

УДК 553.068.56

ЛОКАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИБРЕЖНО-МОРСКИХ РЕДКОМЕТАЛЛЬНО-ТИТАНОВЫХ РОССЫПЕЙ

© 2023 г. А. В. Лаломов^{a, b, *}

^aИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

^bПермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990 Россия

*e-mail: lalomov@mail.ru

Поступила в редакцию 29.01.2023 г.

После доработки 16.02.2023 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

Для создания поисково-ориентированной геолого-динамической модели, позволяющей прогнозировать перспективы россыпной редкометалльно-титановой минерализации, были проанализированы локальные факторы формирования прибрежно-морских редкометалльно-титановых россыпей, исследовано их влияние на структуру, состав, локализацию россыпных концентраций в пределах бассейнов осадконакопления, а также динамическое взаимодействие этих факторов в процессе образования продуктивных отложений. Опираясь на работы предыдущих исследователей, детально разработавших вопросы контроля формирования этих россыпей на историко-геологическом и региональном структурно-тектоническом уровне, создана качественная модель формирования россыпных концентраций на локальных площадях ранга районов, узлов, полей и конкретных россыпных тел, что может являться основой для создания поисково-ориентированной модели месторождения и планирования поисково-оценочных работ. Среди факторов россыпеобразования выделены гидродинамический — характеризующий типы и механизмы россыпных концентраций (литоральный и сублиторальный) в пределах динамически активной прибрежной зоны; литодинамический — зависящий от абразионно-аккумулятивного режима побережья и параметров вдольберегового потока наносов; структурно-динамический — определяющий возможность образования промышленно значимых продуктивных отложений и их локализацию; и фактор трансгрессивно-регрессивного режима бассейна, который определяет структуру россыпных тел и их трансформацию на постседиментационном этапе. Крупные экономически значимые редкометалльно-титановые россыпные месторождения формируются только в условиях совместной реализации положительного потенциала указанных факторов. Разработанная качественная модель может служить основой для процесса цифровизации прогноза россыпной редкометалльно-титановой минерализации.

Ключевые слова: россыпи, титан, цирконий, редкие металлы, факторы россыпеобразования.

DOI: 10.31857/S0024497X23700143, **EDN:** VSMWBY

Редкометалльно-титановые россыпи (РТР), известные в литературе также как титано-циркониевые, циркон-ильменитовые, комплексные прибрежно-морские россыпи тяжелых минералов (ТМ), heavy mineral placers, heavy mineral sands, являются основным мировым источником титанового (70%) и циркониевого (95%) сырья, а также ряда других попутных минералов. В настоящее время в мире разрабатываются месторождения, расположенные преимущественно на современных океанических побережьях Австралии, Индии, Северной Америки, юго-восточной Африки и Бразилии. Из эксплуатируемых в мире коренных объектов наиболее известны Лак Тио в Канаде с содержанием 28–32% TiO₂ и Телнес в Норвегии с содержанием

16–18% TiO₂. Находящиеся в распределенном фонде российские коренные объекты содержат существенно более бедные руды: Медведовское 7.03%, Большой Сейм — 7.67% [Государственный ..., 2021]. Крупные российские титановые объекты (Ярега и Пижемское на Тимане), долгое время относимые к россыпям, в настоящее время рассматриваются как коренные фреато-магматические с глубинным эндогенным источником рудного вещества [Макеев и др., 2022]. Содержание TiO₂ в рудах Пижемского месторождения 4.27%, в рудах Ярегского месторождения — 10.44%, но его руды являются трудно обогащаемыми.

Особенность российских месторождений состоит в том, что все известные у нас промыш-

ленные россыпные объекты, расположенные в пределах палеобассейнов Восточно-Европейской платформы и Западно-Сибирской плиты, относятся к формации ископаемых преимущественно прибрежно-морских россыпей, что влияет на методы проведения научно-исследовательских, прогнозно-поисковых, геологоразведочных и эксплуатационных работ [Патык-Кара, 2008]. Россыпные запасы составляют 3% от общероссийских балансовых запасов по титану и примерно 30% по цирконию [Государственный ..., 2021]. Но, во-первых, коренные объекты во многих случаях обладают труднообогатимыми рудами с низкими содержаниями полезного компонента, часто расположенными в удаленных труднодоступных районах, а, во-вторых, запасы россыпных месторождений достаточны для обеспечения текущих на уровне 2020 г. потребностей России на 50 лет по титану и 374 г. по цирконию.

Работами С.И. Гурвича и А.М. Болотова [1968], С.Н. Цимбала и Ю.А. Полканова [1975], Г.С. Момджи [1976], С.И. Гурвича [1978], А.Д. Савко [1996], Л.П. Рихванова [2001], Л.З. Быховского [2006, 2010], Н.Г. Патык-Кара [2002, 2008] и многих других исследователей были хорошо проработаны и решены проблемы контроля металлоносности РТР на историко-геологическом и региональном структурно-тектоническом уровнях. Был выявлен региональный характер источников россыпеобразующих минералов и принадлежность бассейнов россыпеобразования к тектонически стабильным областям — шельфовым морям пассивных континентальных окраин и внутренним крупным озерно-морским водоемам. Установлена приуроченность россыпей к главным эпохам развития кор глубокого химического выветривания, связь с зонами гумидного тропического и субтропического литогенеза, в результате чего в бассейны осадконакопления поступали большие объемы химически зрелого выветрелого обломочного материала. С точки зрения региональной геологии и минерагении РТР, обобщающим фундаментальным трудом стала последняя монография Н.Г. Патык-Кара “Минерагения россыпей: типы россыпных провинций” [2008], которая подытожила результаты этого этапа исследований.

Выявленные закономерности относились к объектам ранга мегапровинций и провинций. В тоже время, условия, определяющие локализацию и параметры россыпей в пределах россыпных районов, зон, узлов, полей и отдельных месторождений изучены в недостаточной степени.

В первую очередь это касается определения факторов локального контроля россыпной металлоносности и выявления тектонических режимов и механизмов образования промышленных россыпных концентраций, что определяет струк-

туру прибрежно-морских РТР и закономерности их сохранности в ископаемом состоянии. Это необходимо для создания поисково-ориентированной модели месторождения комплексных прибрежно-морских РТР: установление гидродинамических механизмов образования повышенных россыпных концентраций и литодинамических условий, оптимальных для проявления этих механизмов, а также структурно-тектонических обстановок, благоприятных для формирования и сохранности месторождений промышленного масштаба.

