

Поисково-ориентированная методика численного прогнозирования редкометалльно-титановых россыпей на примере Умыт'инской россыпи (Ханты-Мансийский автономный округ)

Чефранов Р. М. , Лаломов А. В. 

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, roman_chefr@bk.ru; lalomov@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе в пределах Умыт'инской редкометалльно-титановой (титан-циркониевой) россыпи (Ханты-Мансийский АО) выделены основные факторы, контролирующие формирование россыпей соответствующего типа. Произведена формализация (численная оценка) этих факторов и выработаны мультипликативные показатели, позволяющие прогнозировать россыпной потенциал аналогичных объектов. Для оценки эффективности предлагаемой методики на основании разработанных мультипликативных коэффициентов рассчитан прогноз россыпной металлоносности участка, вмещающего указанную россыпь. Для дополнительной верификации методики в работе приведено сравнение полученных результатов с аналогичными прогнозами, рассчитанными посредством методов линейной регрессии и дерева регрессии с использованием алгоритма случайного леса. Разрабатываемая методика позволяет частично автоматизировать процесс прогнозирования параметров локализации редкометалльно-титановых россыпей, что имеет значение для оценки сложных с точки зрения поисков и разведки глубокозалегающих россыпей.

Ключевые слова: Редкометалльно-титановые россыпи, мультипликативные показатели, прогнозирование.

A search-oriented method of numerical forecasting of rare metal-titanium placers: evidence from the Umyt'ya placer (Khanty-Mansi Autonomous District)

Chefranov R. M. , Lalomov A. V. 

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences, Moscow, roman_chefr@bk.ru; lalomov@mail.ru

Abstract. In the present work, within the Umyt'ya rare metal-titanium (titanium-zirconium) placer (Khanty-Mansi autonomous district), the main factors controlling the formation of placers of the corresponding type are identified. A formalization (numerical assessment) of these factors was carried out and multiplicative indicators were developed that make it possible to forecast the placer potential of similar objects. To assess the effectiveness of the proposed technique on the basis of the developed multiplicative coefficients, a forecast of the placer metal content of the area containing the specified placer was calculated. For additional verification of the methodology, the results obtained are compared with similar forecasts obtained by linear regression method and regression tree method using a random forest algorithm. The developed methodology allows to partially automate the process of forecasting placer parameters, which is especially important for assessing deep-seated placers that are difficult to seek and explore.

Keywords: Rare metal-titanium placers, multiplicative coefficients, forecasting.

Введение

Титан и цирконий – металлы, относящиеся к основным видам рудного стратегического сырья. Основной их источник – комплексные редкометалльно-титановые (титан-циркониевые) россыпи, зачастую также содержащие попутные полезные компоненты (гафний, торий, редкие земли и др.). В России известно более десяти месторождений россыпей указанного типа (не считая целого ряда россыпепроявлений), но ни одно из них сегодня не обрабатывается в полном объеме. Такое положение дел связано, в том числе, со сложными горно-геологическими условиями залегания объектов или особенностями их состава, затрудняющими процесс обогащения.

В пределах Зауральской россыпной провинции (Патык-Кара, 2008) в различной степени разведаны редкометалльно-титановые россыпи Умыт'инская, Северо-Сосьвинская и Салехард-

ская. При этом их суммарные ресурсы, включая непромышленные россыпные тела, не составляют и тридцатой части общего титан-циркониевого потенциала провинции (Веремеева и др., 2008). Благоприятные условия залегания и технологические свойства россыпьевмещающих отложений, равно как удачное географическое положение и достаточно развитая инфраструктура региона в целом (в частности, наличие железнодорожного пути), позволяют высоко оценить перспективы промышленного освоения указанных россыпей, а также открытия новых, в том числе глубокозалегающих.

По результатам геологоразведочных работ в 2006–2008 гг. в западной части ХМАО была подтверждена промышленная концентрация минералов титана и циркония в отложениях олигоценного возраста (Патык-Кара и др., 2009; Кудрин, 2011) в контурах Мансийской и Северо-Сосьвинской площадей (Патык-Кара и др., 2008; Лаломов и др., 2008). Для продуктивных отложений указанных территорий были выполнены литолого-фациальные исследования и установлены условия их формирования (Лаломов и др., 2010; Чефранов, 2011). В 2009–2011 гг. были проведены геологоразведочные работы с детализацией литолого-фациальных реконструкций (Чефранов и др., 2014) на оконтуренном по итогам предшествующих работ Умытыинском участке Мансийской площади, расположенном в 35 км к юго-востоку от г. Советский Советского района ХМАО. В 2011–2013 гг. на указанном участке были проведены работы по оконтуриванию рудных тел и подсчету запасов (Перепелицин и др., 2013).

