

УДК 553.068.56+556.072

## МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ТИТАН-ЦИРКОНИЕВЫХ МИНЕРАЛОВ ПРИБРЕЖНО- МОРСКИХ РОССЫПЕЙ СУБЛИТОРАЛЬНОЙ ЗОНЫ

*А.В. Лаломов, С.Э. Таболич*

### Аннотация

На основании анализа формул гидравлической крупности и минимальной срывающей скорости для рудных и нерудных частиц донных отложений, а также известных эмпирических данных о режимах движения речных и морских наносов выведены зависимости минимальных срывающих скоростей от угла наклона дна водных потоков на локальных участках. На основании решения уравнений движения частиц донных наносов предложен способ определения преимущественного начала движения частиц – взвешиванием (сальтацией) или качением (волочением). Полученными решениями обоснован механизм концентрирования рудных минералов при движении донных гряд, сложенных рудными и нерудными частицами наносов эквивалентной гидравлической крупности.

**Ключевые слова:** прибрежно-морские россыпи, сублиторальная зона, донные гряды, титан-циркониевые минералы, минимальная срывающая скорость, гидравлическая крупность, донные отложения, концентрирование тяжелых минералов, тяжелая фракция.

### Введение

Наблюдаемая одинаковая гидравлическая крупность тяжелых россыпных минералов и обломочных частиц вмещающих пород прибрежно-морских титан-циркониевых россыпей является результатом их длительного и многоэтапного сосуществования в ходе процессов седиментогенеза. В то же время классическая модель формирования россыпей основана на разной гидравлической крупности полезного компонента и вмещающих отложений. Но в титан-циркониевых россыпях эти крупности эквивалентны. Какие же механизмы ведут к образованию таких концентраций? Исследования закономерностей начала движения и перемещения гидравлически эквивалентных частиц различных плотностей в водном потоке показывают, что эффекты концентрации тяжелых минералов связаны с процессами, происходящими в ламинарном придонном подслое, где перемещение осадков происходит путем сальтации или волочения. При переходе во взвешенное состояние преобладающим становится эффект гидравлической эквивалентности, который ведет к перемешиванию рудных и нерудных частиц и разубоживанию россыпных концентраций, в том числе и в фазе последующего осаждения взвешенных наносов. Таким образом, наиболее эффективно процессы концентрации тяжелых минералов протекают в узком диапазоне придонных скоростей: начало процесса шлихования соответствует горизонтальной минимальной срывающей скорости (она же *неразмывающая* скорость)

для безрудных частиц, прекращение процесса обогащения (и начало перемешивания наносов) происходит при придонных скоростях, соответствующих переходу во взвесь частиц тяжелых минералов.

Ископаемые титан-циркониевые россыпи России относятся преимущественно к сублиторальному типу. Основная часть месторождения Центральное (нижний структурный горизонт), северо-восточная и центральная части Бешпагирского россыпного поля Восточно-Европейской провинции, Тарская россыпь, Северный и Кусково-Ширяевский участки Туганской россыпи Западно-Сибирской провинции, а также ряд других месторождений генетически связаны с отложениями сублиторальной зоны палеобассейнов [1]. Вследствие этого исследование механизма образования россыпных концентраций в этой зоне имеет первостепенный интерес.

Преобладающим гидродинамическим фактором за пределами зоны литорали являются течения различной природы. Россыпные концентрации сублиторали образуются в результате действия течений компенсационного, вдольберегового, градиентного, сточного и иного характера за внешней границей зоны забурунивания, то есть в зоне, где колебательные волновые движения оказывают на донные осадки подчиненное влияние [2].