Прибрежно-морские РТР являются результатом длительного и многостадийного процесса дифференциации вещества в ходе осадочного процесса, результатом которого является формирование минерально зрелых, хорошо сортированных песчано-алевритовых толщ, обогащенных ТМ повышенной гипергенной устойчивости. Помимо прибрежно-морских, встречаются ильменитовые россыпи ближнего сноса аллювиального генезиса; иногда они имеют важное промышленное значение, как группа Иршинских россыпей Украины, но они существенно отличаются от прибрежно-морских по составу, структуре и условиям образования [Россыпные ..., 1997]. Существующие эоловые РТР генетически и пространственно связаны с прибрежно-морскими.

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИБРЕЖНО-МОРСКИХ РЕДКОМЕТАЛЛЬНО-ТИТАНОВЫХ РОССЫПЕЙ

Основными компонентами РТР является группа титановых минералов (ильменит, титаномагнетит и рутил), лейкоксена, который является композитной фазой, состоящей из сагенитовой решетки рутила и включений кварца, и циркон, все они (кроме лейкоксена) характеризуются высоким показателем гипергенной устойчивости [Шило, 2002; Elsher, 2005]. В ряде случаев в переменных количествах присутствуют монацит, устойчивые алюмосиликаты (дистен и силлиманит), брукит, сфен, гранаты и некоторые другие минералы, накапливающиеся в осадках в результате процессов гипергенеза и седиментогенеза. Иногда отмечается присутствие тонкого и мелкого золота [Матвеева и др., 2006] и алмазов [Черешинский, 2006].

В результате длительной истории существования в зоне гипергенеза под действием процессов выветривания, транспортировки и многократного переотложения материал, слагающий РТР, освобождается от неустойчивых компонентов, вследствие чего формируется новая минеральная ассоциация, состав которой определяется сходными физическими, химическими и гидродинамическими свойствами входящих в нее минералов.

Среди различных минеральных типов россыпных месторождений РТР выделяются также тем, что они — единственная группа россыпей, для которых имеет значение не столько тип источника питания, сколько объем переработанных пород, содержащих рудные минералы, степень их дезинтеграции и благоприятные гидро- и литодинамические условия бассейна осадконакопления [Паттык-Кара, 2008].

Отличительной особенностью вещественного состава прибрежно-морских РТР является хорошая сортированность вмещающего средне-мелкопесчаного — крупноалевритового материала и мелкие размеры полезных компонентов: ТМ содержатся в классе крупности 0.25–0.05 мм. В результате длительного и многоэтапного сосуществования в ходе процессов седиментогенеза ТМ и обломочные частицы вмещающих пород обладают одинаковой гидравлической крупностью (скоростью падения в водной среде), что во многом определяет специфику процессов образования этого типа россыпей.

Классический механизм образования россыпей ТМ основывается на разной гидравлической крупности россыпеобразующих компонентов и вмещающих пород [Шило, 2002]. В условиях одинаковой гидравлической крупности (равнопадаемости) образование концентраций ТМ происходит за счет разницы срывающих скоростей для разных частиц на поверхности осадка в придонном потоке [Лаломов, Таболич, 2011]. По мере нарастания скорости водной среды в придонном слое последовательно возникают следующие обстановки:

- 1) отсутствие движения частиц осадка;
- 2) начало движения легких частиц по поверхности;
- 3) начало движения тяжелых частиц по поверхности с переходом легких частиц во взвесь;
- 4) переход всего донного материала во взвешенное состояние.

Вторая и третья обстановки способствует возникновению остаточной и динамической концентрации, в четвертом случае происходит разрушение возникших концентраций. При выпадении из потока концентрирования ТМ не происходит в силу одинаковой гидродинамической крупности частиц. Для типичного мелкопесчаного-крупноалевритового размера частиц россыпеобразующих минералов и вмещающих отложений РТР, граничные скорости придонного потока для образования концентраций ТМ варьируют в пределах 10–25 см/с [Лаломов, Таболич, 2011]. Это обуславливает достаточно узкие рамки гидродинамических обстановок возникновения и литологические характеристики РТР.

ОСНОВНЫЕ ЛОКАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ РОССЫПЕОБРАЗОВАНИЯ

Региональные вещественные, палеоклиматические и тектонические факторы определяют принципиальную возможность образования РТР — наличие россыпеобразующих минералов в зоне денудации, разрушение неустойчивых минералов, сопровождаемое высвобождением и обогащением устойчивых в корях выветривания, а также умеренные тектонические режимы, способствующие длительному выветриванию в зоне сноса и многократному переотложению и обогащению ТМ в зоне аккумуляции. При этом наличие в этих областях прибрежно-морских россыпей с промышленными параметрами определяется наличием и благоприятным соотношением локальных геолого-динамических факторов.

Локальные факторы образования прибрежно-морских РТР можно объединить в четыре основных группы [Лаломов, 2011]:

- гидродинамические;
- литодинамические;
- структурно-динамические;
- трансгрессивно-регрессивные.

Гидродинамический фактор определяет как саму возможность образования РТР, так и тип возникающих россыпных объектов. Важную роль здесь играет наличие в гидродинамически активной зоне бассейна осадконакопления двух механизмов и соответствующих областей образования россыпных концентраций.

В прибрежной зоне скорость придонного потока возрастает от нижней границы волнового воздействия, где глубина соответствует приблизительно половине длины волны открытого моря (глубина H_0 , точка X_0), до зоны обрушения волны и забурунивания ($H_{кр}$, $X_{кр}$), и уменьшается до нуля в конце зоны заплеска в верхней части пляжа (X_{max}) (рис. 1).

Учитывая узкий интервал придонных скоростей, благоприятных для образования концентраций ТМ, можно выделить две россыпеобразующих зоны: литоральную (пляжевую) и мелководно-морскую с умеренной гидродинамикой (сублитораль).

Эти зоны россыпеобразования имеют существенные различия по литологическому составу вмещающих отложений и россыпеобразующих компонентов, по морфологии образуемых россыпных проявлений и по механизмам концентрации ТМ.

