РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ, ЛИТОЛОГИЯ, ГЕОТЕКТОНИКА

К ВОПРОСУ О ТИПАХ ТЕРРИГЕННЫХ МЕЛКОВОДНО-МОРСКИХ ОСАДОЧНЫХ СИСТЕМ

© 2019 г. О. Ю. Мельничук

В статье рассматриваются главные типы мелководно-морских терригенных систем – дельты и мелководно-морские равнины, приводятся их основные характеристики, анализируются существующие подходы и классификации. Приведен пример применения методики, разработанной В.М. Росси с соавторами, для реконструкции условий формирования одной из пачек толщи IV кодинской свиты.

Различные терригенные системы в море формируются в результате привноса обломочного материала речными, гляциальными, пирокластическими, эоловыми агентами (как самостоятельно, так и в комбинации) с последующим его перераспределением вдольбереговыми течениями, приливно-отливными процессами, волнением (в том числе штормовыми внутренними волнами), гравитационными и контурными потоками (см., например, [Лисицын, 1988]). При этом наиболее важным агентом, без сомнения, являются реки.

Образовавшиеся в итоге системы разнообразны ввиду большого количества моментов, влияющих на их формирование и развитие. Наряду с перечисленными факторами это колебания в количестве и размерности привносимого терригенного материала, тектонический режим, изменение уровня моря, строение приемного бассейна, близость и тип источника (-ов) сноса, климат. В результате выделяются две основные разновидности морских субаквальных систем – мелководно-морские и глубоководные. Первые существуют в пределах литоральной (проксимальные обстановки) и сублиторальной зон, вторые – в батиальной и более глубоких зонах. Строение мелководно-морских терригенных систем (ММТС) связано в том числе с особенностями расположенных рядом континентальных обстановок, в свою очередь они определенным образом влияют на специфику строения их глубоководных продолжений [Orton, Reading, 1993; Reading, Collinson, 1996; Richards et al., 1998].

Здесь мы более подробно остановимся на ММТС. Несмотря на зависимость процесса их формирования от множества условий, большинство существующих классификаций имеет вид треугольников. Они сфокусированы на взаимодействии трех процессов, соотношение которых выступает в роли критерия при разделении систем и их элементов на разновидности, – это речная активность, приливно-отливные течения и волнение (в том числе штормовое). Таким образом, с учетом перечисленных особенностей, ММТС в общих чертах можно разделить на два типа – дельты рек и мелководноморские равнины (ММР). Под ММР мы понимаем систему, на которую оказывают влияние в основном приливно-отливные и волновые процессы, а выделение различных зон в ней происходит в зависимости от уровня их взаимодействия. Подобное название представляется нам логичным ввиду достаточно пологого рельефа дна в ее пределах.

Одной из первых классификаций ММТС является классификация дельт, предложенная В.Е. Галоуэем в 1975 г. [Galloway, 1975], согласно которой их следует подразделять на таковые с преобладанием речных, волновых или приливных сил в области их распространения, то есть на дельты речного, волнового и приливного влияния (соответственно river-, wave- и tide-dominated deltas). Данная классификация легла в основу ряда других, например [Boyd et al., 1992; Orton, Reading, 1993], и определила одну характерную для них черту – все они являются классификациями прибрежно-морской части ММТС. Р. Бойд с соавторами надстраивают классификацию речных дельт, расширяя и дополняя ее системами, в которых решающую роль играют волновые либо приливно-отливные процессы, охватывая таким способом практически все прибрежно-морские системы. На сегодняшний день существуют две модификации этой классификации: 1) в редакции Х.Г. Ридинга и Дж.Д. Коллинсона [Reading, Collinson, 1996] (рис. 1a); 2) с дополнениями для прибрежных систем [Yang et al., 2005] (рис. 16). Х.Г. Ридингом и Дж.Д. Коллинсоном отмечен ряд ограничений, которые применимы и к оригиналу, и к классификации 2005 г. Во-первых, границы между выделенными подразделениями в них могут быть не только постепенными, но и достаточно резкими или, наоборот, размытыми. Вовторых, классификация более актуальна для систем небольших размеров, где роль привноса материала рекой не столь велика, как в крупных дельтах. В-третьих, она не применима для грубозернистых систем со слаборасчлененным рельефом, особенно для развитых в бассейнах с низкой гидродинамикой среды, поскольку в подобных системах очень редко формируются барьерные острова и ла-



