

УДК 551

СЕДИМЕНТОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СТРАТИГРАФИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА СЕРИИ ТОНТО (БОЛЬШОЙ КАНЬОН р. КОЛОРАДО)

© 2004 г. Ги Берто (Guy Berthault)

28 boulevard Thiers, 78250 Meulan, Франция

Поступила в редакцию 27.10.2003 г.

В результате седиментологического анализа и реконструкции условий образования осадочных пород серии Тонто Большого Каньона реки Колорадо показано, что отложения, относящиеся к разным стратиграфическим подразделениям, образовывались одновременно в разных литодинамических зонах кембрийского палеобассейна. Таким образом, в данном случае стратиграфическое подразделение осадочных слоев, основанное на принципах Стено, не соответствует особенностям реального осадочного процесса.

В предыдущей статье [Берто, 2002] на основе экспериментов по отложению разнозернистых песков в условиях потока было продемонстрировано, что три принципа - суперпозиции, непрерывности и первоначального горизонтального положения слоев, положенные Николасом Стено в основу современной стратиграфии, должны быть пересмотрены и дополнены.

На основании стратифицированности осадочных толщ Н. Стено предположил, что осадочные слои отлагались последовательно в течение времени, вследствие чего и была создана стратиграфическая шкала, ставшая основой относительной геохронологии. Поскольку непосредственное прослеживание одних и тех же слоев на больших расстояниях невозможно, была предложена стратиграфическая единица более высокого порядка, называемая "ярус" (stage). Согласно классическому определению, ярус - стратиграфическая единица, определяемая эталонным разрезом (стратотипом) и характеризующаяся группой палеонтологических, литологических или структурных критериев, имеющих универсальное значение [Aubouin, 1967]. Как возрастное подразделение он соответствует "веку": так, например, черные мергели из района Оксфорда (Англия) являются стратотипом оксфордского яруса, который соответствует оксфордскому веку по геохронологической шкале. Теоретически свиты, имеющие одинаковый стратотип, имеют один и тот же возраст по всей планете, что позволяет коррелировать их между собой.

Эта картина осложняется сменой литологических фаций по простирацию слоев, поэтому определяющим для корреляции отложений в пределах

больших географических областей является индекс ископаемых форм, основанный на принципе палеонтологической идентичности. Он основан на положении, что палеонтологически идентичные слои имеют одинаковый возраст [Aubouin, 1967].

Большинство стратотипов располагается в англо-парижском бассейне, где были заложены основы глобальной стратиграфической шкалы. Для этого региона очевидно, что слои, относящиеся к соответствующим стратотипам, сменяют друг друга в вертикальной последовательности в соответствии с принципом суперпозиции. Например, оксфордский ярус предшествует киммерийскому.

В осадочных бассейнах геологи выделяют толщи, соответствующие трансгрессиям и регрессиям, разделенные несогласиями, выражающимися в смене ориентации наслоения и в наличии поверхности эрозии. Поскольку ярусы и отделы выделяются в основном по палеонтологическим характеристикам отложений [Геологический словарь, 1960], стратиграфические единицы не учитывают литологический состав и несогласия в последовательности осадочных слоев. Так как ярус (и соответствующее подразделение возрастной шкалы - век) являются первичными элементами для создания стратиграфических подразделений более высокого ранга - отдел (эпоха), система (период), эратема (эра), эти единицы также не принимают во внимание седиментологические процессы.

Это краткое изложение основ стратиграфической шкалы необходимо для последующего обоснования необходимости учета седиментологичес-

ких данных при интерпретации стратиграфической последовательности.

ОТЛОЖЕНИЯ БОЛЬШОГО КАНЬОНА И ИХ СТРАТИГРАФИЯ

Такая интерпретация (основанная, в том числе, и на результатах наших экспериментов [Julien и др., 1993]) может быть проиллюстрирована на примере толщи осадочных пород Большого Каньона р. Колорадо и, в частности, серии Тонто (Tonto Group), относящейся к кембрийской системе (рис. 1) в соответствии с описанием, приводимым в работе [Grand Canyon, 1989].