Зона литорали характеризуется относительно крупными размерами ТМ (в большинстве случаев их основная часть содержится в классе 0.25–0.1 мм), пониженной глинистостью отложений и узкой (ограниченной зоной заплеска), вытянутой вдоль береговой линии, часто невыдержанной по про-

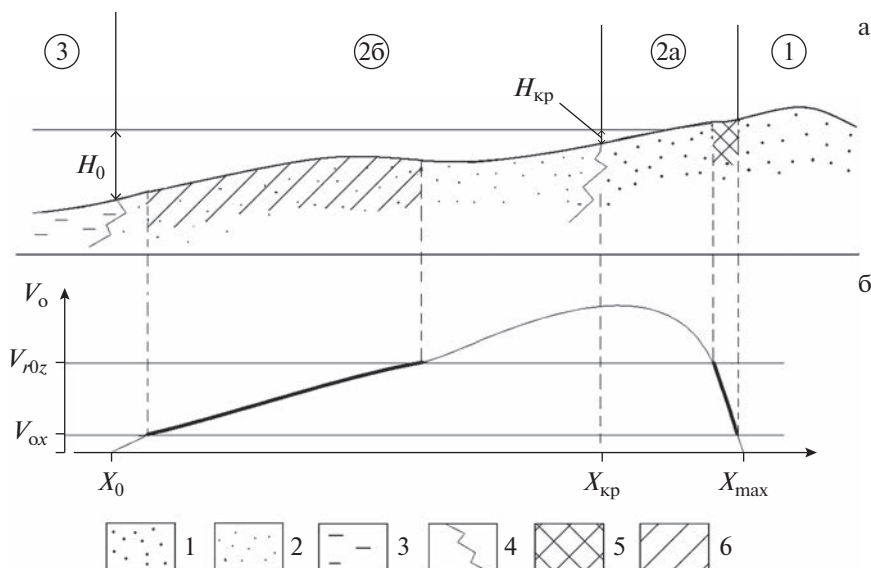


Рис. 1. Схема россыпеобразования прибрежно-морских РТР в береговой зоне бассейна ([Лаломов, 2011] с изменениями).

а — схематический поперечный профиль береговой зоны: 1 — область надводного пляжа выше области волнового воздействия; 2 — область гидродинамического воздействия; 2а — зона литорали, 2б — зона мелководья с умеренной гидродинамикой (сублитораль); 3 — область крайне слабого волнового воздействия; H_0 — максимальная глубина волнового воздействия; $H_{кр}$ — глубина зоны бурунов и разрушения волны;

б — качественный график распределения придонных скоростей (V_0) на поперечном профиле береговой зоны с динамическими границами концентрации ТМ. V_{0x} — минимальная срывающая скорость для безрудных частиц; V_{0z} — скорость перехода во взвесь частиц ТМ; X_0 — точка начала воздействия потока на донные осадки; $X_{кр}$ — точка зоны бурунов с максимальными скоростями; X_{max} — конец зоны заплеска.

1 — пески средне-мелкозернистые; 2 — пески тонкозернистые — грубые алевриты; 3 — алеврит мелкозернистый; 4 — фациальные границы литологических разностей осадков; 5 — концентрации ТМ в литоральной зоне; 6 — концентрации ТМ в зоне мелководья.

стиранию формой россыпных проявлений. Содержание ТМ в пляжевой зоне могут достигать десятков процентов (сотен килограмм на кубический метр). В зарубежной литературе они характеризуются как “beach” или “strand placers” [Row, Whitehouse, 2003]. Типичным примером этого типа является современная литоральная россыпь Чавара в Индии [Sitdikova et al., 2017], или сарматские (миоценовые) россыпные тела ископаемого Малышевского месторождения Украины [Ганжа и др., 2019].

В зоне мелководья концентрируются преимущественно ТМ класса менее 0.1 мм, во вмещающих отложениях отмечается повышенное содержание глинисто-алевритовых классов, россыпные проявления имеют пространственно более выдержанную и более изометричную форму, что соответствует параметрам сублиторальных фаций. Содержание полезных компонентов в россыпях сублиторали, как правило, меньше, чем на пляже, при этом запасы месторождений значительно больше. В формировании россыпей этого типа основную роль играют придонные течения ветро-волновой природы. В зарубежной литературе они называются “off-shore placers”. К этому типу относятся месторождения-гиганты, такие

как WIM-150 в Австралии [Hou et al., 2009] и Центральное в Восточно-Европейской редкометалльно-титановой мегапровинции [Левченко, 2006].

При весьма широком спектре гидродинамических обстановок можно выделить три режима, которые определяют основные условия россыпеобразования.

1. При устойчивом активном гидродинамическом режиме акватории при преобладании в зоне литорали волнения типа зыби, а в зоне мелководья течений ветро-волновой природы, в бассейне наблюдаются россыпи полного профиля, в которых более крупные классы ТМ концентрируются в зоне палеопляжа, относительно мелкие — в зоне сублиторали.

2. В замкнутых окраинных и внутренних бассейнах с неустойчивым гидродинамическим режимом преобладающим типом являются волнения штормовой природы. Нерегулярные параметры волн не способствуют устойчивому концентрированию ТМ, поэтому россыпи литоральной зоны в таких условиях не образуются или представлены невыдержанными телами с невысоким и неравномерным содержанием полезного компонента. При этом на мелководье присутствуют постоянно



Рис. 2. Гидродинамический фактор образования прибрежно-морских РТР.

1 – положительное действие фактора; 2 – нейтрально-отрицательное действие фактора.

действующие течения ветро-волновой природы, которые создают условия для концентрации ТМ в зоне сублиторали.

3. Отсутствие регулярного установившегося гидродинамического воздействия обоих типов (устойчивых волнений и течений) неблагоприятно влияет на потенциал бассейна россыпеобразования.

Таким образом, гидродинамика бассейна определяет принципиальную возможность россыпеобразования и тип формируемых россыпей на поперечном по отношению к береговой линии профиле бассейна (рис. 2).

Гидродинамический режим действует как в масштабе россыпных тел и месторождений, так и в микромасштабе в пределах водоемов, размеры которых измеряются метрами и десятками метров (рис. 3), что указывает на возможность экспериментального моделирования процесса образования РТР.

Литодинамический фактор определяет динамическое состояние береговой зоны и локализацию россыпных тел по простираанию побережья в зависимости от его абразионно-аккумулятивного состояния. Литодинамический фактор определяет соотношение баланса поступающего и выносимого в элементарной ячейке береговой зоны обломочного материала. В случае, когда вынос материала преобладает над поступлением, наблюдается дефицит наносов, вследствие чего преобладает абразия берега и подводного берегового склона. В этой ситуации на участке поступления во вдольбереговой поток россыпеобразующих ТМ (такая ситуация возникает в зоне дельтовых выносов или выходов в абрадируемом клифе отложений промежуточных коллекторов) может наблюдаться образование повышенных концентра-

ций ТМ за счет выноса глинистой составляющей и, в меньшей мере, шлихования в волноприбойном потоке [Лаломов и др., 2016].

Такой механизм характерен, в первую очередь, для классических россыпей ближнего сноса (в основном, золота, касситерита и минералов платиновой группы), но для РТР, в большинстве случаев, дефицит наносов на участках абразии неблагоприятен для концентрирования ТМ: если в зоне источника (зона палеодельты или размываемого промежуточного коллектора) возможно некоторое увеличение концентраций, как правило, не достигающее промышленных значений, то вне зоны источника идет разбавление потока наносов нерудным материалом и концентрация россыпеобразующих компонентов в потоке уменьшается.