Рис. 1. Классификации мелководных терригенных систем (а–в) и некоторых их элементов (г), основанные на взаимодействии речных и бассейновых процессов.

a, б – модификации классификации Бойда – Далримпла – Заитлина [Boyd et al., 1992]: a – [Reading, Collinson, 1996], б – [Yang et al., 2005]; в – классификация [Vakarelov, Ainsworth, 2013], см. пояснения сокращений в тексте; г – классификация элементов (обстановок) мелководно-морских систем по [Vakarelov, Ainsworth, 2013]. Р-дельты – дельты речного влияния, П-дельты – приливного, В-дельты – волнового влияния. То же в отношении эстуариев и побережий. П/о – приливно-отливный.

гуны, а также крупные приливно-отливные отмели. Для грубозернистых дельт и побережий удобнее использовать классификацию [Postma, 1990].

Классификация [Orton, Reading, 1993] вполне обоснованно добавляет четвертый критерий – преобладающую размерность компоненты, поступающей в бассейн, разделяя ММТС на гравийные, гравийно-песчаные, мелкопесчаные и алеврито-глинистые. Указанные типы имеют различные по размеру и облику фаций обстановки седиментации. Например, в ряду от гравийных к алеврито-глинистым системам увеличивается площадь и уменьшаются наклон дельтовой равнины (та часть фронта дельты, которая подвержена влиянию приливов и отливов), а также площадь ее субаэральной части, а обстановки седиментации становятся разнообразнее.

В последнее десятилетие вновь произошло переосмысление идеи, предложенной В.Е. Галоуэем. В первую очередь это связано с работами Р.Б. Айнсворта с коллегами [Ainsworth et al., 2011], Б.К. Вакарелова и Р.Б. Айнсворта [Vakarelov, Ainsworth, 2013], использующими первоначальную треугольную диаграмму для полуколичественной классификации

не только ММТС в целом (рис. 1в), но и отдельных их разрезов и дополнения характеристик элементов (рис. 1г). При определении системы предлагается характеризовать не только преобладающий тип сил, но и второстепенные и даже те, которым система была подвержена незначительно. Например, тип системы Впр = приливно-волнового влияния, затронутая речными течениями (wave-dominated tidal-influenced *river-affected*), $\mathbf{P}\mathbf{B} = \mathbf{B}$ олно-речного¹ влияния (*riv*er-dominated wave-influenced) и т.д. Вершины треугольной диаграммы соответствуют дельте речного влияния (Р), береговой равнине (В) и приливно-отливной отмели (П). Для систем, у которых указаны речные течения в качестве основного или второстепенного процесса, характерно активное продвижение аккумулятивных тел (баров, конусов) в сторону моря; приливно-отливные силы – формирование морских врезов вглубь побережья/континента; волнения – наличие образований, возникающих за счет переработки материала волнами в прибереговой зоне (подробнее см. на рис. 2). Рассматриваемый полуколичественный подход является достаточно гибким по сравнению с предыдущими, так как позволяет классифицировать в том числе дельты смешанного типа², которые, по всей видимости, были достаточно широко распространены в осадочной истории Земли [Rossi, Steel, 2016].