Лежащий в основании осадочной толщи докембрийский фундамент состоит из сильнометаморфизованных и тектонически смятых хлорит-слюдистых кристаллических сланцев с подчиненным количеством амфиболитов, гнейсов и карбонатно-силикатных пород серии Вишну. Розовые полевошпатовые граниты Зороастр пересекают породы Вишну серией даек и пегматитовых жил, достигающих мощности в несколько десятков метров. Породы Вишну и Зороастр относятся к нижнему протерозою. В тектонических депрессиях эти породы иногда бывают перекрыты вулканогенно-осадочной толщей верхнепротерозойской суперсерии Гранд Каньон (Grand Canyon Supergroup). На большей части территорий серия Тонто непосредственно залегает на породах Вишну и Зороастр [Grand Canyon, 1989].

В составе серии Тонто выделяются три свиты: песчаники Тапеатс, сланцы Брайт Анжел и известняки Муав.

Песчаники Тапеатс, залегающие в основании протерозойского осадочного чехла, имеют широкое территориальное распространение. Свита состоит преимущественно из средне-грубозернистого кварцевого песчаника, мощность которого достигает 40-100 м. В основании свиты часто преобладают галька и валуны. Средняя часть толщи состоит из грубозернистого песчаника с кривоугольной слоистостью потокового типа. Падение слоёв на запад и юго-запад указывает на преобладающее направление водного потока. В верхней части свиты наблюдается горизонтальная слоистость со знаками ряби, отмечается уменьшение размера обломочного материала до мелкого песка и алеврита, которые постепенно переходят в вышележащие сланцы свиты Брайт Анжел.

Сланцы Брайт Анжел. Зеленовато-серые сланцы с примесью алеврита и песка достигают мощности 100-120 м. Характерным для этой толщи является наличие прослоев песчаных доломитов, алевритистых известняков, зеленых глауконитсодержащих песчаников и темно-коричневых ожелезненных прослоев. Сланцы Брайт Анжел представляют собой более глубоковод-

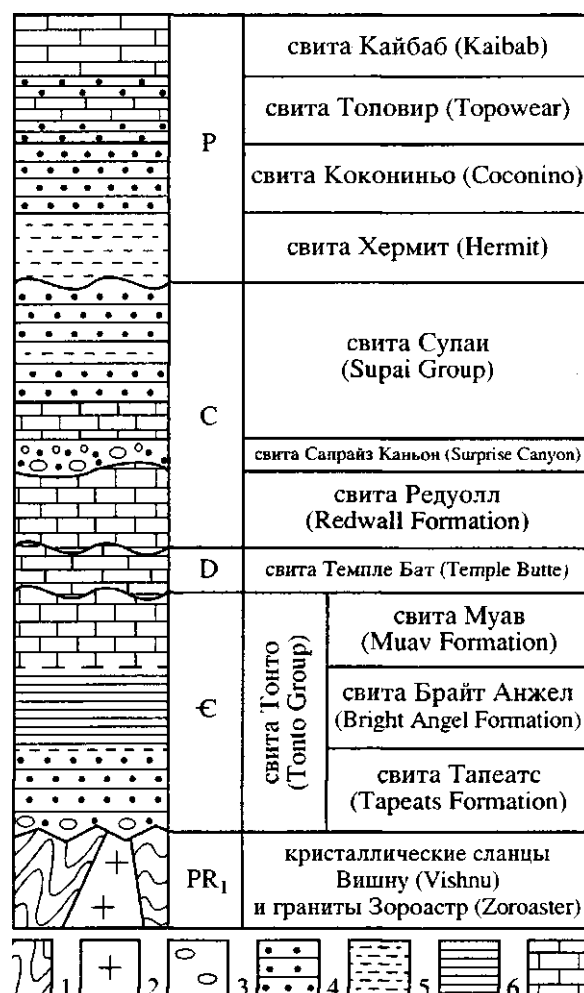


Рис. 1. Стратиграфическая колонка отложений Большого каньона.

1 - кристаллические сланцы; 2 - граниты; 3 - валуно-галечный конгломерат; 4 - песчаники; 5 - алевролиты; 6 - глинистые сланцы; 7 - известняки.

ные отложения, образованные в условиях более слабой гидродинамической активности, чем песчаники Тапеатс. Толща имеет градационный переход к вышележащим известнякам свиты Муав.