Поскольку в зоне действия подводных течений для осадков мелкопесчаной – алевритовой размерности, слагающих россыпи сублиторального типа, преобладает грядовая форма движения наносов, одной из задач настоящей работы является нахождение зависимости неразмывающей придонной скорости потока от угла наклона дна к горизонтальной поверхности применительно к рудным и нерудным минералам тонких и мелких классов (0.2–0.05 мм). При выводе этой зависимости предполагается, что общепринятые формулы минимальных срывающих скоростей для рассматриваемых в настоящей работе фракций наносов, будучи неоднократно проверенными на практике, адекватно описывают условия начала движения донных частиц и, следовательно, достаточно полно учитывают основные действующие на частицы наносов силы. В то же время отсутствие в большинстве общепринятых формул угла наклона дна делает затруднительным их применение для описания движения наносов на важных локальных участках концентрирования рудных частиц: лобовых и особенно тыловых откосах донных гряд сублиторали, зонах волнового заплеска литорали. В настоящей работе сделана попытка адаптировать существующие общепринятые зависимости для описания движения рудных и нерудных частиц на локальных участках дна, имеющих существенный наклон к горизонту. Многие принятые нами допущения и упрощения, вероятно, недостаточно строго обоснованы, но на данной стадии исследований они необходимы для обеспечения возможности реального применения получаемых формул и проверки правильности нашего подхода к проблеме. Представляется, что учет донного рельефа, играющего важнейшую роль в концентрировании рудных компонентов, поможет правильно оценить вклад различных литодинамических факторов в процесс образования, преобразования, уничтожения или сохранения прибрежно-морских и аллювиальных россыпей.

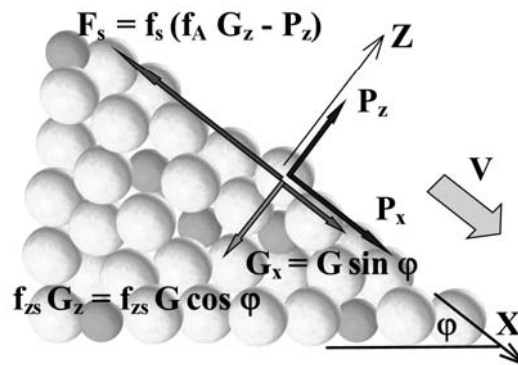


Рис. 1. Силы, действующие на неподвижную частицу в момент перед началом движения в условиях негоризонтального дна.  $F_s$  – сила сопротивления началу движения в направлении оси  $X$ .  $G_x$ ,  $G_z$  – составляющие силы тяжести с учетом силы Архимеда,  $P_x$ ,  $P_z$  – составляющие силы гидродинамического давления,  $f_s$ ,  $f_{zs}$ ,  $f_A$  – коэффициенты сопротивления началу движения: по оси  $X$  (статического трения), по оси  $Z$  (коэффициент удерживающей силы), увеличения веса частицы под действием пригружающей силы (зависит от глубины и коэффициента касания, больше или равен единице),  $v$  – направление и скорость придонного потока

Рассмотрим основные силы, действующие на покоящуюся на поверхности наклонного дна частицу в момент, предшествующий началу ее движения.

Начало координат выберем на поверхности дна на произвольном удалении от рассматриваемого участка дна по оси  $X$ , на графиках и рисунках будем изображать его слева. Ось  $X$  направим по поверхности дна вправо. Таким образом, ось  $X$  в общем случае является криволинейной. Ось  $Z$  направим перпендикулярно поверхности дна вверх. Будем считать, что преобладающее направление течения (то есть без учета пульсационных составляющих, а также обратных течений в вихрях типа вальцов над тыловыми скатами донных гряд) направлено по оси  $X$ . В этом направлении любые донные, то есть направленные вдоль оси  $X$ , скорости и силы будем считать положительными, в противоположном – отрицательными. Скорости и силы, направленные вверх по оси  $Z$ , будем считать положительными, вниз – отрицательными. Положительным углом ( $\varphi$ ) наклона оси  $X$  к поверхности гравитационного геоида будем считать спуск дна по положительному направлению оси  $X$  (на графиках и рисунках – слева направо), отрицательным – подъем дна в этом направлении. Величины скоростей, а также углов в формулах принимают как положительные, так и отрицательные значения в соответствии с вышеуказанной системой. Как указывалось выше, составляющие сил, скоростей и ускорений частиц и воды вдоль оси  $X$  будут называться «донными», вдоль оси  $Z$  – «нормальными». При составлении уравнений баланса сил поправка к силе Архимеда (пригружающая сила), учитывающая экранированную от влияния гидростатического давления площадь частицы, отдельно не вводится, исходя из допущения о том, что она отражена в коэффициентах сопротивления началу движения, используемых в формулах. Действие пригружающей силы допустимо учесть в коэффициентах сопротивления началу движения на следующем основании. Пригружающая сила приблизительно равна увеличению нормальной (направленной по нормали к дну) составляющей веса

