

УДК 553.068.5:556.072

МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОСЛОЕВ ТЯЖЕЛЫХ МИНЕРАЛОВ В ОТЛОЖЕНИЯХ ПОТОКОВ НАНОСОВ

А.В. Лаломов, С.Э. Таболич

Аннотация

Трудами многих исследователей решены основные проблемы контроля металлоносности комплексных прибрежно-морских редкометалльно-титановых («титан-циркониевых») россыпей на историко-геологическом и региональном структурно-тектоническом уровне. В настоящее время актуальной задачей является разработка методик количественной оценки связи россыпной металлоносности с литодинамическими параметрами прибрежной части акватории на более детальном иерархическом уровне – ранга месторождений и россыпных тел, что требует развития методик геологического, физического, геохимического и математического описания процессов, ведущих к формированию этих объектов. Предлагаемая модель описывает образование концентраций россыпеобразующих минералов в аккумулятивных отложениях потока наносов (от россыпных тел до отдельных рудных прослоев), зависимость распределения этих концентраций от параметров, отражающих состав наносов и гидродинамические условия участка. Адекватность модели проверена на уровне приближенных лабораторных экспериментов, данных наблюдений геологических разрезов (шурфов) на основе приведенного в литературе и полученного авторами фактического материала по прибрежно-морским россыпям редкометалльно-титановой специализации. Дана геологическая интерпретация величин, входящих в уравнения, представлены полученные решения. Модель предлагается в качестве инструмента изучения и локального прогноза обогащенных участков прибрежно-морских и аллювиальных россыпей, а также может быть использована при совершенствовании технологий и оборудования при гравитационном обогащении полезных ископаемых.

Ключевые слова: прибрежно-морские россыпи, вдольбереговой поток наносов, моделирование россыпеобразования, аккумуляция наносов, гравитационное обогащение.

Введение

Характеристики потока россыпеобразующих наносов находят отражение в параметрах россыпных объектов, поэтому одной из наиболее важных задач является моделирование потока наносов, поведения в нем россыпеобразующих компонентов, количества, состава и структуры отложений, образуемых этим потоком. При благоприятных условиях формируемые потоком наносов толщи отложений могут являться промышленными россыпными телами, но в большинстве случаев отложения современных потоков в пределах береговых зон России не представляют промышленного интереса в связи с низкими содержаниями полезного компонента и/или его запасами. В наибольшей степени это актуально для реконструкции условий образования ископаемых россыпей, которые представляют промышленный интерес на территории нашей страны.

Создание модели формирования потоком наносов осадочных толщ позволяет исследовать и формализовать гидро- и литодинамические факторы россыпеобразования. Развитие модели в направлении создания альбома возможных решений и сопоставления их с фактическим материалом может быть значительным подспорьем в выделении среди множества аккумулятивных отложений потоков участков, наиболее перспективных для выявления объектов, удовлетворяющих промышленным требованиям. В настоящей работе представлен вариант модели формирования толщи донных отложений водных потоков применительно к вдольбереговым и аллювиальным потокам наносов, кроме того, эта модель может быть использована для описания некоторых технологических процессов гравитационного обогащения рудных песков.

Под действием результирующей силы ветроволновой энергетической равнодействующей и возникающих на подводном береговом склоне течений образуется вдольбереговой поток наносов (ВПН), параметры которого во многом определяют конфигурацию береговой линии, ее динамическое состояние (абразии, транзита или аккумуляции обломочного материала) и характер процессов концентрации тяжелых минералов в береговой зоне бассейна. При подходе волн под углом к береговой линии возникает вдольбереговое перемещение наносов. Прибойный поток на пляже транспортирует частицы наносов вверх под некоторым углом к урезу воды, а обратно эти частицы перемещаются, влекомые стекающим вниз водным слоем, по линии наибольшего уклона, то есть в общем случае по нормали к урезу воды. С каждой волной, таким образом, частицы проделывают определенный путь вдоль берега. По аналогичной схеме это зачастую происходит и на подводном склоне в случае, если на перемещение наносов вдоль берега определяющее влияние оказывают волны. В то же время движение обломочных частиц вдоль берега вызывают и иные течения различной природы (компенсационные, градиентные и т. д.), причем роль последних вне зоны волноприбойной деятельности бывает преобладающей, и при некоторых условиях такие течения действуют в непосредственной близости от берега [1]. В этом случае ближайшим аналогом механизма прибрежно-морского россыпеобразования является аллювиальный процесс.

В зависимости от экспозиции участка берега и гидрометеорологических условий подвижки наносов могут совершаться всегда в одном направлении или попеременно в двух встречных направлениях. Там, где одно из направлений существенно преобладает, возникает ВПН, который характеризуется *мощностью* (объемом переносимого обломочного материала) и *емкостью* (максимальным количеством материала, способным перемещаться в единицу времени при данной гидрометеорологической ситуации). Соотношение емкости и мощности определяет литодинамическую ситуацию: при ненасыщенности потока (емкость больше мощности) возникает дефицит наносов и начинается абразия берега и донных отложений, при равенстве этих параметров участок стабилизируется, при превышении мощности над емкостью начинается аккумуляция материала, нарастание пляжа и подводных аккумулятивных форм. При рассмотрении этого процесса на детальных временных промежутках, например за период одного шторма, выясняется, что каждый шторм (вне зависимости от направления общего ВПН) формирует свою колонку отложений, в том числе

эродируя предыдущую либо наращивая свою. Сформированная этим штормом колонка впоследствии либо разрастается, либо уничтожается более интенсивными, образующими общий ВПН штормами. Прибрежно-морские редкометалльно-титановые россыпи формируются в основном в пределах зон общей аккумуляции, слагая мощные и, как правило, слоистые толщи рудных песков. Типы слоистости (либо ее отсутствие) при поисках и разведке прибрежно-морских россыпей (ПМР) играют роль важного эмпирического прогностического признака [2]. Этот признак отражает гидро- и литодинамическую обстановку формирования россыпных тел и может быть обоснован с геологических, физических позиций и формализован математически.