Известняк Муав. Желтовато-коричневый известняк с примесью песка и алеврита мощностью от 100 до 300 м. Непосредственно выше контакта со сланцами Брайт Анжел присутствуют небольшие прослои глины. Мощность известняков увеличивается, а содержание песчано-алевритовой примеси уменьшается в западном направлении.

Поскольку три вышеописанные свиты не разделяются стратиграфическими несогласиями и имеют между собой постепенные переходы, они объединены в одну серию Тонто, которая перекрыта мощной толщей песчаников, алевролитов, сланцев и карбонатных пород девонской, каменноугольной и пермской систем.

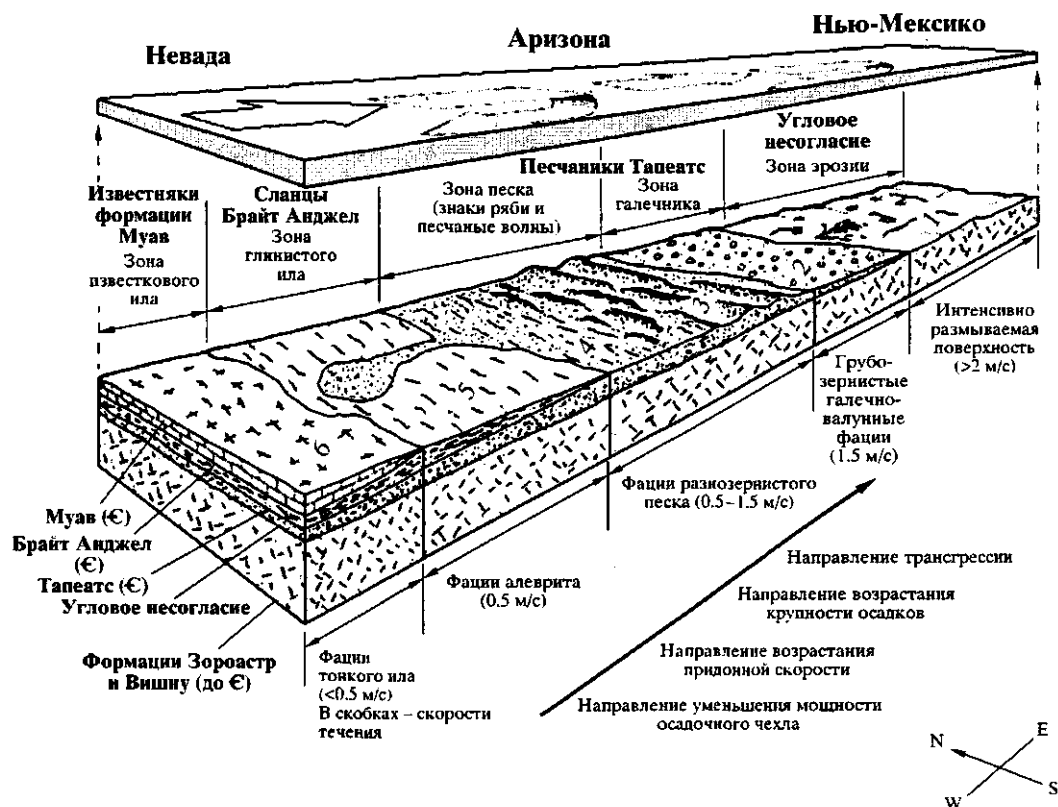


Рис. 2. Модель формирования осадочных отложений кембрийской трансгрессии на территории штатов Невада, Аризона и Нью-Мексико.

Зоны: 1 - верхняя часть континентального склона; 2 - смежная мелководная область; 3 - подводные песчаные дюны; 4 - пески с параллельной слоистостью и знаками ряби; 5 - алеврито-глинистые отложения с градиционной слоистостью; 6 - известковый ил самой глубоководной зоны.

СЕДИМЕНТОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СЕРИИ ТОНТО

Осадочные породы серии Тонто были образованы в обстановке трансгрессии в условиях интенсивной эрозии подстилающих пород. Эта эрозия сильнее проявилась в западной и центральной частях Большого Каньона, где песчаники Тапеатс залегают прямо на сланцах и гранитах Вишну и Зороастр. Наименьшая глубина эрозии подстилающих пород отмечается в западной части, где песчаники Тапеатс залегают с угловым несогласием на породах суперсерии Гранд Каньон. Модель формирования отложений серии Тонто показана на рис. 2.