частицы на величину, равную весу столбов воды над экранированными площадками поверхности частицы, касающимися нижележащих частиц. При этом добавленный вес столбов воды можно заменить увеличением нормальной составляющей веса самой частицы в какое-то количество  $f_A \geq 1$  раз, но уже без экранирования. Таким образом, например, максимальная сила трения покоя, равная без экранирования  $f_s G_z$ , будет равна  $f_s (f_A G_z) = f_s^1 G_z$ , где  $f_s^1 = f_A f_s$ . Сила тяжести, удерживающая частицу от подъема по нормали ко дну под действием нормальной составляющей гидродинамической силы, также увеличится в  $f_A$  раз. В настоящей работе допускается, что донной (касательной) составляющей пригружающая сила не имеет. По-видимому, возникновение донной составляющей этой силы нехарактерно и возможно только в частных случаях при соответствующем взаиморасположении частиц на участках с большим уклоном дна.

На основании предположения о частых подвижках донных частиц в настоящей работе пренебрегаем отдельным рассмотрением в уравнениях сил сцепления между частицами. Будем полагать несвязанными наносы, состоящие из отмытых от глинистой составляющей, неслежавшихся и неуплотненных слоев преимущественно кварцевых шарообразных частиц. В связи с предполагаемой незначительностью сил сцепления допускаем, что их влияние на начало движения находит отражение в величинах коэффициентов сопротивления началу движения. Кроме того, необходимо отметить, что сила трения покоя, пригружающая сила и сила сцепления прекращают свое действие на частицу практически одновременно за весьма малый промежуток времени – возможно, сотые доли секунды с момента начала движения частицы. В работе не учитываются силы Магнуса, силы Жуковского, силы Бассе, а также влияние эффекта присоединенной массы, действие которых для решения поставленной задачи считается незначительным [3]. Принято допущение о том, что коэффициенты обтекания частиц, коэффициенты сопротивления движению и началу движения частиц в пограничном слое потока не зависят от угла наклона дна. При выводе общих зависимостей рассматривались усредненные по оси  $X$  величины скоростей потока и твердых частиц. Наносы считались состоящими из двух равнопадающих (имеющих одинаковую гидравлическую крупность), но различающихся по плотности фракций: легкой нерудной (кварц) и тяжелой рудной (условно – ильменит). Геометрическая форма частиц принималась близкой к шарообразной. Отличия в поведении частиц в водном потоке, в том числе в донном слое, рассчитывались на основе известных и выведенных на их основе формул [3–6]. Уравнения и формулы, выведенные для нерудных частиц и аналогичные для рудной фракции, для рудных частиц отдельно не приводятся, как правило, для этого достаточно добавить нижний индекс  $r$  к соответствующим обозначениям величин для нерудных частиц.

Рассмотрим вывод зависимостей для частицы, находящейся на спускающемся (по оси  $X$ ) склоне, то есть угол  $\varphi > 0$ . Поток направлен по оси  $X$  ( $v_x > 0$ ). Угол  $|\varphi| < |\varphi_s|$ , то есть не превышает по модулю угла естественного откоса в воде для рассматриваемой фракции наносов. Это, например, режимы: ровного наклонного дна без донных форм рельефа, тылового склона гряды при малых скоростях течения – до отрыва потока от гребня и образования вальца, обратного

скатывания воды в зоне заплеска. В момент перед началом движения частицы на нее действуют силы, компоненты которых направлены как в «донном» (вдоль оси  $X$ ), так и в «нормальном» (вдоль оси  $Z$ ) направлениях (рис. 1). Примем следующее допущение: если при увеличении придонной скорости потока или пульсаций скорости момент нарушения баланса «донных» сил наступит раньше, чем момент нарушения баланса «нормальных» сил, то частица начнет свое движение качением или скольжением. Если же нарушение баланса «нормальных» сил произойдет раньше, то движение начнется как сальтирующее с дальнейшими возможными переходами: к неподвижному состоянию на дне, к качению (скольжению), к продолжению сальтационных прыжков, к взвешенной форме движения. При этом необходимо учитывать значительные различия между коэффициентами сопротивления началу движения (аналоги коэффициентов трения покоя) и коэффициентами сопротивления движению катящейся (или скользящей) частицы (аналоги коэффициентов трения качения или скольжения), а также между параметрами обтекания неподвижной и движущейся частицы. Так, например, катящаяся частица испытывает значительно меньшее сопротивление со стороны поверхности дна, чем неподвижная перед началом движения, а сальтирующая частица практически не испытывает этого сопротивления. В то же время при отрыве частицы от дна из-за резкого уменьшения асимметрии обтекания падает гидродинамическая подъемная сила (нормальная составляющая гидродинамической силы). Началу движения по оси  $X$  в положительном направлении способствуют донная составляющая гидродинамической силы, донная составляющая силы тяжести (с учетом силы Архимеда и пригружающей силы), в противоположную сторону направлена донная сила сопротивления началу движения. По оси  $Z$  в положительном направлении действует нормальная составляющая гидродинамической силы, в отрицательном – сила тяжести (с учетом силы Архимеда) с повышающим (не менее 1) коэффициентом сопротивления началу движения по оси  $Z$  (коэффициентом удерживающей силы). Как указывалось выше, предполагается, что этот коэффициент приближенно учитывает влияние пригружающей силы и силы сцепления.