В настоящей работе Умытыинская россыпь рассматривается в качестве объекта для апробирования методики прогнозирования редкометалльно-титановых россыпей посредством комплексного анализа совокупности россыпеобразующих факторов, количественно выраженных и объединенных в мультипликативные показатели. Предлагаемая методика может быть полезна для оценки россыпей на закрытых и малоисследованных территориях. Ранее описанный подход был применен авторами для оценки редкометалльных россыпей Ловозерского массива (Лаломов, Чефранов, 2020; Лаломов, Бочнева, 2021; Чефранов и др., 2023), а также для прогнозирования коренных источников золота по результатам шлихового опробования на примере Вагранского россыпного узла (Лаломов и др., 2020).

Геологическая характеристика

Редкометалльно-титановые россыпи Зауральской провинции связаны с терригенными отложениями чехла приуральской части Западно-Сибирской плиты. Основным источником материала для них служили кристаллические породы Урала, подвергавшиеся интенсивному химическому выветриванию от раннего мела до конца олигоцена (Сигов, 1971). Это привело к разложению в них пороодообразующих силикатов и неустойчивых аксессуаров, а также накоплению устойчивых минералов, в первую очередь титан-циркониевой ассоциации. В результате начавшегося в олигоцене поднятия Уральского региона активизировались эрозионные процессы и в Западно-Сибирский бассейн начали поступать большие массы зрелого обломочного материала. Сокращение площади бассейна и изменение его конфигурации определялось тектоническими движениями, приводившими к эрозии более ранних отложений и фиксации береговой линии отступающего бассейна в обрамлении локальных сводово-купольных структур (Патык-Кара и др., 2009), где создавались условия для эффективного перемива обогащенного устойчивыми минералами терригенного материала и образования россыпей. Последующие тектонические движения определили условия их залегания и неравномерную сохранность.

Россыпьевмещающие отложения представлены светло-серыми тонко-мелкозернистыми кварцевыми песками куртамышской свиты (рюпельский ярус олигоцена). Выход минералов тяжелой фракции составляет 0.1–4.69 %. В их составе преобладает (80–90 %) титан-циркониевая ассоциация, представленная цирконом, ильменитом, рутилом и лейкоксеном. Мощность песков в пределах Умытыинского участка по данным геофизических исследований составляет 59–99 м. Подстилаются отложения зеленовато-серыми, плотными, пластичными глинами тавдинской свиты (эоцен). Перекрываются нерасчлененным комплексом неоген-четвертичных отложений (полимиктовые пески и супеси).

Материал и методика исследования

В настоящей работе использовались материалы поисково-разведочных работ, проводимых в районе Умыт'инского участка в 2006–2011 гг., в которых авторы принимали непосредственное участие. Были изучены геологическое строение района, его металлогения, геоморфология, структура и минеральный состав россыпей, проведены палеогеографические реконструкции (рис. 1). В настоящей работе для оценки россыпной металлоносности применяется мультипликативный коэффициент – используемый ранее при геохимических поисках математический расчет результатов химического анализа проб, где в числителе располагаются произведения результатов анализа элементов положительной индикации с искомой характеристикой, а в знаменателе – нейтральной и отрицательной (Бенсман, 1999, Григорян и др., 1983).

При прогнозировании россыпей важно учитывать все факторы, которые оказывают влияние на металлоносность: динамические и литолого-фациальные условия, геоморфологический контроль, тектонические условия, часто наличие коренных источников и т. д. Образование промышленных россыпей происходит в условиях оптимальной совокупности таких факторов, достаточно подробно описанных (Шило, 2002; Патык-Кара, 2008). Некоторые из них имеют количественную