На участках транзита наблюдается совпадение емкости и мощности потока наносов, что приводит к стабилизации береговой линии. При установившемся режиме создается модель “трубы”, в которой осредненная концентрация ТМ в потоке в первом приближении не меняется.

Наиболее благоприятной для образования прибрежно-морских РТР является зона аккумуляции, где наблюдается торможение потока наносов и возрастает интенсивность обогащения осадка ТМ за счет процессов шлихования, что приводит к значительному увеличению содержания россыпеобразующих минералов (рис. 4).

При этом в условиях однонаправленного потока определяющую роль играет экспозиция береговой линии по отношению к преобладающему ветроволновому воздействию. Когда оно направлено под острым углом к берегу (α близко к 45°), мощность потока достигает максимальных величин, процесс шлихования сопровождается значительным смещением отложений по потоку вдоль



Рис. 3. Естественно-природная модель образования двух типов россыпных концентраций тяжелых минералов (пляжевой и мелководной) в водоеме в песчаном карьере (Зауральский россыпной район). 1 – зона поступления материала “дельта”, 2 – “пляжевая” концентрация, 3 – “мелководная” концентрация (фото А.В. Лаломова).





Рис. 5. Структурно-динамические факторы формирования прибрежно-морских РТР.
1 – положительное действие фактора; 2 – нейтрально-отрицательное действие фактора.

берега, что не способствует образованию промышленных россыпных концентраций.

Наиболее благоприятны для образования повышенных шлиховых концентраций в литодинамическом отношении участки направления ветроволнового воздействия по нормали к берегу (α близко в 90°) или в зоне конвергенции (встречном схождении) потоков наносов, где суммарное перемещение и обогащение осадка ТМ максимально по отношению к его результирующему вдольбереговому смещению в потоке. Такая литодинамическая ситуация приводит к многократному перемыву и концентрированию ТМ в потоке без значительного вдольберегового перемещения. Для ископаемых россыпей обстановка экспозиции берега может быть установлена путем создания роз-диаграмм косой слоистости и расчета их асимметрии [Берто и др., 2011], что позволяет учитывать этот фактор при оценке перспектив россыпеобразования палеобассейнов. На перспективность участка указывает строение розы-диаграммы косой слоистости близкое к симметричному.

Таким образом, образование прибрежно-морских РТР наблюдается на участках побережий с аккумулятивным режимом, при котором мощность вдольберегового потока наносов превышает его емкость, в результате чего скорость потока падает, и избыточная часть наносов отлагается в зоне пляжа и подводного берегового склона. При этом наиболее благоприятными являются зоны, где преобладающее ветроволновое воздействие направлено по нормали к берегу или в зонах кон-

вергенции, что способствует многократной переработке обломочного материала без смещения в потоке, устойчивому обогащению и накоплению ТМ в зоне пляжа и подводного берегового склона [Лаломов, 2011].

Структурно-динамические факторы контролируют наличие в области россыпеобразования структур, которые играют роль седиментационных ловушек, определяющих наличие и тип россыпеконтролирующих структур, а также характеристики зоны концентрации ТМ (рис. 5). К ним относятся тектонические структуры (выходы консолидированного основания платформ и сводово-купольные структуры осадочного чехла), наличие в геологическом строении побережья более устойчивых в эрозионном отношении вулканогенных, магматогенных или метаморфических пород, аккумулятивные формы (дельтовые выступы речных водотоков), биогенные образования рифовых массивов, а также другие возможные структуры, нарушающие монотонное строение побережья.

При наличии благоприятных факторов для образования прибрежно-морских РТР, но монотонном строении побережья образуется “модель трубы”: металлоносный материал смещается во вдольбереговом потоке наносов без существенного концентрирования и накопления до тех пор, пока не происходит нарушение монотонности, вызванное наличием структурно-седиментационной ловушки. В таких зонах происходит не только обогащение отложений ТМ, но и накопле-

ние промышленно значимых по объему россыпных тел.

Такая ситуация является частным случаем общей геологической закономерности: месторождения полезных ископаемых формируются, как правило, в условиях нарушения монотонности вмещающей среды и/или протекающих в ней процессов.

Все структурно-седиментационные ловушки можно разделить на пассивные и активные по отношению к геоморфологическому строению и литодинамическим процессам побережья.

Пассивный тип структурных ловушек связан с жесткими фиксированными блоками, в пределах которых тектонические движения отсутствуют (морфоструктурные ловушки). Изменение ориентировки береговой линии, обусловленное наличием в береговой зоне выходов устойчивых к абразии пород, дельтовых выступов рек и рифовых массивов изменяет экспозицию берега и несущую способность потока. Происходит торможение потока и, вследствие этого, интенсивный перемыв материала в береговой зоне и концентрация ТМ в небольших по мощности, но богатых по содержанию продуктивных пластах.

Типичными морфоструктурными ловушками пассивного типа являются береговые выступы, расположенные на побережье Восточно-Австралийской россыпной провинции, представленные дельтовыми выносами рек и массивами третичных базальтов. Практически все прибрежно-морских РТР современного побережья этой провинции, локализованные в пределах дугообразных участков побережья, так или иначе связаны с пассивными ловушками морфоструктурного типа [Hughes, 1990]. Для россыпей Бешпагирской группы Ставропольского россыпного района роль морфоструктурной ловушки играли мшанковые органогенные постройки обрамления Ставропольского свода [Бойко, 2004].

К активным ловушкам относятся области дифференцированных тектонических движений в обрамлении сводово-купольных структур, где на продолжительный срок (по отношению к трансгрессивно-регрессивным процессам) происходит фиксация пространственной позиции фациально-литодинамических зон (структурно-тектонические ловушки). Во внутренних частях поднятий, где преобладают умеренно-положительные неотектонические (палеотектонические) движения, на длительный период фиксируются обстановки денудации, где происходит разрушение и снос в береговую зону слабо металлоносного материала промежуточных коллекторов. На периферии поднятий в зоне литорали и прибрежного мелководья в области преобладания нейтрально-отрицательных движений происходят перемыв, обогащение и аккумуляция россыпеобразующего

материала, что приводит к образованию не всегда богатых, но значительных по мощности толщ продуктивных отложений.

Примерами влияния структурно-тектонических ловушек активного типа является Умыттинская россыпь Зауральского россыпного района, связанная с положительными тектоническими структурами Лемьинского и Северо-Умыттинского куполов, образовывавшими выступ береговой линии олигоценного бассейна (рис. 6) [Лаломов и др., 2017].