В активных слоях донных наносов в процессе их аккумуляции (фиксации) или эрозии (мобилизации) происходит дифференциация обломочных частиц по гранулярному и минеральному составу. Мощности отдельных рудных прослоев в россыпных телах зачастую сопоставимы с диаметрами минеральных зерен наносов, что при моделировании объектов ранга рудных прослоев (и их серий, вплоть до россыпных тел) требует перехода от математического описания мощности активного слоя дна как величины, сопоставимой с размерами донных форм рельефа, к существенно меньшей величине, сопоставимой с диаметрами минеральных зерен (миллиметры, доли миллиметра).

Существует множество математических моделей вдольберегового перемещения наносов, размыва и накопления пляжей, формирования прибрежно-морских донных профилей равновесия [3]. Эти модели применяются в основном в инженерных целях, описание некоторых из них встречается в нормативных документах по проектированию и строительству объектов, расположенных в прибрежной зоне: портов, каналов, причалов, водозаборов, пляжей, берегозащитных сооружений и т. п. Имея инженерное назначение, для оценки концентрирования рудных минералов в прибрежно-морской зоне эти модели не адаптированы, так как не разделяют поведение нерудных и рудных минералов в ходе формирования донных отложений.

Для создания применимой на практике модели формирования рудно-россыпных слоев нами был использован метод баланса масс, хорошо зарекомендовавший себя при моделировании потоков рассеяния на суше [4, 5].

Описание модели

Для составления исходных расчетных уравнений баланса масс на произвольно выбранном участке ВПН и в находящемся под ним осадочных отложениях выбрана прямоугольно-призматическая расчетная область длиной dX (по оси X , направленной от начала потока вдоль берега в сторону перемещения наносов) и постоянной единичной шириной по оси Y , направленной от берега перпендикулярно оси X . По вертикали (ось Z) расчетная область состоит из $K = N + M + 4$ ячеек, где N – произвольно выбранное начальное количество ячеек в существующих на начало расчета неподвижных (пассивных) рыхлых отложениях, эти ячейки используются в расчетах при эрозии; M – резерв пустых неподвижных ячеек для формирования (роста) колонки отложений при аккумуляции. Значения N и M должны быть достаточно большими для обеспечения расчетов возможного уменьшения/увеличения мощности осадочной колонки.

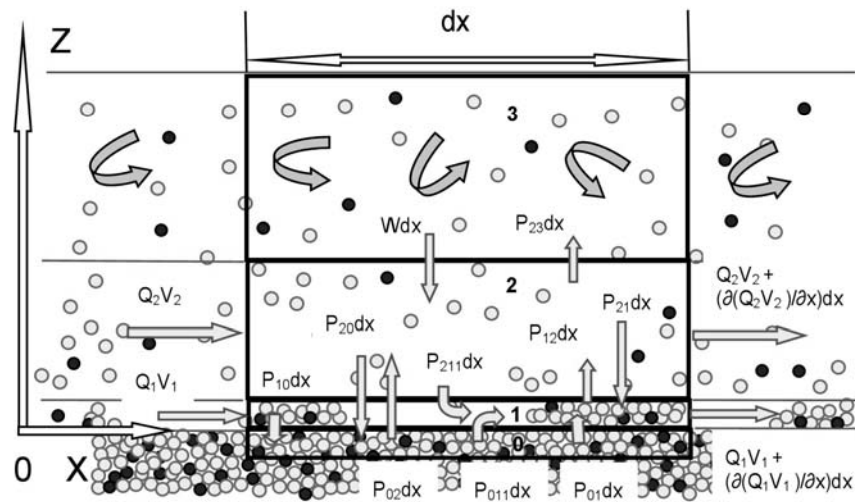


Рис. 1. Схема расположения активных ячеек и перемещения обломочного материала: 0 – активная ячейка неподвижного дна, 1 – ячейка влекомого по дну слоя наносов, 2 – ячейка сальтирующего и взвешенного придонного слоя, 3 – ячейка взвешенного слоя материала в верхних слоях воды. P_{ij} , W – вертикальные потоки обломочного материала между ячейками, Q_1V_1 , Q_2V_2 – горизонтальные потоки в слоях 1 и 2 соответственно

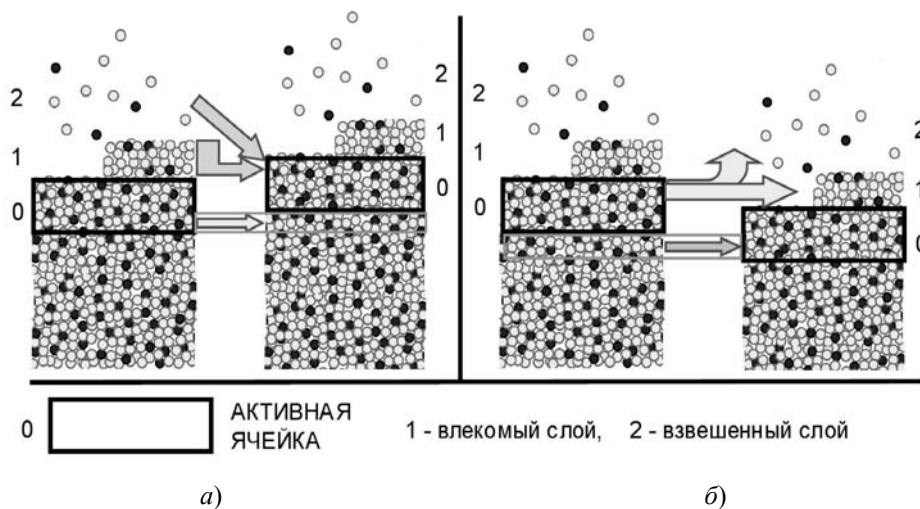


Рис. 2. Схема шага (dt) расчета для активной ячейки дна и колонки отложений: а) аккумуляция, б) эрозия; 0 – активная ячейка неподвижного дна, 1 – ячейка влекомого по дну слоя наносов, 2 – ячейка сальтирующего и взвешенного придонного слоя

В общее количество ячеек K , кроме N и M , входят также четыре активные, передвигающиеся с изменением времени t по оси Z ячейки, расположенные снизу вверх по оси Z , начиная с верхней границы верхней ячейки пассивной толщи отложений (рис. 1, 2). Эти ячейки далее будут обозначаться фиксированными номерами 0, 1, 2, 3, так же как и слои, в которых они расположены.