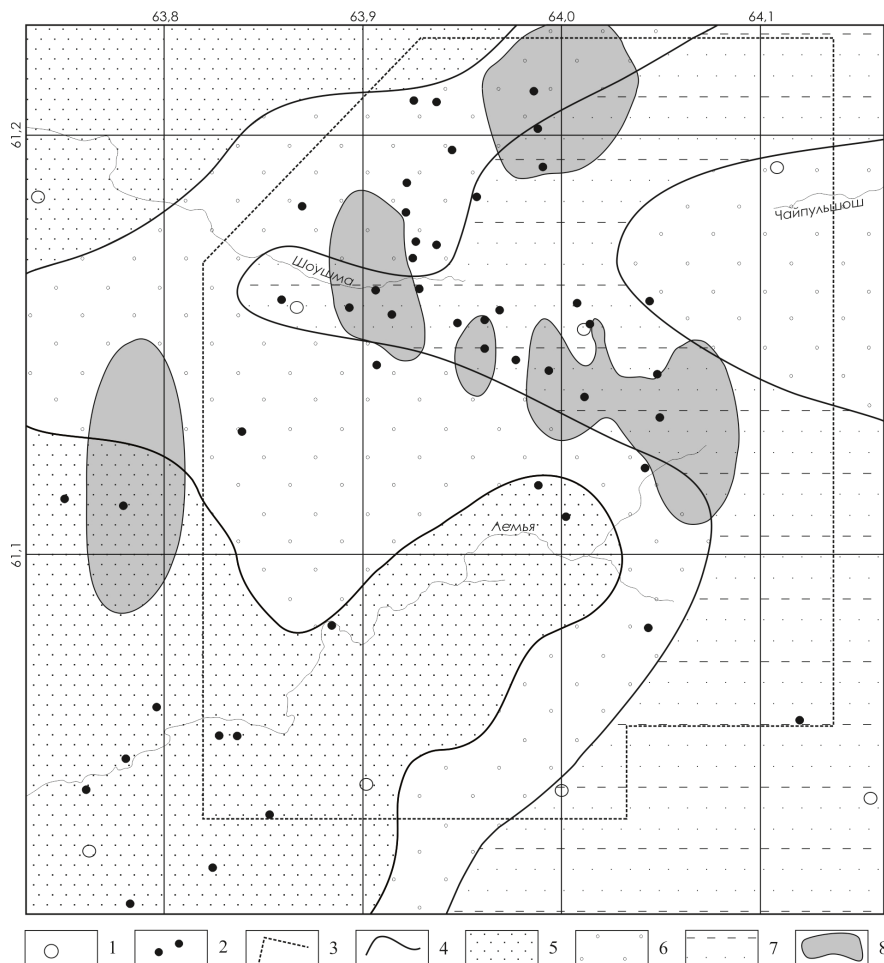


Рис. 1. Схема фациальной зональности и россыпной металлоносности Умыт'инского участка.

1 – скважины, 2 – открытые горные выработки (шурфы и канавы), 3 – границы Умыт'инского участка, 4 – границы фациальных зон, 5 – зона дельты, 6 – зона литорали, 7 – зона морского мелководья с высокой гидродинамической активностью, 8 – россыпные тела, оконтуренные по содержанию минералов титан-циркониевой ассоциации 16 кг/м³.

Fig. 1. Schematic facies zonation and placer metal potential of the Umyt'ya area.

1 – boreholes, 2 – open minings (pits and ditches), 3 – boundaries of the Umyt'ya area, 4 – boundaries of facies zones, 5 – delta zone, 6 – littoral zone, 7 – shallowmarine zone with high hydrodynamic activity, 8 – placer bodies outlined by the content of minerals of the titanium-zirconium assemblage (16 kg/m³).

оценку, но большинство исследовано только на качественном уровне. Авторы настоящей статьи пытаются по возможности автоматизировать процесс прогнозирования россыпей (в данном случае – редкометалльно-титановых) на основе формализованных факторов россыпеобразования.

Для этого в пределах Умытинского участка были собраны данные по каждой горной выработке (шурфы и канавы до 3 м глубиной, а также верхние метры керна скважин (см. рис. 1)), включающие в себя географические координаты, высоту над уровнем моря, содержание россыпеобразующих минералов, гранулометрический состав, литолого-фациальную приуроченность и мощность россыпемещающих отложений. Полученные данные были формализованы (количественно оценены или разбиты на классы) и сведены в единую базу данных. Авторами была разработана компьютерная программа, считывающая составленную базу данных и решающая задачу регрессии по прогнозу россыпной металлоносности, исходя из указанных характеристик. На основании корреляционного анализа, проводимого на данных эталонного участка и последующего диалога с пользователем, программа формирует вид мультипликативного показателя. Далее, посредством расчета мультипликативных коэффициентов для точек тестового участка и их линейного отражения на содержание россыпеобразующих минералов, программа выводит ряд оценочных характеристик получившейся модели и прогнозную схему. Исходный код программы размещен по адресу <https://github.com/chefr/placermpl>.