Отсутствие структурно-седиментационных ловушек приводит к рассеянию сформированных россыпных концентраций в области миграции береговой линии. В береговой зоне бассейнов происходит концентрирование ТМ, но в результате значительного смещения зоны россыпеобразования промышленных (по объему запасов и мощности пласта) залежей не образуется; в строении прибрежно-морских отложений палеобассейна мы встречаем либо общую непромышленную зараженность тяжелыми россыпеобразующими минералами, либо относительно обогащенный, но небольшой по мощности рудный пласт, отвечающий периоду стабилизации береговой линии.

Таким образом, структурно-динамический фактор определяет локализацию и процесс формирования промышленных по запасам прибрежно-морских РТР в условиях благоприятной гидро- и литодинамической обстановки.

Трансгрессивно-регрессивный режим бассейна россыпеобразования и его особенности влияют на структуру продуктивного пласта, характер постседиментационных преобразований и консервации сформированных россыпных объектов в условиях трансгрессивно-регрессивных режимов различного знака и периодичности, что, в конечном итоге, определяет структуру и степень сохранности ископаемых прибрежно-морских РТР (рис. 7).

Хотя весь процесс от дезинтеграции и мобилизации вещества в корях выветривания, осложненный образованием промежуточных коллекторов, может занимать время, сопоставимое с продолжительностью геологических периодов, непосредственный процесс формирования толщи продуктивных отложений может происходить в ограниченные сроки. В таких условиях можно выделить четыре характерных трансгрессивно-регрессивных режима: образование россыпей на стадии развития трансгрессий или регрессий, имеющих монотонный характер, а также осложненный колебательными движениями или фазами стабилизации.

В условиях монотонных трансгрессивно-регрессивных изменений уровня бассейна при отсутствии структурно-седиментационных ловушек происходит последовательное смещение зо-

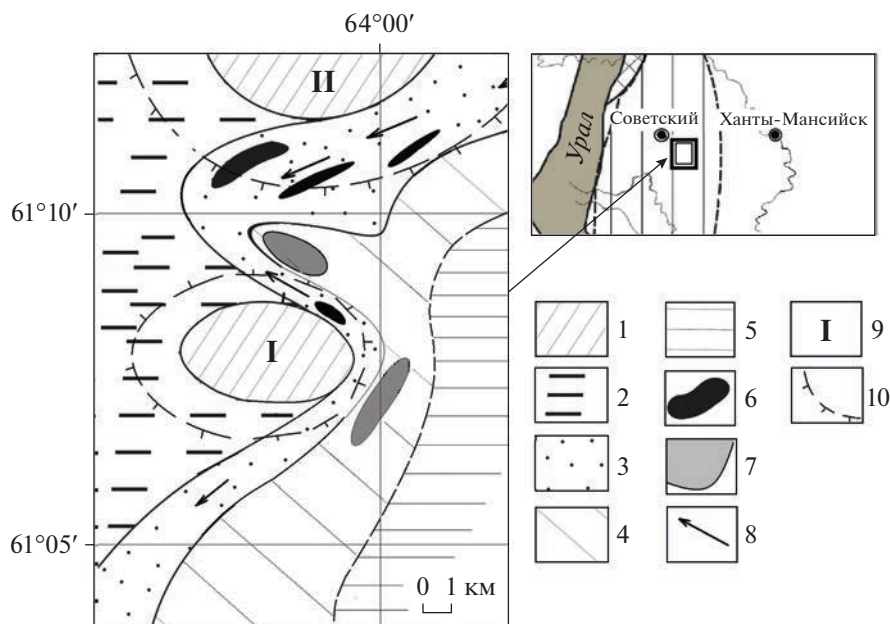


Рис. 6. Фациально-литодинамическая схема района Умытинской россыпи с элементами россыпной металлоносности ([Лаломов и др., 2017] с изменениями).

1 – среднекуртамышский комплекс (олигоцен): отложения промежуточного коллектора; 2–5 – верхнекуртамышский комплекс (олигоцен): 2 – зона палеodelты, 3 – зона литорали, 4 – зона динамически активного мелководья, 5 – зона мелководья с умеренной гидродинамикой; 6, 7 – повышенные россыпные концентрации: 6 – литорального типа, 7 – мелководного типа; 8 – направления вдольберегового потока наносов; 9 – сводово-купольные структуры; I – Лемьинский купол, II – Северо-Умытинский купол; 10 – границы сводово-купольных структур на уровне подошвы продуктивных отложений.



Рис. 7. Трансгрессивно-регрессивный режим бассейна россыпеобразования.

1 – положительное действие фактора; 2 – нейтрально-отрицательное действие фактора.

ны россыпеобразования, при этом формируется маломощный слабо металлоносный слой, имеющий широкое распространение.

Более благоприятными являются ситуации, когда на фоне общей трансгрессии или регрессии бассейна происходят колебательные движения

уровня или периодическая стабилизация береговой линии.

При общем преобладании трансгрессивного режима в процессе повышения уровня бассейна происходит накопление металлоносных отложений, которые перебиваются и обогащаются во

время последующего стабилизационного или регрессивного эпизода. Следующая за ним трансгрессивная фаза колебаний захоранивает обогащенный слой и перекрывает его новой толщей слабо металлоносных осадков, которые впоследствии также могут быть частично перемыты и обогащены. В результате этого образуется достаточно мощный (десятки метров) россыпной пласт сложного строения, в котором обогащенные прослои чередуются со слабо металлоносными, не подвергшимися переработке на фазе регрессии. Примером такой обстановки является россыпь Центральная Восточно-европейской мегапровинции [Патык-Кара и др., 2004].

При смещении береговой линии соответственно смещаются и зоны россыпеобразования. В результате этого один россыпной пласт может распространяться на разные стратиграфические уровни, а в вертикальном разрезе мы встречаем ту же фациальную зональность, что и в горизонтальном. Выявленная закономерность строения россыпей отражает закон смены фаций Головкинского (одинаковой смены фациальной зональности по простираанию толщи и в вертикальном направлении) применительно к россыпям. При трансгрессивном режиме нижний пласт несет черты россыпи литорали, верхний — мелководных фаций [Лаломов и др., 2010а].

В условиях преобладания регрессивного режима на фоне умеренных колебательных движений металлоносные отложения перемиываются и переоткладываются на более низкий уровень. Пляжевые россыпи при регрессии бассейна сохраняются в пределах аккумулятивных береговых террас или переотлагаются в зону нового пляжа за счет процессов эрозии приморской суши. В случае сохранности береговых террас россыпи палеопляжей образуют серию ступенеобразно расположенных россыпных тел, фиксирующих уровни стояния палеобассейна. В ископаемом состоянии такие россыпи (Гингко, Уимен и др.) известны в пределах бассейна Марри-Бейсин, Австралия [Towner, 1996; Mason, 1999].