Ячейка “0” (нулевой слой) – активная ячейка верхней части неподвижной колонки отложений, обменивающаяся потоками обломочного материала с ячейками

подвижных (по оси X) слоев ВПН: с ячейкой “1” (первый слой – влекомые по дну частицы) и с ячейкой “2” (второй слой – сальтирующие и придонные взвешенные частицы). В ячейке “0” происходит перемешивание материала, поступившего в нее на каждом временном шаге расчетов. При эрозии ячейка “0” опускается вниз по оси Z , принимая в свой состав часть нижележащей ячейки неподвижной (пассивной) колонки отложений (рис. 2). Эта принимаемая часть равна по объему эродированной части ячейки “0”, но не равна ей по составу (в общем случае). Состав части принимаемой ячейки содержится в базе данных ячеек пассивной колонки, исходный состав которой задается до начала расчетов. При аккумуляции ячейка “0” поднимается вверх по оси Z на высоту, соответствующую объему поступившего в нее материала, сохраняя при этом объем. При этом она формирует на каждом временном шаге расчета новую нижележащую ячейку неподвижной колонки отложений, имеющую состав ячейки “0”, сформировавшийся на начало этого шага расчетов.

Ячейка “1” (первый слой) – активная ячейка влекомого по поверхности дна подвижного слоя наносов, обменивающаяся потоками материала с активными ячейками: вниз – с активной ячейкой неподвижного слоя “0” (нулевой слой неподвижной колонки) и вверх – с ячейкой подвижного слоя “2” (второй слой – сальтирующий и придонный взвешенный материал).

Ячейка “2” (второй слой) – активная ячейка взвешенного и сальтирующего придонного подвижного слоя наносов, обменивающаяся потоками материала с ячейкой неподвижного слоя “0”, ячейкой подвижного слоя “1” (влекомый слой) и ячейкой “3” (турбулентный взвешенный слой).

Ячейка “3” (третий слой) – активная ячейка верхнего, как правило, турбулентного взвешенного слоя материала, обменивающаяся частицами с ячейкой второго слоя. За счет движения третьего слоя происходит перенос материала на региональном уровне, в том числе между зонами абразии и аккумуляции. Наличие третьего слоя не является обязательным, но во многих случаях он служит основным поставщиком материала, перерабатываемого в нижних активных ячейках и отлагающегося из них. Третий слой может пополняться взвешенными частицами из гидродинамически активных областей размыва, а также за счет ветрового переноса частиц. Направление движения материала в третьем слое вдоль горизонтальной плоскости XU для моделирования не имеет значения, но может быть важным при определении источников материала.

Рассчитываемыми параметрами модели являются количества (объемы) обломочного вещества каждой фракции в ячейках и вычисляемые на основании соотношения этих количеств содержания рудных частиц. При этом разные активные ячейки обладают разной способностью содержать в себе общий объем частиц наносов.

Активная донная ячейка “0”, так же как и ячейки нижележащей пассивной части колонки отложений, всегда заполнена обломочным материалом на 100%. Другими словами, ее объем всегда равен объему находящегося в ней материала и, учитывая единичную постоянную ширину ячейки, равен $H_0 dX$, где H_0 – заданная высота активного слоя в неподвижных донных отложениях. Объем содержащихся в ячейке фракций далее обозначается как Q_0 для безрудного материала и как Q_{r0} для рудного материала. Возможны условия, в которых одна

из фракций в ячейке практически отсутствует, но общий объем ячейки остается неизменным. Таким образом, концентрация одной из фракций может приближаться к 1 (в объемных долях). Высота ячейки (и соответственно, общий объем содержащегося в ней материала) при расчетах может оказаться меньше заданного изначально в случае моделирования отложений с неразмываемым плотиком (в том числе шлюзов, лотков, сепараторов и прочих обогащительных устройств).

Ячейка “1” имеет переменный объем, равный $H_1 dX$, где H_1 – высота осажденного из нее влекомого материала наносов при его равномерном распределении по поверхности дна. Объем содержащихся в ячейке нерудных и рудных фракций обозначается через Q_1 и Q_{r1} соответственно. Формально, сумма этих объемов не ограничена, в то же время решения, приводящие к существенному отклонению суммы объемов вещества в этом слое от объема нулевой ячейки либо не соответствующие натурным данным, должны быть исключены как не имеющие физического смысла. Немаловажной для расчетов величиной является предельный объем вещества в этой ячейке Q_{m1} , при котором прекращается обмен между ячейкой “0” (неподвижного активного слоя) и ячейкой “2” (взвешенного и сальтирующего придонного подвижного слоя наносов). То есть Q_{m1} – это объем влекомого по дну материала, полностью перекрывающего границу между неподвижным (“0”) и взвешенным (“2”) слоями.

Ячейка “2” имеет переменный объем, равный $H_2 dX$, где H_2 – высота осажденного из нее взвешенного и сальтирующего материала наносов. Объем содержащихся в ячейке безрудных и рудных фракций обозначается через Q_2 и Q_{r2} соответственно. Сумма этих объемов может изменяться в больших пределах, чем в слое “1”, и в геологическом смысле соответствует мутности придонного слоя воды.

Ячейка “3” соответствует взвешенному материалу, находящемуся в верхних, как правило, турбулентных слоях воды, и поступающему в нее различными способами: путем перемещения в потоке или волнами с интенсивно размываемых участков берега или дна, или путем эолового переноса. Кроме того, ячейку “3” могут пополнять частицы из придонного взвешенного (сальтирующего) слоя “2”. Материал из ячейки “3” поступает в ячейку “2” в заданном, зависящем от времени объеме в единицу времени: W – для нерудных частиц и W_r – для рудных частиц.