Расчет и оценка прогнозных мультипликативных показателей

Одним из наиболее значимых факторов контроля россыпной металлоносности является фациально-стратиграфический. По этому признаку каждая точка была отнесена к одному из 4-х классов: 1) зона дельты; 2) зона литорали; 3) зона морского мелководья с высокой гидродинамической активностью; 4) фронтальная мелководная зона, на гидродинамику которой значительно влияла обстановка открытой части бассейна. Россыпи приурочены в основном к зоне морского мелководья с высокой гидродинамической активностью и, в меньшей степени, литорали.

Мощность продуктивных песчаных отложений закономерно уменьшается от более глубоководных фаций к суше и в некоторой степени может отражать тектонический фактор контроля накопления и размыва россыпей. Посредством проведенного кластерного анализа, учитывающего мощность отложений и их металлоносность, каждая точка была отнесена к одному из 3-х типов: 1) мощность отложений менее 75 м; 2) 75–85 м; 3) более 85 м. Россыпи локализуются преимущественно во второй зоне.

Важным фактором прибрежно-морского россыпеобразования являются гидродинамические условия формирования отложений, определяющие их гранулометрический состав. В настоящем исследовании для формализации этого фактора взято процентное содержание фракций 0.5–0.25 мм и 0.1–0.05 мм., характеризующихся лучшим коэффициентом корреляции с металлоносностью. Для учета геоморфологического фактора, как и в случае с мощностью отложений, был проведен кластерный анализ, учитывающий высоту отложений над уровнем моря и содержание в них минералов титан-циркониевой ассоциации. В результате каждая точка была отнесена к одному из трех классов по высоте над уровнем моря: 1) менее 85 м; 2) 85–105 м; 3) более 105 м.

Итоговая формализация факторов, выраженных в номинальной шкале (т. е. когда каждой точке приписан отдельный класс) осуществлялась посредством расчета среднего содержания россыпеобразующих минералов в каждом классе по данным эталонного объекта. Для приведения факторов к одному масштабу было проведено линейное нормирование всех данных к диапазону значений от 0 до 1.

Для решения задачи регрессии обычно в данных определяются две выборки: обучающая (эталонная) и тестовая, для проведения проверки и расчета статистических данных, показывающих успешность прогноза. В настоящем исследовании, учитывая небольшое количество имеющихся проб (232 пробы по 37 точкам), эталонная выборка была случайным образом сформирована из общего множества данных с условием равномерного распределения по классам факторов, выраженных в номинальных шкалах. Анализ данных обучающей выборки определил вид мультипли-

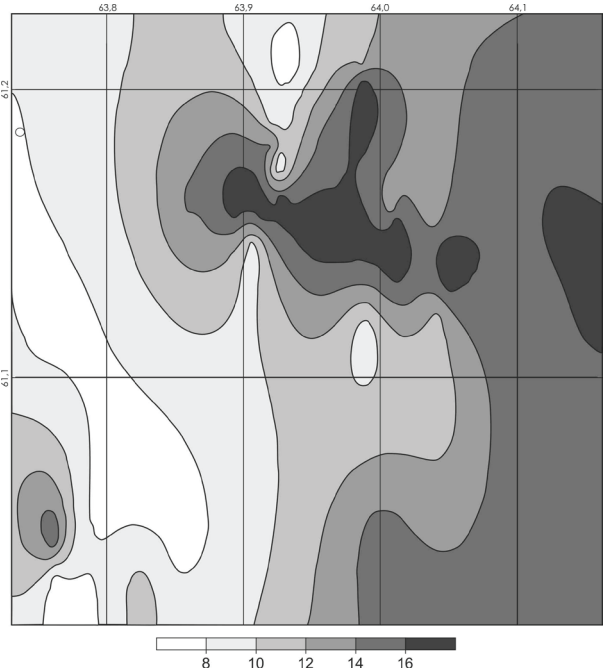


Рис. 2. Прогнозное содержание минералов титан-циркониевой ассоциации Умытынской россыпи по результатам расчета мультипликативных показателей (кг/м³).

Fig. 2. Forecast content of minerals of the Ti–Zr assemblage of the Umytya placer based on the results of calculating multiplicative indicators (kg/m³).