Баланс по оси  $X$ :

$$P_x + G_x - F_s = P_x + G_x - f_s(f_A G_z - P_z) = 0 \quad (1)$$

или (используя известные уравнения [3–6])

$$3\pi b_x v_{0x} \rho \nu D + (1/6)\pi g(\rho_s - \rho) D^3 \sin \varphi - f_s((1/6)f_A \pi g(\rho_s - \rho) D^3 \cos \varphi - 3\pi b_z v_{0x} \rho \nu D) = 0 \quad (2)$$

Баланс по оси  $Z$ :

$$P_z - f_{zs} G_z = 0 \quad (3)$$

или

$$3\pi b_z v_{0z} \rho \nu D - f_{zs}(1/6)\pi g(\rho_s - \rho) D^3 \cos \varphi = 0, \quad (4)$$

где  $v_{0x}$  и  $v_{0z}$  – минимальные срывающие придонные скорости для начала движения качением (скольжением) и сальтацией (взвешиванием) соответственно;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воды,  $g$  – ускорение свободного падения,  $D$  – диаметр частицы;  $\rho_s$  и  $\rho$  – массовые плотности частицы и воды соответственно,

$b_x$  и  $b_z$  – коэффициенты донного и нормального обтекания неподвижной частицы (обозначения сил и коэффициентов сопротивления приведены в подписи к рис. 1).

В первом приближении допустим, что начало движения частицы происходит качением и/или скольжением. При этом допущении будем рассматривать только уравнение баланса донных сил, то есть составляющих сил, направленных вдоль оси  $X$ . Преобразуя уравнение баланса донных сил (2) относительно  $v_{0x}$ , получим выражение для минимальной срывающей придонной скорости для начала движения качением (или скольжением):

$$v_{0z} = \frac{g\rho^* D^2 (f_s f_A \cos \varphi - \sin \varphi)}{18\nu(b_x + f_s b_z)}, \quad (5)$$

где  $\rho^* = (\rho_s - \rho) / \rho$  – относительная плотность частицы в воде.

За основу расчета минимальной срывающей (неразмывающей) скорости примем формулу Кнороза [4]. Запишем ее для придонной скорости (то есть скорости потока на высоте выступов шероховатости), приняв отношение придонной скорости потока и его динамической скорости при умеренной шероховатости дна равным 7.5 [5, с. 53]. Для частиц диаметром 0.1–0.05 мм, преобладающих в современных титан-циркониевых россыпях сублиторальной зоны, минимальная срывающая придонная скорость без учета угла наклона дна по формуле Кнороза определяется как:

$$v_{0x} = 3.75\nu^{0.3} (g\rho^*)^{0.35} D^{0.05}, \quad (6)$$

где обозначения величин те же, что и в формулах (2) и (4).

Приравняем выражение (5) при  $\varphi = 0^\circ$  к придонной минимальной срывающей скорости в формуле (6):

$$\frac{g\rho^* D^2 f_s f_A}{18\nu(b_x + f_s b_z)} = 3.75\nu^{0.3} (g\rho^*)^{0.35} D^{0.05}. \quad (7)$$

Тогда

$$f_s f_A / (b_x + f_s b_z) = 67.5\nu^{1.3} (g\rho^*)^{-0.65} D^{-1.95}, \quad (8)$$

откуда следует, что учет угла наклона дна в рассматриваемом случае можно представить следующим образом:

$$v_{0x} = 3.75(f_s f_A)^{-1} \nu^{0.3} (g\rho^*)^{0.35} D^{0.05} (f_s f_A \cos \varphi - \sin \varphi). \quad (9)$$

В частности, из полученной формулы при  $f_A = 1$  следует, что при превышении угла наклона дна над углом естественного откоса в воде, для удержания частицы в равновесии требуются отрицательные, то есть направленные вверх по склону придонные скорости потока.

