые агглютинирующие строматолиты являлись важным структурным элементом гребневой зоны фаменских рифов [12]. Их формирование происходило в условиях сублиторали, при активной волновой гидродинамике. Аллохтонные зерна в структуре фаменских строматолитов так же являются важным компонентом их строения.

*Смешанные терригенно-карбонатные седиментационные системы.* Исследованиям таких специфичных «чистых» карбонатных систем, как Багамская карбонатная платформа или карбонатный шельф Персидского залива в первые десятилетия развития карбонатной седиментологии уделялось главное внимание. Как отдельное направление современных исследований можно выделить седиментологию смешанных терригенно-карбонатных систем. Для обширного района островов Юго-Восточной Азии характерны именно смешанные осадочные системы. Обилие ливневых тропических дождей обеспечивает огромные объемы глинисто-терригенного материала, поступающие в прилегающие к островам шельфовые обстановки. На карбонатакопление влияет целый комплекс факторов – вынос кластики, опреснение, поступление питательных веществ, направление течений, активная тектоника [13]. В зависимости от соотношения этих факторов, прилегающие карбонатные платформы могут иметь рифовое обрамление (т.е. представлять окаймленный тип платформы), а могут быть представлены в виде смешанного рампа (при интенсивном привносе глинистого материала и кластики). Таким образом, в одной и той же географической области наблюдается формирование карбонатных платформ различной морфологии. Кроме этого, для смешанных терригенно-карбонатных осадочных систем характерны сложные процессы диагенеза.

Изучение ископаемых смешанных терригенно-карбонатных комплексов отличается высокой сложностью и требует слаженной совместной работы седиментологов, сейсмиков, геофизиков-каротажников, петрофизиков. Одним из примеров такого сложного объекта в нефтегазовой геологии является колганская толща верхнего девона Оренбургской области, обрамляющая Соль-Илецкую островную палеосушу. Неравномерный вынос глинистого материала в прилегающий бассейн привел к формированию одиночных рифов с различным стратиграфическим интервалом развития [14] и мелких изолированных карбонатных платформ. Секвенции колганской толщи имеют смешанное терригенно-карбонатное строение [15]: на этапах низкого стояния ОУМ накапливались глинисто-терригенные пачки, на этапах трансгрессии и высокого стояния ОУМ – карбонатные (рисунок 3).

Подводя итог краткому анализу основных направлений седиментологических исследований современных карбонатных платформ и рифов, можно отметить, что резуль-

таты таких работ должны применяться при изучении древних продуктивных карбонатных осадочных комплексов. В процессе эволюции биосферы и седиментосферы Земли происходит смена ведущих групп пороодообразующих организмов. Однако карбонатные бентосные системы функционируют по своим устойчивым законам.



**Рисунок 3.** Палеофациальный профиль через терригенно-карбонатный комплекс колганской толщи Оренбургской области

## ЛИТЕРАТУРА

- Schlager W., Purkis S. Bucket structure in carbonate accumulations of the Maldivic, Chagos and Laccadive archipelagos // International Journal of Earth Sciences. – 2013. – Vol. 102. – Is. 8. – P. 2225-2238.
- Schlager W. Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy. – Tulsa, 2005 (Concepts Sedimentology and Paleontology. № 8). – 200 p.
- Шакиров В.А., Никитин Ю.И., Вилесов А.П., Дерюшев Д.Е., Миропольцев К.Ф. Новое направление поисков залежей нефти на Бобровско-Покровском валу // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 12. – С. 90-94.
- Harris P.M., Vlaswinkel B. Modern isolated carbonate platforms: templates for quantifying facies attributes of hydrocarbon reservoirs // Controls on Carbonate Platform and Reef Development. - SEPM Society for Sedimentary Geology. - Special Publication No. 89. - P. 323–341.
- Dechnik B., Webster J.M., Nothdurft L. et al. Influence of hydrodynamic energy on Holocene reef flat accretion, Great Barrier Reef // Quaternary Research. – 2016. – Vol. 85. – Is. 1. – P. 44–53.
- Вилесов А.П., Пятунина Е.В., Чудинов Ю.В. Опыт комплексирования современных геолого-геофизических методов исследования верхнедевонских рифов при поисковом бурении в северных районах Пермского Края // Стратиграфия и региональная геология

- востока Русской платформы и Западного Урала. – Пермь: Перм. гос. ун-т, 2009. – С. 72-82.
7. Duce S., Vila-Concejo A., Hamylton S.M., Webster J.M., Bruce E., Beaman R.J. A morphometric assessment and classification of coral reef spur and groove morphology // *Geomorphology*. – 2016. – Vol. 265. – P. 68-83.
  8. Schlager W., Purkis S. Reticulate reef patterns – antecedent karst versus self-organization // *Sedimentology*. – 2015. – Vol. 62. – Is. 2. – P. 501-515.
  9. Purkis S., Casini G., Hunt D., Colpaert A. Morphometric patterns in Modern carbonate platforms can be applied to the ancient rock record: Similarities between Modern Alacranes Reef and Upper Palaeozoic platforms of the Barents Sea // *Sedimentary Geology*. – 2015. – Vol. 321. P. 49-69.
  10. Reid R. P., Visscher P. T., Decho A.W. et al. The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites // *Nature*. – 2000. – Vol. 406. – P. 989–992.
  11. Reid R.P., Foster J.S., Radtke G., Golubic S. Modern Marine Stromatolites of Little Darby Island, Exuma Archipelago, Bahamas: Environmental Setting, Accretion Mechanisms and Role of Euendoliths // *Advances in Stromatolite Geobiology*. Berlin: Springer, 2011. (Lecture Notes in Earth Sciences. - № 131). P. 77-89.
  12. Вилесов А.П., Бояршинова М.Г., Винокурова Е.Е. Значение строматолитов в формировании каркаса фаменских рифов Волго-Уральской нефтегазоносной провинции // *Геология рифов: Мат-лы Всеросс. литологического совещания*. – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2015. – С. 27-29.
  13. Wilson M.E.J. Equatorial carbonates: an earth systems approach // *Sedimentology*. – 2012. – Vol. 59. – Is. 1. – P. 1–31.
  14. Вилесов А.П., Немирович Т.Г., Лашманова А.А. Франские одиночные рифы Оренбургской области и перспективы их нефтегазоносности // *Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: Материалы VII Всероссийского литологического совещания*. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. – Т.1. – С. 158-163.
  15. Никитин Ю.И., Вилесов А.П., Рихтер О.В., Махмудова Р.Х. Комплексирование 3D сейсморазведки и седиментологического анализа керна при изучении нефтеносных речных дельт верхнего девона на юге Оренбургской области // *Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть»*. – 2014. – Вып. 37 (№4). – С. 44-50.



**Вилесов Александр Петрович.** Кандидат геолого-минералогических наук, доцент, эксперт по седиментологии центра исследований керна ООО «Тюменский нефтяной научный центр», г. Тюмень.



**Вахрушева Ирина Александровна.** Кандидат геолого-минералогических наук, директор ООО «Тюменский нефтяной научный центр», г. Тюмень.