такого прогноза при планировании поисковых работы на редкометалльно-титановые россыпи. Необходимо отметить, что исследуемый Умытынский участок уже был оконтурен на основании повышенного содержания россыпеобразующих минералов в ходе поисково-разведочных работ, т. е. даже фоновые содержания в его пределах характеризуются высокими значениями и есть все основания полагать, что применение предлагаемой методики на более ранних поисковых этапах даст значительно более выраженный результат.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции Пирсона между формализованными факторами россыпеобразования и содержанием россыпеобразующих минералов по данным геологоразведочных работ

Table 1. Pearson correlation coefficients between formalized placer formation factors and the content of placer-forming minerals according to geological exploration data

Фактор	Коэф. корр. (p-value)
Фациально-стратиграфический	0.453 (3.7e-13)
Тектонический	0.345 (6.7e-8)
Содержание фракции 0.5–0.25 мм	-0.415 (4.63e-11)
Содержание фракции 0.1–0.05 мм	0.378(2.6e-09)
Геоморфологический	0.353 (3.3e-08)

Для сравнения эффективности описанного выше метода с другими методами регрессии, по тем же данным были рассчитаны прогнозы методами линейной регрессии, а также дерева регрессии с использованием алгоритма машинного обучения случайный лес (Breiman, 2001). Оба метода были применены для расчета содержания минералов титан-циркониевой ассоциации, рассматриваемого в качестве зависимой переменной, в то время как независимыми переменными являлись ранее описанные формализованные россыпеконтролирующие факторы. Поскольку эти методы более требовательны к отбору обучающей и тестовой выборок, расчет производился для каждой точки от-

кативного коэффициента: в числителе произведение значений фациально-стратиграфического, геоморфологического и тектонического факторов, а также содержания фракции 0.1–0.05 мм; в знаменателе – содержание фракции 0.5–0.25 мм. Благодаря направленному усилению коррелирующихся полезных сигналов влияние фона сводится к минимуму, уменьшая влияние случайных отклонений и ошибок (Ворошилов, 2011). В связи с этим мультипликативные ореолы проявляют более тесную связь с локализацией рудных тел. В рамках ГИС-системы Умытынского участка количественно оцененные факторы и рассчитанный мультипликативные показатели получили пространственную привязку, что позволило построить схему прогноза россыпной металлоносности по всему множеству точек (рис. 2).

Как видно из таблицы 2, полученный прогноз имеет достаточно высокий коэффициент корреляции с фактической металлоносностью (0.507), превышающий аналогичные значения для рядовых факторов (табл. 1). Среднеквадратичная ошибка 6.97 с учетом оконтуривания рудных тел по содержанию 16 кг/м³ указывает на возможность использования результатов

дельно, путем исключения этой точки из выборки с дальнейшим обучением модели по всем оставшимся точкам и расчетом прогноза для этой точки. Далее прогнозы для всех точек были объединены в один. В таблице 2 приведены статистические данные для всех примененных методов, из которых можно заключить, что они дают очень близкие результаты. При этом предлагаемая методика более проста, роль обучения здесь ограничивается выявлением знака и значимости корреляционной зависимости между факторами и прогнозируемой переменной, что представляется возможным оценить даже на минимальном наборе данных.

Таблица 2. Статистические характеристики прогнозных распределений
 Table 2. Statistical characteristics of forecast distributions

Метод	Коэф. корр. (p-value)	RMSE
Мультипликативный показатель	0.507 (p-val: 1.6e-16)	6.970
Линейная регрессия	0.486 (3.5221e-15)	7.068
Случайный лес деревьев регрессии	0.518 (2.4799e-17)	7.014

Примечание. RMSE – среднеквадратичная ошибка.

В настоящее время метод находится на стадии разработки. Имеется ряд нерешенных вопросов, которые необходимо исследовать при продолжении работ, в частности анализ точек производится без рассмотрения включающей их территории как единого геологического объекта. Дальнейшие работы предлагается ориентировать на устранение этого недостатка.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР FMMN-2024-0015.