При моделировании сделано допущение, что вертикальные потоки вещества каждой фракции при обмене обломочным материалом между ячейками “0”–“1”, “1”–“0”, “0”–“2”, “2”–“0”, “1”–“2”, “2”–“1” и “2”–“3” пропорциональны (с зависящими от величины придонной скорости V коэффициентами K_{01} , K_{10} , K_{02} , K_{20} , K_{12} , K_{21} , K_{23} соответственно) количествам находящегося в ячейках материала каждой фракции. Для описания обмена между ячейками “2” и “0” предположена пропорциональность потоков доле S площади контакта между ячейками слоев “0”–“2” от общей площади дна ячейки. Кроме того, учтено, что возможен переход из слоя “0” в слой “1” и из слоя “2” в слой “1” помимо площади контакта слоев “0”–“1” и “2”–“1”, но со своими коэффициентами k_{01} , k_{21} .

Отметим, что переход вещества “0”–“2” не аналогичен переходу “0”–“1”–“2”, поскольку в этих переходах используются разные механизмы начала движения (взвешиванием и качением). Кроме того, необходимо учитывать, что процесс перехода частиц из состояния качения во взвешенное состояние сложнее, чем взвешивание непосредственно из неподвижного состояния. Таким образом,

переток “0”–“2” не равен перетоку “1”–“2”, и на ровных участках дна его скорость должна быть выше (при превышении придонными скоростями потока «взвешивающей» скорости). Более подробно эти положения описаны в статье [6].

Соответствующие коэффициенты для рудной фракции имеют подстрочный индекс “r”. Вертикальные потоки вещества обозначены через P_{ij} , где i – слой, из которого поступает материал, j – слой, в который идет поступление (рис. 1).

Зависимость значений вертикальных потоков из ячейки “3” в ячейку “2” W и W_r (нерудного и рудного соответственно) от времени t задается до начала расчетов так же, как и зависимость от времени величины придонной скорости течения V . Аккумулятивная обстановка ПМР предполагает осаждение материала, взвешенного на интенсивно размываемых участках, поэтому на значения W и W_r влияет в основном интенсивность поступления в верхние слои водной толщи *дальнеприносного* материала. В связи с этим W и W_r не могут быть *рассчитаны* так, как другие потоки (P_{ij}).

Для описания процесса обмена веществом между ячейками составлена система уравнений, единая для нерудной и рудной фракций. Уравнения системы приведены только для нерудного материала:

$$\frac{\partial Q_1}{\partial t} = P_{01} + P_{21} - P_{10} - P_{12} - \frac{\partial(V_1 Q_1)}{\partial X}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial t} = P_{02} + P_{12} + W - P_{20} - P_{21} - P_{23} - \frac{\partial(V_2 Q_2)}{\partial X}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_0}{\partial t} = P_{20} + P_{10} - P_{01} - P_{02} - P, \quad (3)$$

$$P_{01} = K_{01} Q_0 S + k_{01} Q_0 (1 - S), \quad (4)$$

$$P_{21} = K_{21} Q_2 S + k_{21} Q_2 (1 - S), \quad (5)$$

$$P_{10} = K_{10} Q_1, \quad (6)$$

$$P_{12} = K_{12} Q_1, \quad (7)$$

$$P_{02} = K_{02} Q_0 (1 - S), \quad (8)$$

$$P_{20} = K_{20} Q_2 (1 - S), \quad (9)$$

$$P_{23} = K_{23} Q_2, \quad (10)$$

где V_1 и V_2 – скорости перемещения вдоль оси X материала в слоях “1” и “2” соответственно.

Для рудного материала уравнения объемов Q_{r1} , Q_{r2} , Q_{r0} , скоростей горизонтального переноса V_{r1} и V_{r2} и потоков материала P_{rij} аналогичны (1)–(10) с добавлением нижнего индекса “r”, поэтому для экономии места они здесь не приводятся.

При $Q_1 + Q_{r1} < Q_{m1}$ имеет место

$$S = (Q_1 + Q_{r1}) / Q_{m1}, \quad (11)$$

а при $Q_1 + Q_{r1} \geq Q_{m1}$

$$S = 1. \quad (12)$$

Функция P в (3), а для рудного материала P_r , описывает перетоки вещества из пассивного слоя в активный и наоборот в зависимости от направления процесса: аккумуляция или эрозия. Эти перетоки возникают как результат вертикального смещения ячейки активного слоя вниз при эрозии или вверх при аккумуляции. Такое смещение определяется соблюдением условия заполнения ячейки "0" материалом на 100%. Если имеет место равновесие (как для рудного, так и для нерудного материала), то перетоков нет: $P = P_r = 0$, но при наличии придонных скоростей потока, превышающих критические значения, это является редким частным случаем.

Отметим, что функция P в уравнении (3) зависит от баланса материала, поступающего в слой "0". Если сумма поступления материала разных фракций из вышележащих слоев в ячейку "0" превышает сумму выбытия материала из него в верхние слои (положительный баланс материала), то происходит аккумуляция, то есть модель на каждом расчетном шаге формирует лежащую ниже ячейки "0" пассивную ячейку отложений, состав которой идентичен составу ячейки "0", сформировавшемуся на этом шаге. Объем материала, переданного в эту новую пассивную ячейку, равен разнице между объемами поступившего и выбывшего из ячейки "0" материала. База, содержащая данные о ранее сформированных пассивных ячейках отложений, пополняется новой ячейкой. В этом случае $P > 0$, а P/P_r равно Q_0/Q_{r0} .

При отрицательном балансе потоков вещества, связанных с ячейкой "0", происходит вовлечение в эту ячейку материала, отложенного ранее, информация о котором находится в базе данных пассивной колонки отложений. В этом случае в ячейку "0" поступает материал, имеющий состав нижележащей пассивной ячейки, информация о котором хранится в базе данных. Расчетный шаг по времени dt автоматически корректируется (уменьшается) в случаях, если при заданном исходном постоянном шаге при эрозии происходит поглощение более одной ячейки. При аккумуляции высоты вновь образуемых ячеек также ограничиваются до размера активной ячейки "0" корректировкой (уменьшением) шага по времени.