Определим минимальную срывающую придонную скорость потока на негоризонтальной поверхности дна при начале движения сальтацией  $v_{0z}$ . Для этого используем уравнение баланса нормальных составляющих действующих на частицу сил (4). После преобразований имеем

$$v_{0z} = \frac{g\rho^* D^2 f_{zs} \cos \varphi}{18\nu b_z}. \quad (10)$$

Учтем, что взвешивающая придонная скорость для частицы по данным Росинского и Дебольского [6] определяется по формуле

$$v_{0z} = 1.4v_{0x}. \quad (11)$$

Значение коэффициента  $f_s$  примем равным тангенсу угла естественного откоса в воде без воздействия потока, для рассматриваемых наносов оно равно 0.7 [7]. Коэффициенты  $f_A$  и  $f_{zs}$  будем считать равными единице. Тогда, используя (9)–(11) при горизонтальной поверхности дна, можно рассчитать величину отношения  $f_{zs}/b_z$  для дальнейшего применения в расчетах минимальной срывающей скорости при начале движения сальтацией (взвешиванием).

Аналогично выводятся формулы для иных сочетаний углов наклона дна и направлений водного потока. С учетом выбранной системы координат и знаков угла наклона дна полученные формулы могут применяться также и для описания начала движения частиц в обратном потоке вальца за гребнем донной гряды, а также при иных сочетаниях придонных скоростей и донных форм рельефа.

Построенные по полученным формулам зависимости минимальной срывающей скоростей от угла наклона дна для частиц кварца диаметром 0.1 и 0.2 мм и гидравлически эквивалентных им частиц ильменита соответственно диаметром 0.067 и 0.133 мм приведены на рис. 2. Подстрочным индексом  $r$  обозначены минимальные срывающие скорости для рудных частиц (ильменит), без индекса – аналогичные величины для нерудных (кварц).

Необходимо отметить, что в рассматриваемом диапазоне крупностей частиц, несмотря на, казалось бы, незначительные различия между абсолютными значениями минимальных срывающих скоростей для рудных и нерудных частиц, пересечений между ними нет. Иными словами, в этом диапазоне разделение равнопадающих частиц по моменту начала движения качением (скольжением) будет происходить всегда, если есть различие в плотности частиц. Это объясняется тем, что неразмывающая скорость в гидравлически гладкой области в значительно большей мере зависит от плотности частиц, чем от их диаметра. Отношение диаметров равнопадающих частиц в рассматриваемой области обратно квадратному корню из отношения их относительных плотностей, а отношение диаметров равнодвигаемых частиц обратно отношению их относительных плотностей в седьмой (!) степени:

$$D_r / D = (\rho^* / \rho_r^*)^7. \quad (12)$$

Так, например, для рассматриваемых частиц – кварца и ильменита – отношение равнопадаемости равно 0.67 (диаметр рудной частицы к диаметру нерудной), а формально рассчитанное отношение равнодвигаемости – 0.0034, что выходит за рамки рассматриваемого диапазона крупности частиц. В то же время необходимо учитывать, что при увеличении крупности частиц степень при отношении относительных плотностей в формуле (12) уменьшается и достигает 0.5 уже при  $D > 2$  мм.

На рис. 3 приведено распределение минимальных срывающих придонных скоростей вдоль продольного разреза типичной донной гряды для шарообразных частиц кварца диаметром 0.1 мм и равнопадающих с ними частиц ильменита диаметром 0.067 мм. Показаны минимальные срывающие скорости после