Литература

1. Бенсман В. Р. Поисковая геохимия в республике Беларусь // Природные ресурсы. 1999. № 4. С. 124–137.
2. Веремеева Л. И., Левченко Е. Н., Калиш Е. А. Титан-циркониевые россыпи западной части ХМАО – Югры: геологические и технолого-экологические аспекты рационального недропользования. Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Труды XI научно-практической конференции. Т. 1. Ханты-Мансийск. Изд-во: «ИздатНаукаСервис», 2008. С. 378–386.
3. Ворошилов В. Г. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: учебное пособие. Томск. Изд-во: Томского политехнического университета, 2011. 104 с.
4. Григорян С. П., Соловов А. П., Кузин М. Ф. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М. Изд-во: Недра, 1983. 191 с.
5. Кудрин В.И. Перспективность Приуральской части Югры на титан-циркониевые россыпи. Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Труды XIV научно-практической конференции. Т. 2. Ханты-Мансийск. Изд-во: «ИздатНаукаСервис», 2011. С. 186–196.
6. Кудрин К. Ю., Чефранов Р. М., Чефранова А. В. Типоморфизм и коренные источники россыпеобразующих минералов Умытгинской редкометалльно-титановой россыпи (Ханты-Мансийский АО) // Литология и полезные ископаемые. 2017. № 5. С. 467–478. <https://doi.org/10.7868/S0024497X17050068>.
7. Лаломов А. В., Бочнева А. А. Методика численного прогнозирования редкометалльных россыпей на основе формализации факторов россыпеобразования (на примере лопаритовых россыпей Ловозерского массива) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. № 18. С. 247–251. <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.046>.
8. 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. Т. 22. № 6. С. 67–76. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.67-76>.
9. Лаломов А. В., Бочнева А. А., Чефранов Р. М. Фациальная природа продуктивных отложений и оценка россыпной титано-циркониевой металлоносности Мансийской и Северо-Сосьвинской площадей ХМАО. Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономно округа – Югры // Труды XII научно-практической конференции. Ханты-Мансийск. Изд-во: «ИздатНаукаСервис», 2008. С. 252–259.

10. Лаломов А. В., Бочнева А. А., Чефранов Р. М., Трофимов В. А. Литолого-фациальное районирование и титан-циркониевая металлоносность Мансийской и Северо-Сосьвинской площадей Зауральского россыпного района // Литология и полез. ископаемые. 2010. № 4. С. 370–382. <https://doi.org/10.1134/S0024490210040036>.
11. Лаломов А. В., Чефранов Р. М. Разработка метода прогнозирования потенциала россыпей на основе формализации факторов россыпеобразования на базе лопаритовых россыпей Ловозерского массива // Арктика: экология и экономика. 2020. № 4 (40). С. 54–65. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-4-54-65>.
12. Патык-Кара Н. Г. Минерагения россыпей: типы россыпных провинций. М. Изд-во: ИГЕМ РАН, 2008. 528 с.
13. Патык-Кара Н. Г., Лаломов А. В., Бочнева А. А., Чефранов Р. М. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка критериев локализации и обоснование перспектив комплексных титан-циркониевых россыпей в Зауральском районе Западносибирской плиты (Мансийская и Северо-Сосьвинская площади, ХМАО)». М. Изд-во: ИГЕМ РАН, 2008. 74 с.
14. 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 полезные ископаемые. 2009. № 6. С. 598–613. <https://doi.org/10.1134/S0024490209060030>.
15. Перепелицын Ю. Ф., Кудрин В. И., Кудрин К. Ю. и др. Отчет о выполнении работ по теме «Оценка титан-циркониевых россыпей в пределах Шоушма-Лемьинского россыпного узла и поисковые работы на восточном фланге Умытйинской площади». Ханты-Мансийск. Изд-во: ОАО «НПЦ Мониторинг», 2013. 457 с.
16. Сигов А. П. Условия образования полезных ископаемых и металлогенические эпохи мезозоя и кайнозоя Урала // Материалы по геоморфологии Урала. М. Изд-во: Недра, 1971. С. 117–126.
17. Чефранов Р. М. Вещественный и гранулометрический состав олигоценых титан-циркониевых россыпей Зауральского россыпного района (Ханты-Мансийский автономный округ) и условия их формирования // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2011. № 2. С. 47–51.
18. Чефранов Р. М., Лаломов А. В., Бочнева А. А. и др. Геолого-геофизические критерии поисков и разведки ископаемых редкометалльно-титановых россыпей // Литология и полезные ископаемые. 2014. № 6. С. 539–553. <https://doi.org/10.1134/S0024490214060030>.
19. 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. Т. 65. № 2. С. 138–151. <https://doi.org/10.31857/S0016777023020016>.
20. Шилов Н. А. Учение о россыпях. Владивосток. Изд-во: Дальнаука, 2002. 576 с.
21. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. V. 45. P. 5–32. <https://dx.doi.org/10.1023/A:1010933404324>.