Отметим, что согласно ограничениям для ячейки "0"

$$Q_0 + Q_{r0} = q \equiv \text{const}. \quad (13)$$

Обозначим

$$p = P_{20} + P_{10} - P_{01} - P_{02}, \quad (14)$$

$$p_r = P_{r20} + P_{r10} - P_{r01} - P_{r02}. \quad (15)$$

Из (3), (13) с учетом (14), (15) следует

$$\frac{\partial Q_0}{\partial t} + \frac{\partial Q_{r0}}{\partial t} = p + p_r - P - P_r = 0. \quad (16)$$

Тогда, P в (3) и P_r (в аналогичной формуле для рудного материала) будут зависеть от знака суммы (14) и (15), которую обозначим как

$$\Sigma p = p + p_r. \quad (17)$$

Если $\sum p > 0$, то есть происходит аккумуляция, то после расчета новых объемов материала в ячейке “0” производится коррекция согласно (16)

$$P = \sum p Q_0 / (Q_0 + Q_{r0}), \quad (18)$$

$$P_r = \sum p Q_{r0} / (Q_0 + Q_{r0}), \quad (19)$$

и часть ячейки “0” объемом $\sum p$ переходит во вновь образуемую нижележащую ячейку.

Если $\sum p < 0$, то есть происходит эрозия, то

$$P = \sum p Q_k / (Q_k + Q_{rk}), \quad (20)$$

$$P_r = \sum p Q_{rk} / (Q_k + Q_{rk}), \quad (21)$$

где Q_k – количество (объем) нерудного вещества, находящегося в пассивной ячейке колонки отложений, расположенной под активной ячейкой “0”, Q_{rk} – объем рудного вещества в этой пассивной ячейке. В этом случае ячейка “0” пополняется из нижележащей ячейки k материалом в общем объеме $\sum p$.

Если $\sum p = 0$, то

$$P = P_r = 0. \quad (22)$$

В этом случае при $p \neq p_r$ изменится только состав ячейки “0” согласно (3) и аналогичной формуле для рудного материала.

В большинстве случаев градиентами потоков $V_1 Q_1$ и $V_2 Q_2$ в уравнениях (1) и (2) можно пренебречь, положив их равными нулю. из-за большой протяженностью природных потоков по оси X . Но эти градиенты необходимо учитывать при моделировании технических обогащительных устройств. По-видимому, также нельзя пренебрегать этими градиентами при отдельном описании лобовых и тыловых склонов, а также подвалев и гребней донных гряд и рифелей. В дальнейших расчетах мы их считаем нулевыми, поэтому систему уравнений можно решать численными методами, используемыми для систем обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с начальными условиями. Нами при решениях применен метод Эйлера с корректировкой шага по t .

Важными параметрами являются коэффициенты пропорциональности K_{ij} , k_{ij} в формулах потоков (4)–(10). Их величины отражают скорости обмена веществом между активными ячейками (слоями наносов, характеризующимися разными механизмами движения). Величина коэффициента показывает, какая доля содержащегося в ячейке материала рассматриваемой фракции переходит в другую ячейку в единицу времени, то есть коэффициенты имеют размерность $1/c$ и значения не меньше нуля, но меньше единицы. По-видимому, значения коэффициентов зависят от свойств материала, поток которого P_{ij} рассматривается: размеров, плотности, формы, а также от скоростей и режима водного течения, воздействующего на обломочные частицы. В частности, коэффициенты потоков, направленных вниз из взвешенных слоев осадков, в основном будут отражать гидравлическую крупность частиц, а также величину вертикальной составляющей скорости воды и ее пульсаций, наличие и характеристики вихрей.

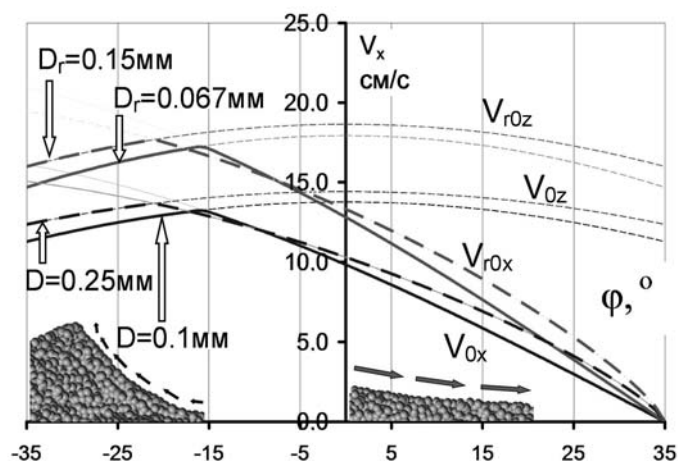


Рис. 3. Зависимости неразмывающих (V_{0x} , V_{r0x}) и взвешивающих (V_{0z} , V_{r0z}) придонных скоростей от угла наклона дна для двух гидравлически эквивалентных пар нерудных ($\rho = 2.6 \text{ г/см}^3$) и рудных ($\rho_r = 4.6 \text{ г/см}^3$) частиц в гидравлически гладкой области. Подстрочный индекс “ r ” относится к скоростям и диаметрам рудных частиц

С увеличением скорости течения значения этих коэффициентов, по-видимому, будут уменьшаться. Коэффициенты потоков материала, направленных снизу вверх, зависят от неразмывающих, взвешивающих и незаиливающих скоростей для этих частиц. Естественно допустить, что при недостижении придонной скоростью течения этих критических для исследуемой фракции наносов величин соответствующий коэффициент будет равен нулю. При переходе через критическую скорость значение коэффициента должно резко возрасти.

На уровне анализа законов движения отдельных частиц в водном потоке нами ранее рассмотрены механизмы концентрирования рудных компонентов на дне [6]. В частности, объяснен механизм разделения гидравлически эквивалентных частиц тяжелых минералов и вмещающих отложений, имеющих тонко- и мелкопесчаную размерность (0.005–0.025 см), рассчитаны кривые зависимости критических скоростей для рудных и нерудных частиц от угла наклона дна (рис. 3).