Для понимания того, каким образом рассмотренные выше свиты (Тапеатс, Брайт Анжел и Муав) соотносятся между собой в вертикальном и латеральном направлениях, необходимо учесть, что их образование было тесно связано с интенсивным потоком, эродировавшим кристаллические сланцы серии Вишну и граниты формации Зороастр. Эта эрозия привела к образованию обломочного материала разной размерности - от глины и песка до гальки и валунов. В.В. Лебедев

[1959] определил начальную скорость движения для частиц разного диаметра в зависимости от глубины потока. Для гальки такая скорость варьирует от 2 до 3 м/с, для валунов она превышает 6 м/с. Таким образом, скорость течения во фронтальной зоне потока была достаточна для транспортировки валунов из зоны 1 в зону 2 (см. рис. 2) и, следовательно, превышала 1.5 м/с.

По мере развития трансгрессии увеличивалась глубина бассейна и, соответственно, уменьшалась скорость течения, тем не менее, оно оставалось достаточно интенсивным для транспортировки более мелких галечных обломков в зону 2, где скорость течения составляла около 1.5 м/с.

В мелководной зоне 1 течение вызывало эрозию, теряло скорость и выносило из зоны в западном направлении терригенный (гравий, песок, алеврит и глину) и карбонатный материал, причем более крупные частицы перемещались в составе донных наносов в зоны 2-6, более мелкий материал переносился во взвеси и отлагался только в зонах 5 и 6.

В зоне 3 формировались пески с косой слоистостью. Такие пески слагают среднюю часть сви-

ты Тапеатс. Скорость течения в этой зоне составляла около 1.0 м/с. Ориентировка косой слоистости на запад-юго-запад указывает на преобладающее направления палеопотока.

Зона 4 представляет собой более глубоководную и гидродинамически спокойную фацию, слагающую верхнюю часть песчаников Тапеатс.

Зона 5 располагалась в еще более глубоководной и спокойной зоне. Алеврито-глинистые осадки образовывали здесь пласты сланцев Брайт Анжел с градиционной слоистостью. Скорость течения составляла около 0.5 м/с.

Зона 6 - самая западная, глубоководная и спокойная, испытывала дефицит силикатных частиц глины и алеврита. Здесь отлагался известковый ил в виде горизонтальных ритмичных слоев. Скорость течения не превышала 0.5 м/с.

На уровне, соответствующем дну палеобассейна, размер частиц уменьшается с востока на запад. В вертикальной последовательности толщи также наблюдается уменьшение крупности осадков от подошвы к кровле. Это объясняется следующим образом: осаждение частиц происходит в условиях, когда скорость транспортирующего потока становится меньше критической скорости переноса частиц данной размерности. Критическая скорость приблизительно соответствует скорости начала движения частиц (incipient motion), которая обычно соотносится с пороговыми условиями между эрозией и осаждением единичной частицы [Julien, 1995]. Очевидно, что скорость начала движения возрастает с увеличением размера частиц. Следовательно, уменьшение их размера с востока на запад и снизу вверх по разрезу указывает на уменьшение скорости потока в ходе седиментации. Такое уменьшение скорости может являться результатом увеличения глубины бассейна в зоне 3 по сравнению с зонами 1 и 2.

Рассмотрим частицы А, осаждавшиеся в зоне 6 в момент времени t на эродированную поверхность докембрийского фундамента, представленного породами Зороастр и Вишну. В следующий момент времени t^1 более мелкие частицы В осаждались на поверхности палеобассейна западнее частиц А по направлению господствующего течения. В то же самое время t , другие частицы (С), более мелкие, чем А, осаждались выше по разрезу. Эти частицы (В и С) одновременно осаждались в момент времени t^1 (рис. 3).