Оказавшиеся в зоне литорали в результате регрессии мелководные отложения повторно перемиываются, ТМ дифференцируются по степени крупности, при этом более крупные (как правило, больше 0.1 мм) остаются в зоне литорали, мелкие зерна ТМ выносятся на мелководье, где образуют новые маломощные, но относительно богатые сублиторальные россыпные тела.

ВЗАИМООТНОШЕНИЕ И ВЗАИМОСВЯЗЬ ВЫДЕЛЕННЫХ ФАКТОРОВ РОССЫПЕОБРАЗОВАНИЯ

Наличие РТР с промышленными параметрами определяется не только положительным влиянием

отдельных факторов, но, в первую очередь, их взаимосвязью и оптимальным сочетанием на отдельных этапах развития процесса формирования россыпей. В такой ситуации решение задач прогнозирования РТР на локальном уровне возможно только на основании комплексного изучения геологических обстановок, в пределах которых выявленные факторы соотносятся оптимальным образом, как в пространственном, так и во временном эволюционном плане. В пределах крупных россыпеобразующих областей ранга провинций и районов, существование которых контролируется региональной тектонической структурой, геологическим строением, историей развития и палеоклиматом, конечное образование и локализация россыпных полей, месторождений и отдельных тел происходит только при оптимальном соотношении локальных геолого-динамических условий.

Для каждого из выделенных факторов можно определить свою область преобладающего действия. Так, гидродинамический фактор влияет на дифференциацию обломочного материала преимущественно в поперечном по отношению к береговой линии бассейна направлении.

Этот фактор определяет механизмы дифференциации материала и характеристики образующихся россыпных концентраций.

а) Параметры россыпных тел. Они в значительной мере определяются фациальными особенностями области концентрации тяжелой фракции отложений. Россыпи литоральной зоны обычно представлены удлиненными по направлению палеобереговой линии телами шириной от десятков до первых сотен метров и длиной до первых километров, контрастно выраженными по содержанию на фоне окружающих отложений, где концентрация полезных компонентов близка к фоновым. Так для богатых литоральных сарматских россыпных тел Малышевского месторождения фоновые содержания встречаются на удалении десятков метров от промышленного контура [Цымбал, Полканов, 1975]. Параметры литоральных РТР соответствуют мелким и средним месторождениям с повышенным содержанием полезного компонента.

Россыпи мелководной зоны обычно более выдержаны в пространстве и более изометричны по форме в соответствии с параметрами мелководных фаций. Границы их менее контрастны, для них характерны плавные переходы к вмещающим непромышленным отложениям, где граница месторождений не выражена литологически и устанавливается на основании экономических критериев. Россыпи сублиторали часто образуют крупные и суперкрупные месторождения ископаемых РТР [Патык-Кара, Быховский, 2010].

б) Гидродинамические условия определяют технологические характеристики продуктивного пласта, поскольку от механизма концентрирования ТМ зависит крупность, как вмещающих песчаных отложений, так и тяжелой фракции, а также глинистость осадка. В россыпях литорали концентрируются, как правило, ТМ размером более 0.1 мм, отложения характеризуются более крупным классом песчаного материала и пониженной глинистостью. В россыпях сублиторали ТМ концентрируются в классе 0.1–0.05 мм, в составе вмещающих отложений преобладают мелко-тонкопесчаные — крупноалевритовые классы с повышенным содержанием глинистых частиц до 10–20% [Лаломов и др., 2010б].

Таким образом, при общих благоприятных условиях россыпеобразования регионального масштаба (тектонических, палеоклиматических и др.), гидродинамика бассейна определяет — какой тип россыпных концентраций будет преобладать в пределах исследуемого палеобассейна. При преобладании устойчивого волнового гидродинамического режима и наличии на мелководье придонных течений образуются россыпи полного профиля с присутствием как литоральных, так и сублиторальных фаций. При преобладании неустойчивого волнового воздействия, но наличии течений на мелководье, образуются месторождения, на которых преобладают продуктивные отложения сублиторального типа. При неустойчивой литодинамике акватории промышленных россыпных концентраций не образуется.

Возможно, именно гидродинамический фактор определяет преобладание в пределах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской мегапровинций россыпей сублиторального типа, поскольку в существовавших там мелководных морских и крупных озерных бассейнах редко возникали условия для устойчивого волнового воздействия типа “зыби”, которое характерно для открытых океанических бассейнов.

Поскольку гидродинамические условия имеют значительное влияние на параметры и свойства россыпных концентраций, реконструкция гидродинамики палеобассейнов играет весьма важную роль при прогнозировании объемов месторождений, их технологических свойств и планировании параметров геолого-поисковой сети.

Литодинамическая обстановка россыпеобразования, определяемая соотношением емкости и мощности потока наносов, оказывает максимальное влияние в продольном по отношению к береговой линии направлении и определяет локализацию россыпных концентраций по отношению к морфологическим элементам и абразионно-аккумулятивной зональности побережья. В зависимости от действия этого фактора россыпные концентрации, возникающие в гидродинамиче-

ски благоприятных зонах, могут мигрировать в пределах береговой зоны, или, наоборот, образовывать крупные и богатые россыпные тела. В той степени, в какой неоднородности строения побережья (выходы устойчивых к абразии пород, локальные валы и сводово-купольные тектонические структуры, дельтовые выступы рек и т.д.) контролируют литодинамику побережья, они оказывают влияние на процесс россыпеобразования.

Два первых фактора (гидродинамический и литодинамический) определяют россыпеобразование в пределах активного слоя наносов, который, как правило, не превышает 1–2 м, и только структурно-динамический фактор определяет возможность превращения этих россыпных концентраций в промышленные по масштабу запасов месторождения. Создавая условия для долговременной фиксации благоприятных для россыпеобразования обстановок, структурно-динамический фактор определяет — превратятся ли россыпные концентрации активного слоя наносов в крупные по запасам промышленные месторождения или останутся россыпепроявлениями, имеющими исключительно научный интерес. При дифференцированных тектонических движениях в краевых частях сводово-купольных структур, валов, флексурных перегибов, береговая линия стабилизируется на длительный срок, что создает оптимальные условия для образования крупных по запасам и богатых по содержаниям промышленных россыпей полного профиля, в которых присутствуют как литоральные, так и сублиторальные россыпные тела.