Для современных ММТС типизация таких систем или их отдельных элементов не составляет большого труда, но в отношении ископаемых аналогов все обстоит несколько иначе - оценка зависит от степени обнаженности и может изменяться в зависимости от количества информации, находящейся в распоряжении исследователя. Для отдельного разреза положение фигуративной точки на диаграмме (см. рис. 1в) рассчитывается исходя из суммарной мощности интервала с текстурами, сгенерированными определенным процессом, относительно суммарной мощности изучаемого разреза или его части. Подобные расчеты выполняются в соответствии с предположением, согласно которому процесс, преобладающий во время седиментации, будет "производить" наибольшее количество соответствующих текстур, таким образом, они имеют наибольший шанс сохраниться в разрезе [Ainsworth et al., 2011]. Все обозначенные манипуляции следует осуществлять в пределах генетически связанных друг с другом отложений, учитывая весь геологический контекст. В дополнение, при подобных расчетах возникают трудности с подсчетом вклада текстур, отражающих взаимодействие нескольких процессов (например,





1, 2: речные каналы: 1 – активные, 2 – отмершие; 3–5 – приливно-отливные обстановки: 3 – каналы, 4 – отмели, 5 – бары; 6 – песчаные косы; 7 – батиметрические изогипсы. Дельты рек: Р – речного, Рв – волнового, Рп – приливного влияния; эстуарии: Пр – приливного, Пвр – волнового влияния; П – приливно-отливная равнина, Пв – то же, открытого побережья; В – береговая равнина. Выполнено с использованием [Vakarelov, Ainsworth, 2013].

¹ В обоих случаях мы намеренно поставили преобладающий процесс на второе место по аналогии с преобладающей размерностью зерен в песчаниках.

² На разные субаквальные элементы таких дельт в различной степени воздействуют бассейновые и внебассейновые процессы.

S-образная косая слоистость, "драпированная" глинистыми слойками (*mud drapes*)) либо имеющих неоднозначную природу (пример – субгоризонтальная слоистость).

Возможное решение этой проблемы предложено В.М. Росси с соавторами [Rossi et al., 2017]. Они предполагают несколько иной способ подсчета процентного соотношения, учитывающий вероятную возможность связи каждой текстуры с определенным процессом. Для наиболее распространенных текстур указанными авторами была рассмотрена совокупность литературных источников по различным тематикам, включая исследования ископаемых и современных мелководно-морских обстановок, а также экспериментальные работы. В результате каждой исследованной текстуре была присвоена некоторая вероятность приуроченности к тому или иному процессу. Например, в отношении градационной сортировки материала и массивного облика песчаных отложений вероятность (V) того, что они сформировались в результате активности речных процессов (V_p), составляет 78%, волновых (V_в) – 18, приливно-отливных (V_п) – 4%. То есть авторы 18 работ из 25 посчитали, что эти текстуры связаны с речными течениями, 4 – с волнениями, 1 – с приливно-отливной активностью. Для комплексных текстур (см. предыдущий абзац) высчитывалось среднее арифметическое. Затем для ряда примеров В.М. Росси с соавторами были построены вероятностные графики и произведены подсчеты, схожие с таковыми [Ainsworth et al., 2011]. В их числе были ММТС четвертичного, третичного, мезозойского и позднепалеозойского возраста.

Пример подобного подхода для одной из пачек (рис. 3а) толщи IV верхнедевонской (верхнефранской) кодинской свиты, обнажающейся на восточном склоне Среднего Урала (см. подробнее [Мельничук, 2018]), приведен на рис. 3б. Применение метода, разработанного [Ainsworth et al., 2011] и дополненного [Rossi et al., 2017], позволяет добавить ранее выделенным [Мельничук, 2018] в разрезе пачки трем слоевым ассоциациям (СА) дополнительные характеристики. При этом нижняя (I) и верхняя (III) СА, сформировавшиеся в условиях проксимальных и медиальных обстановок фронта дельты, имеют примерно одинаковые строение и соотношение литотипов, следовательно, их фигуративные точки занимают приблизительно одно и то же положение на диаграмме ($\Sigma V_{\rm B} = 22\%$, $\Sigma V_{n} = 33\%$, $\Sigma V_{p} = 55\%$) и в целом позволяют дать ассоциациям индекс Рпв. В их разрезе преобладают мелкозернистые песчаники с горизонтальной слоистостью ($V_{\rm B} = 28\%$, $V_{\rm m} = 30\%$, $V_{\rm p} = 42\%$) и интервалы, сложенные горизонтально слоистыми глинистыми породами со слойками и прослоями мелкои тонкопесчаного материала ($V_{\text{в}} = 10\%$, $V_{\pi} = 40\%$, V_p = 50%). Реже встречаются песчаные отложения с косой однонаправленной слоистостью ($V_{\rm B} = 19\%$, $V_{\rm n} = 48\%$, $V_{\rm p} = 33\%$).