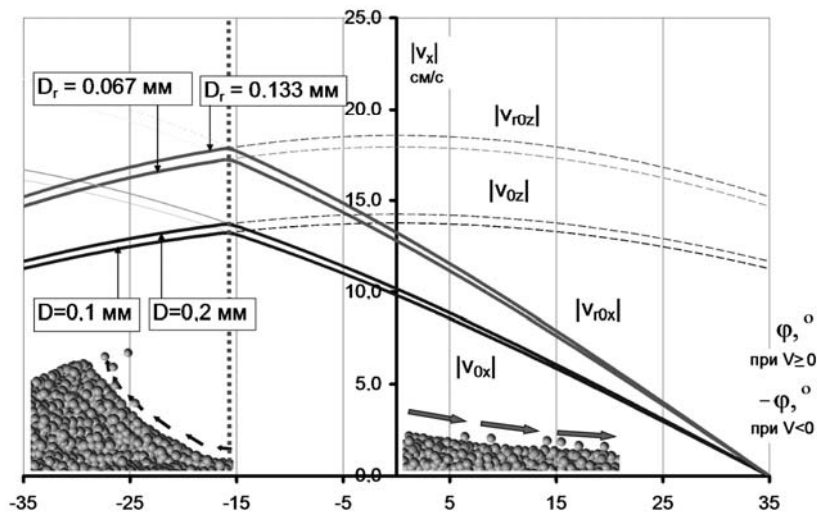


Рис. 2. Зависимости минимальных срывающих скоростей от угла наклона дна для частиц кварца диаметром 0.1 и 0.2 мм и гидравлически эквивалентных им частиц ильменита диаметром 0.067 и 0.133 мм соответственно

образования вихревого вальца над тыловым скатом и подвальем гряды. Можно примерно оценить скорость движения частиц как разницу между придонной скоростью потока и незаиливающей скоростью или, в первом приближении, неразмывающей скоростью. Последнее относится прежде всего к катящимся в данном случае рудным частицам. Для взвешенных нерудных частиц можно предположить, что скорость их перемещения будет значительно выше скорости качения в связи с попаданием частиц при взвешивании в вышележащие слои потока, имеющие более высокие скорости. На графике скорость движения нерудных взвешенных частиц условно показана как  $> 23$  см/с. Гидравлический радиус потока при оценке придонных скоростей – 4 м над подвальем гряды, около 3.6 м – над гребнем. Длина гряды – 5 м, максимальный начальный угол тылового ската (в верхней части) –  $32^\circ$ . Расчеты имеют приближенный характер из-за невозможности точно установить величины придонных или динамических скоростей вдоль продольного профиля гряды. В то же время из-за весьма значительной разницы между минимальными срывающими скоростями для нерудных и рудных частиц принципиальных отличий от показанной схемы концентрирования при вариациях придонных скоростей вдоль гряды возникнуть не должно. Рисунок продольного разреза гряды под графиками приведен с целью схематически показать процесс концентрирования, в связи с чем размеры частиц показаны вне масштаба. Кроме того, для большей наглядности хода концентрирования, на рисунке гряды исходный донный материал не сортирован. Использованное при расчетах некоторое увеличение средних скоростей потока над гребнем гряды и еще в большей степени над вихревым вальцом происходит, по мнению некоторых исследователей, из-за стеснения потока [6]. Этот эффект использован при приблизительном расчете графика придонной скорости. Необходимо отметить, что ненулевые скорости движения частиц  $u$  и  $u_r$  показаны на графиках только на участках эрозии, то есть на поверхностях гряды, в которых происходит переход в подвижное состояние этих частиц. На участке