Отмечено, что в диапазоне крупностей частиц до 0.25 мм, несмотря на, казалось бы, незначительные различия между абсолютными значениями неразмывающих скоростей для рудных и нерудных частиц, нет пересечений между «рудными» и «нерудными» кривыми критических скоростей при отрицательных и положительных (примерно до 20 градусов) углах наклона дна. Различия в значениях критических придонных скоростей для гидравлически эквивалентных частиц кварца и ильменита крупностью 0.1 и 0.067 мм (соответственно) существенно выше, чем между частицами кварца крупностью 0.1 и 0.25 мм. Другими словами, в этом диапазоне разделение равнопадающих нерудных и рудных частиц на дне происходит по моменту их начала движения (качением либо сальтацией и взвешиванием). В рассматриваемой модели это соответствует резкому увеличению значения коэффициентов направленных вверх потоков нерудных частиц с сохранением нулевых значений коэффициентов для рудных частиц (до достижения придонной скоростью сдвигающих значений и для них). Например, в интервале придонных скоростей от 9.8 до 10.3 см/с, соответствующем

неразмывающим (несдвигающим) скоростям для нерудных частиц крупностью 0.1–0.25 мм соответственно, K_{01} увеличивается от 0 до 0.004. Аналогичный коэффициент K_{r01} для рудных частиц остается «нулевым» до интервала скоростей от 12.8 до 13.3 см/с, что соответствует несдвигающим скоростям для рудных частиц крупностью 0.067–0.15 мм, гидравлически эквивалентных нерудным. После преодоления придонными скоростями этого диапазона K_{r01} приобретает то же значение, что и K_{01} . Аналогичная смена значений коэффициентов K_{02} и K_{r02} (с 0 до 0.05) происходит в диапазонах взвешивающих скоростей 13.8–14.4 см/с (для нерудных частиц) и 17.9–18.6 см/с (для рудных частиц).

В качестве начальных колонок выбиралась однородная (без слоев) смесь нерудных (кварц) частиц крупностью 0.1–0.25 мм с гидравлически эквивалентными им рудными (ильменит) частицами крупностью 0.067–0.15 мм. Содержание рудных частиц в исходных отложениях и в материале, поступающем из слоя “3”, принималось одинаковым.

Мощность активного слоя неподвижной колонки отложений принята равной 1 мм. Расчеты выполнены для различных режимов придонной скорости течения и различных режимов поступления наносов из верхнего слоя воды.

Сравнение полученных решений с данными наблюдений

Проверка адекватности предлагаемой модели была осуществлена на ряде современных и ископаемых россыпей, а также на лабораторном лотке. На рис. 4–6 приведены фотографии разрезов и соответствующие этим разрезам модельные колонки отложений, а также результаты численных экспериментов.

На рис. 4 *a, б* приведены зависимости от прошедшего с начала шторма времени t (с) задаваемых величин – придонной скорости воды V (см/с) и вертикального потока обломочных частиц из слоя “3” в слой “2” $W + W_r$ (см³/с·см²). Рудные и нерудные частицы поступают из слоя “3” в постоянной пропорции, равной их соотношению в изначально заданной однородной смеси рудных и нерудных частиц, составляющих также исходную донную колонку отложений (0.02 объемных доли рудных частиц). На рис. 4, *в–д* представлены некоторые результаты модельных расчетов: *в* – изменения уровня дна Z (см) в течение шторма; *г* – изменения содержания рудных частиц в неподвижной активной ячейке “0” в течение шторма (в объемных долях); *д* – расчетная колонка отложений: по вертикальной оси – расстояние Z (см) от начальной отметки, по горизонтальной оси – содержание рудных частиц в отложениях (в объемных долях). На рис. 4, *е* показана фотография стенки шурфа, пройденного на россыпном проявлении редкометалльно-титановой специализации (Зауральский россыпной район). Четыре обогащенных рудных прослоя показаны стрелками.

На рис. 5 приведены фотографии стенок шурфов, пройденных на участках редкометалльно-титановых ПМР. Стрелками показаны рудно-россыпные прослоя. С фотографиями совмещены расчетные модельные колонки из альбома решений, наиболее отражающие изученные природные разрезы.

На рис. 6, *a* приведена фотография лабораторного лотка, на котором производились эксперименты с песками (крупность 0.07–0.25 мм) редкометалльно-титановой ПМР. Снимок сделан после прекращения подачи пульпы и воды, но значительный слой песка и концентрата (до 1.5 см) не был смыт. Стрелкой 1