Указанные ассоциации разделены интервалом (II), сформировавшимся в обстановках проксимальной части ММР при активном воздействии волнений, в том числе, вероятно, штормовых [Мельничук, 2018]. В его разрезе наряду с горизонтальнослоистыми разностями развиты песчаники со слабоволнистой слоистостью (V_в = 87%, V_п = 10%, V_p = 3%), а также слои, обогащенные раковинным детритом (в основном пелеципод). Последние находятся в тесном парагенезе с первыми, и, по всей видимости, их вероятностная приуроченность имеет такое же соотношение. Результат подсчета общего соотношения ($\Sigma V_{в} = 42\%$, $\Sigma V_{п} = 16\%$, $\Sigma V_{p} = 42\%$) позволяет присвоить СА II индекс **Рв***n* или **Вр***n*.

Таким образом, применение данного метода дает возможность проследить траекторию изменения характера ММТС в разрезе (см. рис. 3в). Она имеет следующий вид: **Рп** $_{\mathcal{B}} \rightarrow (\mathbf{P}\mathbf{B}n/\mathbf{B}\mathbf{p}n) \rightarrow \mathbf{P}\mathbf{n}\mathbf{e}$ и, вероятно, отражает латеральную миграцию дельтовых каналов.

Необходимо отметить, что работа [Rossi et al., 2017] ценна еще и тем, что в ней приведен возможный набор текстур для различных обстановок – фронтальной части дельты, продельты, залива, берегового вала, эстуария, приливно-отливной отмели, пляжа и приливной зоны, верхней и нижней частей морской равнины. Указанный подход, однако, не лишен недостатков, главный из которых связан с тем, что, во-первых, неизвестно, является ли выборка публикаций достаточно представительной; во-вторых, не ясно, как изменится оценка процентного соотношения для каждого из типов текстур с рассмотрением большего количества публикаций,; в-третьих, возникает неопределенность в отношении интервалов, сложенных глинистыми образованиями. Попытка разрешения последней проблемы приведена в работе [Peng et al., 2018] при рассмотрении глинистых отложений, сформировавшихся как при осаждении из толщи воды (hemipelagic mud), так и при переносе из зоны смешения морских и пресных вод и дальнейшей седиментации (fluid mud).

На наш взгляд, наиболее полным является определение субаквальной терригенной системы, при котором используются как преобладающая размерность поступающей компоненты, так и соотношение процессов, влияющих на ее (системы) формирование. Наилучшим образом для диагностики подходят фронтальная часть дельты [Rossi, 2016] и ее латеральные аналоги – проксимальные и переходные обстановки MMP, так как дистальные обстановки несут в себе меньше информации, необходимой для классификации. Тем не менее последние вполне возможно отличить друг от друга. Например, глинистые продельтовые

77



Рис. 3. Седиментологическая колона пачки 6 толщи IV кодинской свиты (а) и график возможной приуроченности текстур пачки к определенному процессу (б), построенный с использованием методики [Rossi et al., 2017], а также положение фигуративных точек выделенных слоевых ассоциаций (I–III) на треугольной диаграмме P–B–П [Vakarelov, Ainsworth, 2013] (в).

Пачки I и III отвечают проксимальной/медиальной части фронта дельты, II – латеральным аналогам в пределах ММР [Мельничук, 2018].