Особенности образования пород серии Тонто объясняются одновременным нарастанием толщи осадков в вертикальном и латеральном направлениях и смещением области седиментации с востока на запад. Данная модель не соответствует стратиграфической схеме, согласно которой слои отлагаются горизонтально и последовательно, один за другим. Вопрос состоит в том: можно ли говорить об одновременном осаждении литоло-

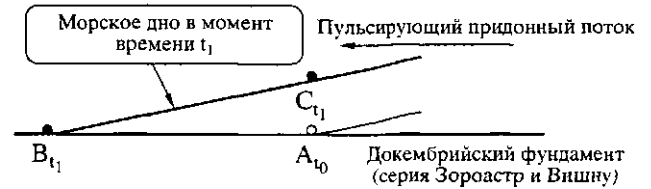


Рис. 3. Схема отложения осадков разной размерности в условиях потока.

гических разностей свиты Тапеатс со сланцами Брайт Анжел и известняками Муав? Другими словами, могли ли частицы глины свиты Брайт Анжел осаждаться в зоне 5 одновременно с частицами песка свиты Тапеатс из зоны 4? Ответ может быть получен из анализа фактических данных без применения специальных вычислений.

Во-первых, скорость перемещения потоком частиц алеврита и глины превышала скорость переносимых в придонном слое песчаных частиц.

Во-вторых, скорость движения частиц уменьшалась от максимально возможной скорости [Fortier, Scobey, 1926] до скорости начала движения частиц [Shields, 1936; Yalin, Karahan, 1979], соответствующей пороговым условиям между эрозией и осаждением. Поэтому частицы песка и алеврита, переносимые на одинаковое расстояние, но поступающие в поток в разное время, с учетом флокуляции (хлопьеобразования) алевритовых частиц могли осаждаться одновременно.

Нужно добавить, что глинистый материал первым отлагался вслед за песками Тапеатс в зоне 5, где скорость течения становилась ниже порогового значения скорости начала движения для частиц глины. По этой же причине процесс осаждения глинистых частиц продолжался в зоне 6. Поэтому глина Брайт Анжел постепенно перекрывала пески Тапеатс с запада на восток в зонах 5 и 6. В это же самое время в зонах с более активным гидродинамическим режимом (2, 3 и 4) продолжалось образование песчаника Тапеатс. Таким образом, отложение формаций, образующих серию Тонто, не соответствует стратиграфической схеме последовательного отложения осадков, как того требует принцип суперпозиции. Точно такая же картина наблюдается в соотношении формаций Брайт Анжел и Муав в зоне 6.

Отмеченные выше закономерности подтверждаются результатами лабораторных экспериментов, проведенных в гидравлической лаборатории Университета Штата Колорадо (США) [Julien et al., 1993].

СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Рассмотрим, как интерпретируется образование серии Тонто с точки зрения стратиграфии.

Согласно принципу непрерывности, каждый слой имеет один и тот же возраст на всем своем протяжении. Седиментация рассматривается как вертикальное выпадение осадков со скоростью, одинаковой для всего слоя. При этом, исходя из продолжительности ниже- и среднекембрийской эпох, с которыми соотносятся отложения серии Тонто, в 30 млн. лет [Paleozoic..., 2003], скорость осадконакопления оценивается как крайне незначительная (от 8 до 17 мм/тыс. лет).

Согласно стратиграфической шкале, кембрийская система состоит из трех отделов (нижне-, средне- и верхнекембрийского) общей продолжительностью более 50 млн. лет. Поскольку серия Тонто состоит из трех трансгрессивно залегающих формаций, отлагавшихся в одно и то же время, то эти формации являются одновременно перекрывающимися и примыкающими по отношению друг к другу, при этом реальная скорость осадконакопления оказывается гораздо выше расчетной стратиграфической. Таким образом, мы видим, что стратиграфическая шкала на уровне кембрийской системы Большого Каньона Колорадо не принимает во внимание пространственно-временных особенностей осадочного процесса.

В вышележащей толще, перекрывающей отложений серии Тонто, существуют стратиграфические несогласия. Проведенные эксперименты в лабораторных лотках показали, что поверхности эрозии могут возникать при увеличении скорости потока; при последующем уменьшении его скорости происходит выпадение осадков - так называемый "эффект вымывания и заполнения" (scour and fill effect) [Julien et al., 1993]. Такие эрозионные поверхности связаны с локальным и кратким перерывом в осадконакоплении. Подобные эрозионные поверхности были отмечены в осадочном чехле Русской платформы [Игнатъев, 1971]. Изменение скорости потока также может повлиять и на ориентацию слоев. Поэтому необходимо принимать во внимание, что перерывы в осадконакоплении могут быть результатом изменения гидродинамических условий отложения осадков.