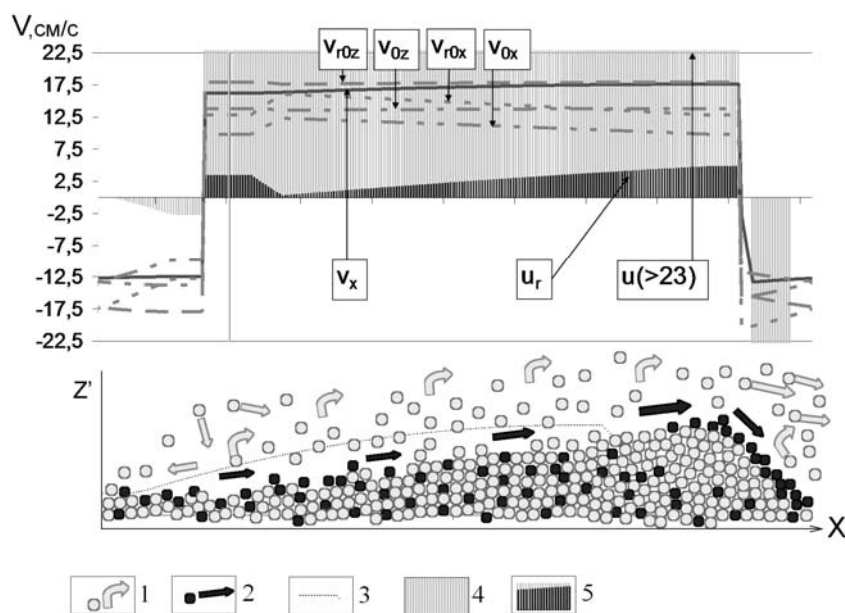


Рис. 3. Распределение минимальных срывающих придонных скоростей вдоль продольного разреза типичной донной гряды и схема образования россыпных концентраций в условиях грядовой формы движений наносов.  $u$ ,  $u_r$  – скорости движения частиц нерудных и рудных минералов соответственно.  $v_0$  – критические срывающие скорости:  $v_{0x}$ ,  $v_{r0x}$  – перехода к качению (скольжению) нерудных и рудных частиц соответственно;  $v_{0z}$ ,  $v_{r0z}$  – скорости начала сальтации для нерудных и рудных частиц соответственно. 1 – нерудные частицы и направление их движения, 2 – рудные частицы и направление их движения, 3 – первоначальный контур гряды, 4 – зона движения нерудных частиц, 5 – зона движения рудных частиц

аккумуляции рудных частиц, например на тыловом скате гряды, скорость движения частиц по инерции или скатыванием может быть ненулевой, но на данных графиках эта скорость не показана.

На всем лобовом склоне гряды нерудные частицы начинают движение взвешиванием, а рудные – качением. Кроме того, нерудные частицы начинают движение взвешиванием в верхней части тылового ската при одновременном скатывании и аккумуляции рудных частиц на этом участке. Нерудные частицы, выпадающие из взвеси в подвалье гряды, движутся к ее тыловому скату, где переходят во взвешенное состояние, не снижая, таким образом, концентрации рудных частиц. Взвешенные нерудные частицы, достигшие лобового склона следующей гряды, продолжают движение в положительном направлении взвешиванием. Процесс сепарации рудных и нерудных частиц на этой стадии развития гряды представляется наиболее эффективным. Но основной рост и движение гряды происходят в диапазоне меньших скоростей, позволяющих нерудным частицам накапливаться на тыловом скате.

Необходимо отметить, что движение частиц тяжелой фракции по лобовому склону гряды, как показали эксперименты на лабораторном лотке, может принимать форму движения микрогряд, сформированных этими частицами (рис. 4).

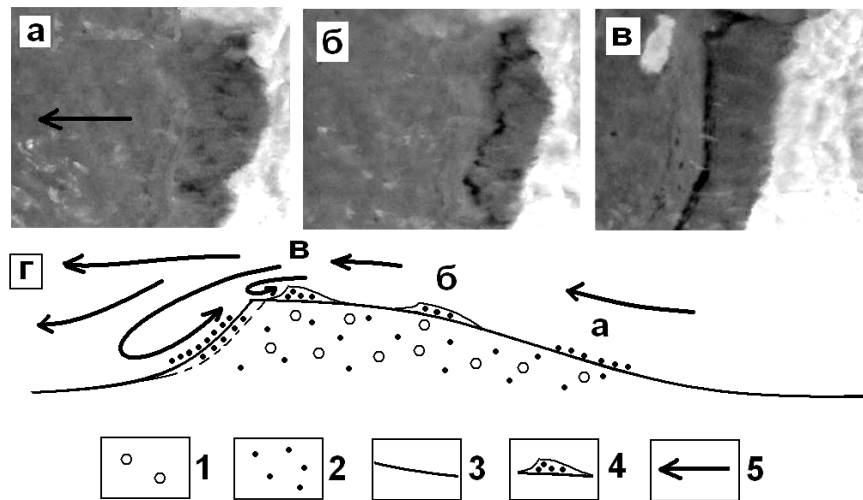


Рис. 4. Формирование и движение рудной микрогряды на поверхности основной гряды. *а, б, в* – фотографии в плане: *а* – формирование рудных концентраций на лобовом склоне гряды; *б, в* – формирование и движение рудных микрогряд по поверхности основной гряды; *г* – схематический поперечный профиль гряды, фрагменты *а, б, в* соответствуют фотографиям. 1 – нерудные частицы, 2 – рудные частицы, 3 – поверхность основной гряды, 4 – профиль рудной микрогряды, 5 – направление потока

В ходе экспериментов на лотке при мелкой воде (2–3 см) наблюдалось до трех таких рудных микрогряд на одном лобовом склоне гряды, сложенной песками с содержанием около  $20 \text{ кг/м}^3$  тяжелой фракции (преимущественно состоящей из ильменита) при средней крупности исходного кварцевого песка 0.1 мм, ильменита – 0.07 мм. В частности, формирование рудных микрогряд может быть связано с увеличением значения коэффициента сопротивления движению рудных частиц на границе между обогащенным тяжелой фракцией верхним по течению участком лобового склона основной гряды и его расположенным ниже по течению участком, поверхность которого относительно обеднена рудными частицами (рис. 3). Этот механизм, по-видимому, не является единственно возможным.