ЕЖЕГОДНИК-2018, Тр. ИГГ УрО РАН, вып. 166, 2019

обстановки дельты речного влияния, как правило, характеризуются низким индексом биотурбации, наличием трещин синерезиса и слоистости, нарушенной оползанием осадка. В то же время в отложениях продельты, в значительной степени подверженной влиянию штормов, широко развита линзовидная слоистость, в том числе с разделенными линзочками, бугорчатая слоистость, индекс биотурбации выше, чем в предыдущем примере, а трещины синерезиса встречаются реже [MacEachern et al., 2005]. Дистальные обстановки MMP, вероятно, будут представлять интенсивно биотурбированные отложения.

Работа выполнена в рамках темы № 0393-2018-0028(18-5-5-11) государственного задания ИГГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Лисицын А.П.* Лавинная седиментация и перерывы осадконакопления в морях и океанах. М.: Наука, 1988. 309 с.
- Мельничук О.Ю. Позднедевонская дельтовая система на востоке Среднего Урала // Вестн. Перм. ун-та. Сер.: Геология. 2018. Т. 17, № 1. С. 18–32.
- Ainsworth R.B., Vakarelov B.K., Nanson R.A. Dynamic spatial and temporal prediction of changes in depositional processes on clastic shorelines: Toward improved subsurface uncertainty reduction and management // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull. 2011. V. 95, no. 2. P. 267–297.
- Boyd R., Dalrymple R., Zaitlin B.A. Classification of clastic coastal depositional environments // Sed. Geol. 1992. V. 80. P. 139–150.
- Galloway W.E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems // Deltas: Models for explorations / ed. by M.L. Broussard. Houston, Texas: Houston Geological Society, 1975. P. 87–98.

- Postma G. Depositional architecture and facies of river and fan deltas: a synthesis // Coarse-grained deltas / ed. by A. Colella, D.B. Prior: Spec Publ. int. Ass. Sediment. 10. 1990. P. 13–27.
- Reading H.G., Collinson J.D. Clastic coasts // Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy / ed. by H.G. Reading. 3rd ed. Oxford: Blackwell Publishing, 1996. P. 154–231.
- Richards M., Bowman M., Reading H. Submarine-fan systems I: characterization and stratigraphic prediction // Mar. Pet. Geol. 1998. V. 15. P. 689–717.
- MacEachern J., Bann K., Bhattacharya J.P., Howell C.D. Ichnology of deltas: organisms responses to the dynamic interplay of rivers, waves, storms and tides // River Deltas – Concepts, Models, and Examples / eds L. Giosan, J.P. Bhattacharya: SEPM, Spec. Publ. 83. 2005. P. 49–85.
- Orton G.J., Reading H.G. Variability of deltaic processes in terms of sedimentary supply, with particular emphasis on grain size // Sedimentology. 1993. V. 40. P. 475–512.
- Peng Y., Steel R.J, Rossi V.M., Olariu C. Mixed-energy process interactions read from a compound-clinoform delta (paleo-Orinoco delta, Trinidad): preservation of river and tide signals by mud-induced wave damping // J. Sed. Res. 2018. V. 88. P. 75–90.
- Rossi V.M., Perillo M.M., Steel R.J., Olariu C. Quantifying mixed-process variability in shallow-marine depositional systems: What are sedimentary structures really telling us? // J. Sed. Res. 2017. V. 87. P. 1060–1074.
- Rossi V.M., Steel R.J. The role of tidal, wave and river currents in the evolution of mixed-energy deltas: Example from the Lajas Formation (Argentina) // Sedimentology. 2016. V. 63. P. 824–864.
- Vakarelov B.K., Ainsworth R.B. A hierarchical approach to architectural classification in marginal-marine systems: Bridging the gap between sedimentology and sequence stratigraphy // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull. 2013. V. 97, no. 7. P. 1121–1161.
- Yang B.C., Dalrymple R.W., Chun S.S. Sedimentation on a wave-dominated, open-coast tidal flat, south-western Korea: summer tidal flat – winter shoreface // Sedimentology. 2005. V. 52. P. 235–252.