Фактор трансгрессивно-регрессивного режима преобразует сформированные россыпные тела, определяя их конфигурацию в результате совместного воздействия эвстатических, тектонических, эрозионно-осадочных и гидродинамических процессов. Вследствие этого, россыпные концентрации, одинаковые по фациально-литодинамическим признакам, в результате преобладающего трансгрессивно-регрессивного режима получают окончательный облик, который мы встречаем, исследуя ископаемые РТР. Большую роль здесь играет соотношение скорости изменения уровня бассейна россыпеобразования со скоростями эрозии приподнятых блоков и накопления материала в пределах зон с нейтрально-отрицательным тектоническим режимом. Оптимальные соотношения возникают в случае, когда поступающий в береговую зону материал успевает перерабатываться в гидродинамически активной зоне, обогащаться и накапливаться в виде промышленного пласта россыпи, что происходит при приблизительно равном равенстве скоростей опускания дна бассейна и осадконакопления [Лаломов, 2011].

Области действия этих факторов частично перекрываются: гидродинамический и структурно-

динамический факторы оказывают влияние на литодинамику, которая, в свою очередь, меняет морфологию побережья и, соответственно, гидродинамический режим. Фактор трансгрессивно-регрессивного режима вместе с структурно-динамическим фактором влияют на формирование промышленных (по объему запасов и мощности пласта) залежей и т.д., но, тем не менее, у каждого из них есть своя максимальная “зона ответственности”, и только совместная реализация положительного потенциала всех факторов приводит к формированию ископаемых россыпных объектов промышленного масштаба [Рундквист, Кравченко, 1996; Laznichka, 1983].

В целом, выделенные факторы формируют многомерную взаимозависимую систему, которую можно охарактеризовать как единый геолого-динамический континуум, в котором первые три фактора отвечают за пространственный контроль россыпной металлоносности, а трансгрессивно-регрессивный — за временные трансформации образованных россыпей в период седиментации и последующей геологической истории. В этой четырехмерной системе координат РТР с промышленными параметрами занимают строго ограниченную область, и при переходе к количественной оценке этих факторов предложенная качественная модель может служить основой для создания цифровой методики прогнозирования потенциала россыпной редкометалльно-титановой минерализации. Аналогичные методики разрабатываются в области цифрового прогнозирования редкометалльных россыпей ближнего сноса [Чефранов и др., 2023] и проявлений коренной золоторудной минерализации [Лаломов и др., 2020; Mami Khalifani et al., 2023].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Редкометалльно-титановые прибрежно-морские россыпи являются основным в мире источником титана и циркония. В настоящее время существует необходимость цифровизации процесса оценки перспектив россыпной металлоносности этого типа. Для России эта проблема осложняется тем, что на территории Восточно-Европейской и Западно-Сибирской мегапровинций присутствуют погребенные ископаемые россыпи, приуроченные, преимущественно, к мезозой-кайнозойским палеобассейнам.

С этой целью в настоящее время разрабатывается качественная поисково-ориентированная геолого-динамическая модель редкометалльно-титанового россыпного месторождения с промышленными параметрами, которая может служить основой для процесса цифровизации прогнозирования.

Для решения этой задачи были проанализированы локальные факторы формирования прибрежно-морских РТР, исследовано их влияние на структуру, состав, локализацию россыпных концентраций в пределах бассейнов осадконакопления, а также динамическое взаимодействие этих факторов в процессе образования продуктивных отложений. Выделенные факторы — гидродинамический, литодинамический, структурно-динамический и фактор трансгрессивно-регрессивного режима бассейна охватывают широкий спектр условий, определяющий перспективы образования прибрежно-морских РТР промышленного масштаба, которые формируются только в результате их оптимального сочетания.

Предложенная качественная модель может служить основой для создания цифровой методики прогнозирования россыпного потенциала россыпной редкометалльно-титановой минерализации.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берто Г., Лаломов А.В., Тугарова М.А. Реконструкция палеолитодинамических условий формирования кембро-ордовикских песчаников северо-запада Русской платформы // Литология и полез. ископаемые. 2011. № 1. С. 67–79.
- Бойко Н.И. Титан-циркониевые россыпи Ставрополя // Литология и полез. ископаемые. 2004. № 6. С. 602–609.
- Быховский Л.З., Тигунов Л.П. Перспективы освоения минерально-сырьевой базы титано-циркониевых россыпей России // Титано-циркониевые месторождения России и перспективы их освоения. М: ИГЕМ РАН, 2006. С. 7–10.
- Ганжа Е.А. Лаломов А.В., Чефранова А.В. и др. Структурно-литологическая геолого-генетическая модель и минеральный состав Краснокутского редкометалльно-титанового россыпного месторождения (Украина) // Литология и полез. ископаемые. 2019. № 6. С. 540–556.
- Государственный доклад “О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году”. М.: ВИМС-ЦНИГРМ, 2021. 568 с.
- Гурвич С.И. Закономерности размещения редкометалльных и оловоносных россыпей. М.: Недра, 1978. 228 с.
- Гурвич С.И., Болотов А.М. Титано-циркониевые россыпи Русской платформы и вопросы поисков. М.: Недра, 1968. 185 с.
- Лаломов А.В., Бочнева А.А., Чефранов Р.М. и др. Литолого-фациальное районирование и титан-циркониевая металлоносность Мансийской и Северо-Сосьвинской площадей Зауральского россыпного района // Литология и полез. ископаемые. 2010а. № 4. С. 370–382.
- Лаломов А.В., Григорьева А.В., Магазина Л.О. Разработка технологии микропалеофациального анализа для

оптимизации поисково-разведочных работ // Разведка и охрана недр. 2010б. № 3. С. 11–17.

Лаломов А.В. Локальные геолого-динамические факторы формирования комплексных прибрежно-морских россыпей тяжелых минералов / Дисс. ... доктора геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2011. 296 с.

Лаломов А.В., Таболич С.Э. Механизмы формирования концентраций титан-циркониевых минералов прибрежно-морских россыпей сублиторальной зоны // Ученые записки Казанского ун-та. Сер. Естеств. науки. 2011. Т. 153. № 4. С. 232–242.

Лаломов А.В., Таболич С.Э., Чефранов Р.М. Геолого-динамическое моделирование образования прибрежно-морских оловянных россыпей на примере Восточного сектора Арктики России // Геология рудных месторождений. 2016. № 2. С. 120–133.

Лаломов А.В., Левченко Е.Н., Бочнева А.А. Геолого-статистический анализ результатов технологического картирования редкометалльно-титановой россыпи Зауральского россыпного района // Разведка и охрана недр. 2017. № 2. С. 10–17.

Лаломов А.В., Бочнева А.А., Чефранов Р.М. Разработка цифровой системы прогнозирования коренных источников золота по результатам шлихового опробования на примере Вагранского россыпного узла (Северный Урал) // Георесурсы. 2020. № 22(2). С. 67–76.
<https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.67-76>

Левченко Е.Н. Особенности вещественного состава титан-циркониевых россыпей России // Литология и полез. ископаемые. 2006. № 2. С. 134–153.