Анализ, аналогичный проведенному выше для серии Тонто, может быть сделан для разных подразделений стратиграфической шкалы. Принципы ее построения недоучитывают седиментологические особенности образования осадочных пород, как во времени, так и в пространстве. Эти особенности проявляются в том, что трансгрессивно-регрессивная серия отложений начинается и оканчивается в условиях повышенной гидродинамической активности среды осадконакопления, при этом происходит быстрый перенос и осадение больших объемов обломочного материала. Реальное время накопления осадков значительно меньше временного стратиграфического интервала, соответствующего данной толще. Это вре-

мя может быть оценено методами палеогидродинамического анализа. В некоторых случаях реальное время отложения осадка составляет только 0.0001% [Романовский, 1988] или 0.01-0.001% [Мейен, 1989] стратиграфического времени образования данной толщи отложений. При этом значительная часть времени, в течение которого формируется разрез, приходится на скрытые перерывы осадконакопления (диастремы) [Романовский, 1988].

Недоучет пространственных особенностей седиментации проявляется в том, что толщи, аналогичные серии Тонто, состоят из отложений, являющихся одновременно перекрывающимися и примыкающими по отношению друг к другу, образованными частично в одно и то же время, а не последовательно друг за другом, как это предполагается при построении стратиграфической шкалы. Кроме того, эрозионная поверхность внутри осадочной толщи не всегда отражает длительный перерыв в седиментации. Примером длительного стратиграфического перерыва несомненно является поверхность "Большого несогласия" (Great Unconformity) в основании серии Тонто, отделяющая ее от докембрийского фундамента. В других случаях несогласие может быть сформировано за счет изменения скорости потока во время седиментации.

Анализ осадочной последовательности Большого Каньона р. Колорадо требует пересмотра стратиграфической позиции слагающих ее свит с учетом особенностей седиментации в условиях трансгрессивно-регрессивных циклов осадконакопления. При разработке стратиграфической шкалы должны учитываться результаты седиментологических наблюдений и экспериментов, то есть анализа палеогидродинамических условий, которые определяли процессы седиментации, а также процессы превращения осадков в осадочные породы в процессе диагенеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берто Г.* Анализ основных принципов стратиграфии на основе экспериментальных данных // Литология и полезные ископаемые. 2002. № 5. С. 442-446.
Геологический словарь. Т. 2. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 445 с.
- Игнатъев В.И.* О перерывах и стратиграфических несогласиях в верхнепермских и верхнетриасовых отложениях востока Русской платформы // Геология Поволжья и Прикамья. Казань: Изд-во Казанского университета, 1971. С. 23-50.
- Лебедев В.В.* Гидрология и гидравлика в мостовом дорожном строительстве. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 384 с.
- Мейен С.В.* Введение в теорию стратиграфии. М.: Наука, 1989. 212 с.
- Романовский С.И.* Физическая седиментология. Л.: Недра. 1988. 240 с.

- Aubouin J.** *Precis de Geologic T. 2.* Paris: Dunod University, 1967. P. 229.
- Grand Canyon / Ed. Belknap J.P. Evergreen,- Colorado: Westwaterbooks, 1989. 96 p.
- Forder S., Scobey F.C.** Permissible canal velocities // *Trans. ASCE.* 1926. № 1588. P. 940-984.
- Julien P.Y.** *Erosion and Sedimentation.* N.Y.: Cambridge University Press, 1995. 280 p.
- Julien P.Y., Lan Y., Berthault G.** Experiments on Stratification of Heterogeneous Sand Mixtures // *Bull. Soc. Geol. France.* 1993. V. 164, № 5. P. 649-660.
- Paleozoic Sedimentary Rocks of Grand Canyon. Part 1. 2003. <http://www.studyworksonline.com/cda/content/article/0,,EXP888-NAV2-77-SAR874,00.shtml>.
- Shields A.** *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenz Forschung auf die Geschiebebewegung.* Berlin: Mitteilungen der Preussische Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau, 1936. 216 p.
- Yalin M.S., Karahan E.** Inception of sediment transport // *J. Hyd. Div. ASCE.* 1979. № HY11. P. 1433-1443.