Первоначальное накопление рудных частиц приводит к возникновению микровальца в водном потоке, что, в свою очередь, усиливает эффект накопления рудных частиц в микрогряде. Безрудные частицы на такой форме микро-рельефа более, чем рудные, склонны переходить во взвешенное состояние из-за локального увеличения угла наклона дна, поэтому они не создают существенных препятствий для миграции рудной микрогряды по лобовому склону основной гряды. В связи с тем, что значительное количество безрудных частиц переходит на возникшем рудном «микротрамплине» во взвешенное состояние уже до гребня основной гряды, замедляется происходящее за счет нарастания тылового ската движение самой основной гряды. Кроме того, коэффициент сопротивления движению рудных частиц по таким же рудным частицам меньше этого коэффициента для движения рудных частиц по нерудным. В результате рудная микрогряда перемещается путем наращивания своего тылового ската быстрее, чем перемещается основная гряда. Таким образом, имея большую скорость движения, рудная микрогряда достигает гребня основной гряды и затем путем скатывания

против обратного потока вальца образует обогащенный тяжелой фракцией прослой. Возникновение такого механизма движения не изменяет предложенной общей схемы концентрирования тяжелой фракции на гряде, но может приводить к образованию не одного, а нескольких обогащенных тяжелой фракцией слоев на ее тыловом склоне за один цикл шторма.

### Summary

*A.V. Lalomov, S.E. Tabolich.* Mechanisms of Formation of Titanium-Zirconium Minerals Concentrations in Sublittoral Zone of Coastal-Marine Placer Deposits.

Relationships between minimal erosive velocities and stream bed inclination were determined by the analysis of the formulas of hydraulic size and minimal erosive velocities for heavy (ore) and light (non-ore) particles of bottom sediments as well as known empirical data on the regimes of alluvial and submarine sediment transport. Solution of the equations of bottom sediment transport makes it possible to determine the mode of particle movement, which is either suspension (saltation) or rolling motion (dragging). The obtained solutions prove the mechanism of concentration of heavy minerals under the movement of bottom ridges formed by the particles of ore and non-ore minerals with the equivalent hydraulic size.

**Key words:** coastal-marine placer deposits, sublittoral zone, bottom ridges, titanium-zirconium minerals, minimal erosive velocity, hydraulic size, bottom sediments, concentration of heavy minerals, heavy fraction.

### Литература

1. *Патык-Кара Н.Г., Быховский Л.З.* Размещение крупных титано-циркониевых россыпных месторождений на территории России: факторы регионального контроля // Труды Ин-та геологии рудн. месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. – М.: ИГЕМ РАН, 2010. – С. 122–142.
2. *Динамические процессы береговой зоны моря / Под ред. Р.Д. Косьяна, И.С. Подымова, Н.В. Пыхова.* – М.: Науч. мир, 2003. – 320 с.
3. *Гришин В.Н.* Механика придонных наносов. – М.: Наука, 1982. – 160 с.
4. *Кнороз В.С.* Неразмывающая скорость для несвязанных грунтов и факторы, ее определяющие // Изв. ВНИИГ. – 1958. – Т. 58. – С. 62–81.
5. *Гришанин К.В.* Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 312 с.
6. *Россинский К.И., Дебольский В.К.* Речные наносы. – М.: Наука, 1980. – 216 с.
7. *Абуханов А.З.* Механика грунтов. – СПб.: Феникс, 2006. – 352 с.

Поступила в редакцию  
02.11.11

---

**Лаломов Александр Валерианович** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ РАН), г. Москва.

E-mail: [lalomov@mail.ru](mailto:lalomov@mail.ru)

**Таболитч Сергей Эрнестович** – ведущий научный сотрудник ООО «ПФК ЮНИВЕРС», г. Москва.

E-mail: [tabolich@mail.ru](mailto:tabolich@mail.ru)