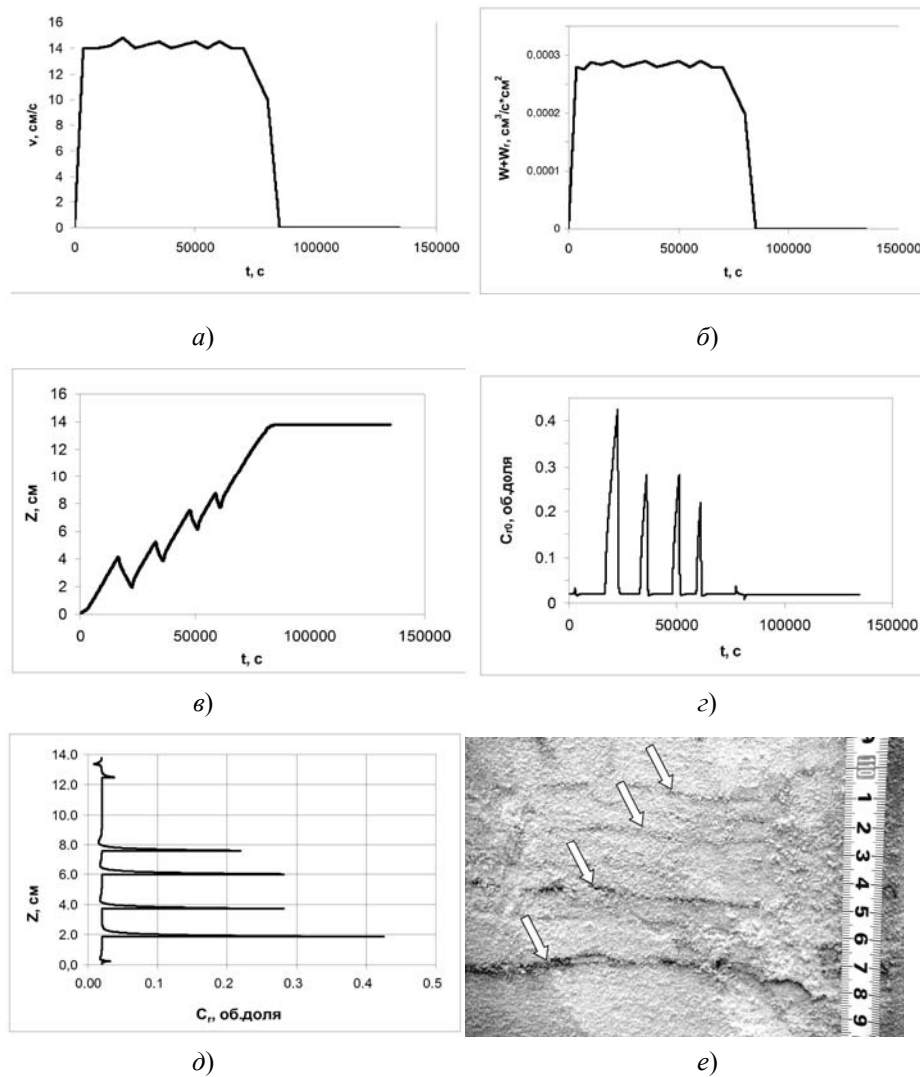


Рис. 4. Модельные расчеты (а–д) колонки отложений и ее природный аналог (е)

показан нижний рудный прослой, зафиксированный искусственными рифелями, стрелкой 2 – верхний обогащенный рудной фракцией слой. На большей части лотка обогащенные прослои разделены фоновыми слоями песка. На рис. 6, б показана одна из расчетных колонок отложений на лотке, приблизительно смоделированная для близкого режима подачи пульпы и воды.

Необходимо отметить, что предлагаемая модель является весьма упрощенным описанием механизма россыпеобразования. Коэффициенты, входящие в модель, оценены приближенно, исходя из соответствия получаемых решений наблюдаемым распределениям содержаний в природных и искусственных колонках. Более точные оценки требуют разработки и применения соответствующего измерительного оборудования и методик. В то же время численные эксперименты при значительных вариациях значений коэффициентов (в несколько раз) показывают, что получаемые решения качественно не изменяются. Гораздо более

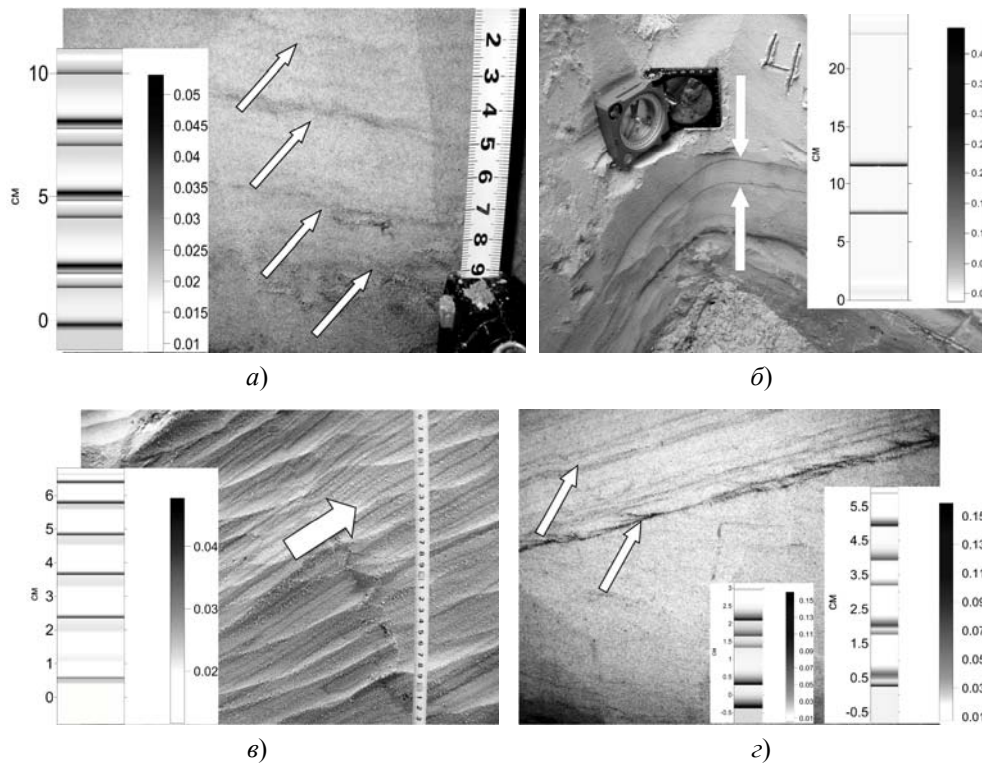


Рис. 5. Расчетные модельные колонки и природная слоистость редкометалльно-титановых россыпей

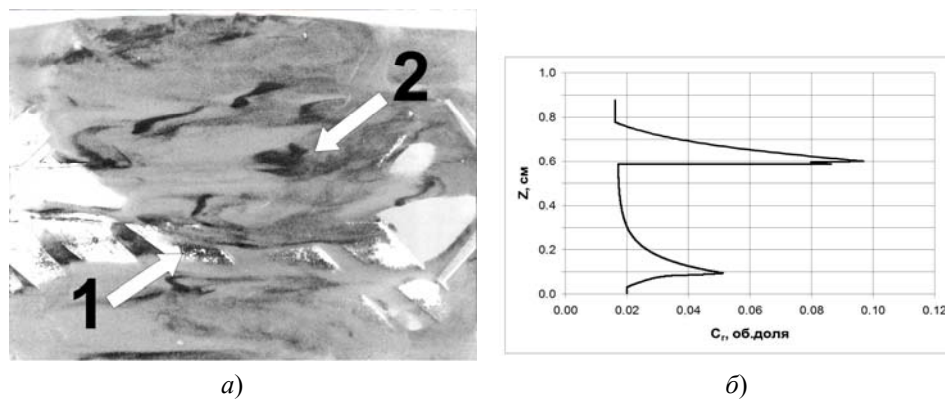


Рис. 6. Фотография концентраций рудных частиц в песках редкометалльно-титановой ПМР на лабораторном лотке (а) и одна из модельных колонок отложений (б)

чувствительны решения к малым изменениям придонных скоростей в области их критических значений: неразмывающих, взвешивающих и незаиливающих скоростей. Но это свойство модели, по-видимому, адекватно отражает природные распределения концентраций вблизи критических значений этих параметров и соответствует представлениям о механизме образования концентраций, рассмотренным нами ранее [6].