Макеев А.Б., Брянцианова Н.И., Красоткина А.О. Уникальные титановые месторождения Тимана: проблемы генезиса и возраста // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 275–289.
<https://doi.org/10.31897/PMI.2022.32>

Матвеева К.В., Филиппов В.П., Осауленко О.В. и др. Золотороссыпной потенциал титано-циркониевых месторождений Русской платформы и перспективы его реализации // Титано-циркониевые месторождения России и перспективы их освоения. М.: ИГЕМ РАН, 2006. С. 36–39.

Патык-Кара Н.Г. Россыпи в системе седиментогенеза // Литология и полез. ископаемые. 2002. № 5. С. 494–508.

Патык-Кара Н.Г. Минерагения россыпей: типы россыпных провинций. М.: ИГЕМ РАН, 2008. 528 с.

Патык-Кара Н.Г., Гореликова Н.В., Бардеева Е.Г. К истории формирования Центрального месторождения титано-циркониевых песков в европейской части России // Литология и полез. ископаемые. 2004. № 6. С. 585–601.

Патык-Кара Н.Г., Лаломов А.В., Бочнева А.А. и др. Предпосылки формирования титан-циркониевых месторождений Зауральского россыпного района: региональная геолого-эволюционная модель // Литология и полез. ископаемые. 2009. № 6. С. 598–613.

Патык-Кара Н.Г., Быховский Л.З. Размещение крупных титано-циркониевых россыпных месторождений на территории России: факторы регионального контроля // Труды Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. М.: ИГЕМ РАН, 2010. С. 122–142.

Рихванов Л.П., Кропанин С.С., Бабенко С.А. и др. Циркон-ильменитовые месторождения как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона. Кемерово: ООО “САРС”, 2001. 214 с.

Россыпные месторождения России и других стран СНГ. Минерагения, промышленные типы, стратегия развития минерально-сырьевой базы / Отв. ред. Н.П. Лаверов, Н.Г. Патык-Кара. М.: Научный мир, 1997. 479 с.

Рундквист Д.В., Кравченко С.М. Промышленные суперконцентрации металлов в литосфере // Геология рудных месторождений. 1996. № 3. С. 298–303.

Савко А.Д., Беляев В.И., Иконников Н.Н. и др. Титан-циркониевые россыпи Центрально-Черноземного района. Воронеж: ВГУ, 1995. 148 с.

Цымбал С.Н., Полканов Ю.А. Минералогия титано-циркониевых россыпей Украины. Киев: Наукова думка, 1975. 248 с.

Черешинский А.В. Характеристика алмазов из Волчинской циркон-титановой россыпи // Титано-циркониевые месторождения России и перспективы их освоения. М.: ИГЕМ РАН, 2006. С. 78–81.

Чефранов Р.М., Лаломов А.В., Чефранова А.В. Поисково-ориентированная методика численного прогнозирования редкометалльных россыпей ближнего сноса на примере Ловозерского россыпного района // Геология рудных месторождений. 2023. № 2. С. 138–151.

Шило Н.А. Учение о россыпях. Владивосток: Дальнаука, 2002. 576 с.

Elsher H. Heavy minerals of economic importance. Hannover: BGR Publishers, 2005. 218 p.

Hou B., Keeling J., Reid A. et al. Depositional and Prospective Models of Beach Placers in the Eucla Basin, Southern Australia // Proceedings of the 4-th IGCP-514 conference “Fluvial palaeo-systems: Evolution and mineral deposits” (Guilin, China, 14–18 October, 2009). 2009. P. 32–39.

Laznicka P. Giant ore deposits: a quantitative approach // Global Tect. and Metallogeny. 1983. V. 2. № 1–2. P. 41–63.

Mami Khalifani F., Imamalipour A., Barak S. et al. The Application of Various Mineral Prospectivity Modeling in the Exploration of Orogenic Gold Deposit in Saez-Sardasht Region, Northwest Iran // Lithology and Mineral Resources. 2023. № 4.

Mason T. Exploration to mining – RZM at Wemen // Murray Basin Mineral Sands Conference, Mildura, 21–23 April. 1999. Extended Abstracts. Victoria Park: Australian Institute of Geoscientists, 1999. № 26. P. 70–77.

Row P.S., Whitehouse J. Changing Pliocene Sea levels and the formation of heavy minerals beach placers in the Murray basin, Southeastern Australia // Economic Geology. 2003. V. 98. № 5. P. 975–983.

Several papers on mineral sands, in Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea / Ed. F.E. Hughes // Australasian Institute of Mining and Metallurgy Monograph 14. 1990. P. 1587–1609.

Sitdikova L.M., Ibragimov E.A., Vakhin A.V. Mineralogical and geochemical features of the black sands of the southwest coast of India // 17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017. Conference proceedings. Bulgaria, Albena, 2017. С. 345–352.

Towner R.R. Australia’s resources of mineral sands – their future diversity the key to prosperity // The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series. 1996. № 1. P. 375–384.

Local Factors of Coastal-Marine Rare-Metal-Titanium Placers Formation

A. V. Lalomov^{1, 2, *}

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM) RAS,
Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia*

²*Permian State University, Bukireva str., 15, Perm, 614990 Russia*

**e-mail: lalomov@mail.ru*

Local factors of formation of coastal-marine rare-metal-titanium placers were analyzed for creation of the search-oriented geological-dynamic model that allows predicting the prospects of rare-metal-titanium placer mineralization. The influence of the factors on the structure, composition, localization of placer concentrations within sedimentation basins, as well as the dynamic interaction of these factors during the formation of productive sediments was investigated. Based on the work of previous researchers who have studied in detail the issues of controlling the formation of these placers at the historical-geological and regional structural-tectonic level, a qualitative model of the formation of placer concentrations on local areas of the rank of districts, clusters, fields and specific placer bodies has been created, which can be the basis for creation of search-oriented model of the deposit and planning exploration and evaluation work. The following factors of the placer formation were studied: hydrodynamic – characterizing the types and mechanisms of placer concentrations (littoral and sublittoral) within the dynamically active coastal zone; lithodynamic – depending on the abrasion-accumulative regime of the coast and the parameters of the long-shore sediment flow; structural–dynamic – determining the possibility of the formation of economically significant productive deposits and their localization; and the factor of transgressive-regressive regime a basin that determines the structure of placer bodies and their transformation at the post-sedimentation stage. Large economically significant rare-metal-titanium placer deposits are formed only in conditions of joint realization of the positive potential of these factors. The developed qualitative model can serve as a basis for the process of digitalization of the forecasting of placer mineralization of this type.

Keywords: placers, titanium, zirconium, rare metals, factors of placer formation.