Предлагаемая модель может быть использована в качестве инструмента изучения и локального прогноза обогащенных участков прибрежно-морских и

аллювиальных россыпей. Отметим, что модель допускает учет действия устройств для гравитационного обогащения полезных ископаемых (шлюзы, сепараторы, концентраторы и т. п.). Полагаем, что доработка модели в этом направлении, возможно, будет полезно при совершенствовании технологий и оборудования для гравитационного обогащения полезных ископаемых.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-00449-а).

Литература

1. Судольский А.С. Динамические явления в водоемах. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. — 264 с.
2. Снежко В.В. Методика и технология работ по компьютерному прогнозированию титан-циркониевых россыпей на примере Ставропольского россыпного района // Материалы 7-го Всерос. семинара «Компьютерное обеспечение Государственной программы Госгеолкарта-200». – 2000. – URL: <http://gate.geolog.kmv.ru/Konferenc/subjects/24/24.html>, свободный.
3. Динамические процессы береговой зоны моря / Под ред. Р.Д. Косьяна, И.С. Подымова, Н.В. Пыхова. – М.: Науч. мир, 2003. – 320 с.
4. Поликарпочкин В.В. Вторичные ореолы и потоки рассеяния. – Новосибирск: Наука, 1976. – 407 с.
5. Соловов А.П., Шваров Ю.В. Оценка оруденения по литохимическим потокам рассеяния // Разведка и охрана недр. – 1980. – № 1. – С. 25–30.
6. Лаломов А.В., Таболич С.Э. Механизмы формирования концентраций титан-циркониевых минералов прибрежно-морских россыпей сублиторальной зоны // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2011. – Т. 153, кн. 4. – С. 232–242.

Поступила в редакцию
12.02.13

Лаломов Александр Валерианович – доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, Россия.

E-mail: lalomov@mail.ru

Таболич Сергей Эрнестович – ведущий научный сотрудник, ООО «ПФК ЮНИВЕРС», г. Москва, Россия.

E-mail: serg.tabolich@gmail.com

* * *

MODEL OF FORMATION OF HEAVY MINERAL INTERLAYERS IN DEPOSITS OF ALONGSHORE SEDIMENT FLOW

A.V. Lalomov, S.E. Tabolich

Abstract

The works of many researchers solved the basic problems relating the control of formation of complex coastal-marine rare-metal-titanium (“titanium-zirconium”) placer deposits at historical-geological and regional tectonic levels. Currently, an urgent task is the development of methods for quantitative

estimation of the relationship between placer deposition and lithodynamic parameters of coastal waters at a finer hierarchical level (deposits and placer bodies). This requires the development of techniques for geological, physical, geochemical, and mathematical description of processes leading to the formation of these objects. The proposed model describes the formation of concentrations of placer-forming minerals in accumulative sediment flow deposits (from placer bodies to separate ore interlayers), and also the dependence of the distribution of these concentrations on the composition of the sediments and the hydrodynamic conditions of the area. The adequacy of the model has been verified at the level of approximate laboratory experiments and observational data from geological columns (pits) using already published and original factual material on coastal-marine rare-metal-titanium placers. A geological interpretation of the quantities entering into the equations is given; their solutions are presented. The model serves as a tool for the study and local forecasting of heavy mineral concentrations in coastal-marine and alluvial placer deposits. It also can be used for the improvement of technologies and equipment in gravity concentration of heavy minerals.

Keywords: coastal-marine placer deposits, alongshore sediment flow, modeling of placer deposition, accumulation of sediments, gravity concentration.

References

1. Sudolskii A.S. Dynamic Phenomena in Reservoirs. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991. 264 p. (In Russian)
2. Snezhko V.V. The technique and technology of the works on computer forecasting of titanium-zirconium placer deposits based on the example of the Stavropol placer area. *Materialy 7-go Vseros. seminara "Kompyuternoe obespechenie Gosudarstvennoi programmy Gosgeolkarta-200"* [Proc. 7th All-Russ. Seminar "Computer Support of the Gosgeolkarta-200 State Program"], 2000, available at: <http://gate.geolog.kmv.ru/Konferenc/subjects/24/24.html>.
3. Dynamic Processes in a Coastal Zone, ed. by R.D. Kosyan, I.S. Podymov, N.V. Pykhov. Moscow, Nauch. mir, 2003. 320 p. (In Russian)
4. Polikarpochkin V.V. Secondary Scattering Halos and Flows. Novosibirsk, Nauka, 1976. 407 p. (In Russian)
5. Solovov A.P., Shvarov Yu.V. Assessment of mineralization according to lithochemical scattering flows. *Razvedka i okhrana neдр*, 1980, no. 1, pp. 25–30. (In Russian)
6. Lalomov A.V., Tabolich S.E. Mechanisms of formation of titanium-zirconium minerals concentrations in sublittoral zone of coastal-marine placer deposits. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2011, vol. 153, no. 4, pp. 232–242. (In Russian)

Received
February 12, 2013

Lalomov Alexandr Valerianovich – Doctor of Geology, Senior Research Fellow, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: lalomov@mail.ru

Tabolich Sergei Ernestovich – Leading Research Fellow, PFK UNIVERRRSE Ltd., Moscow, Russia.

E-mail: serg.tabolich@gmail.com