

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛА РОССЫПЕЙ НА ОСНОВЕ ФОРМАЛИЗАЦИИ ФАКТОРОВ РОССЫПЕОБРАЗОВАНИЯ НА БАЗЕ ЛОПАРИТОВЫХ РОССЫПЕЙ ЛОВОЗЕРСКОГО МАССИВА

А. В. Лаломов

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Москва, Российская Федерация), Пермский государственный национальный исследовательский университет (Пермь, Российская Федерация)

Р. М. Чефранов

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 18 сентября 2020 г.

В пределах северной периферии Ловозерского массива (Кольский полуостров) выделены основные факторы формирования редкометалльных лопаритовых россыпей ближнего сноса. Произведена формализация (численная оценка) факторов; выработаны мультипликативные показатели, отражающие россыпной потенциал территорий; произведена оценка эффективности разработанных показателей на эталонных объектах северной периферии массива. Разрабатываемая методика позволяет автоматизировать процесс прогнозирования параметров россыпной металлоносности.

Ключевые слова: россыпи, редкие металлы, мультипликативные показатели, прогнозная модель.

Введение

Согласно распоряжению Правительства РФ № 50-р от 16 января 1996 г. в перечень основных видов стратегического минерального сырья входят золото, платина, олово, вольфрам, титан, цирконий, ниобий, тантал, скандий, редкие земли иттриевой группы. В балансе запасов этих месторождений россыпи составляют существенную, а иногда и преобладающую часть. Повышенная рентабельность и технологическая доступность россыпей делает их первоочередными объектами при освоении новых или реанимации старых рудно-россыпных площадей [1].

Легкодоступные мелкозалегающие россыпные объекты к настоящему времени уже выявлены и в значительной мере отработаны, поэтому наи-

более перспективными являются сложные с точки зрения поисков и разведки глубокозалегающие россыпи, не проявленные в поверхностных шлихо-геохимических ореолах. Их прогнозирование возможно только на основе комплексного анализа всей совокупности россыпеобразующих факторов, среди которых можно выделить наличие коренных источников, благоприятные динамические и литофациальные условия концентрации россыпных минералов, объединенных в геолого-генетических моделях месторождений. Для создания таких моделей необходимо детально проанализировать данные по эволюции россыпеобразующих формаций в различных литогенетических, вещественных, геолого-структурных и литодинамических системах, конкретизировать, формализовать и ранжировать факторы россыпеобразования. На основе формализованных (количественно оцененных) факторов методами численного

компьютерного моделирования и ГИС-технологий создается система пространственно привязанных мультипликативных показателей, оценивающих потенциал россыпной металлоносности. Полученные результаты используются для создания методики прогнозной оценки россыпной металлоносности на закрытых и малоисследованных территориях. В качестве объекта исследований для разработки моделей редкометалльных россыпей ближнего сноса использованы россыпи лопарита северной периферии Ловозерского массива.

Разрабатываемая методика основана на анализе механизма принятия экспертом решений по оценке россыпного потенциала площадей и предлагает комплекс технологических решений, позволяющих имитировать когнитивные функции человека и дающих возможность с использованием гибридной системы, работающей в режиме диалога «оператор — компьютер», получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые с результатами интеллектуальной деятельности человека.

Геологическое строение и рудоносность Ловозерского массива

Ловозерский щелочной массив представляет собой сложнопостроенную многофазную интрузию площадью 650 км². Породы Ловозера очень разнообразны; подавляющее большинство их относится к формации агпаитовых нефелиновых сиенитов [2]. Вмещающими являются докембрийские гранито-гнейсы. Основными фазами в составе массива являются дифференцированный лопаритоносный комплекс луявритов-фойяитов-уртитов и комплекс эвдиалитовых луявритов, слагающих верхнюю часть массива. В разрезе пород дифференцированного комплекса встречаются горизонты уртитов, резко обогащенные лопаритом. Лопаритовое оруденение приурочено к верхней и нижней зонам дифференци-

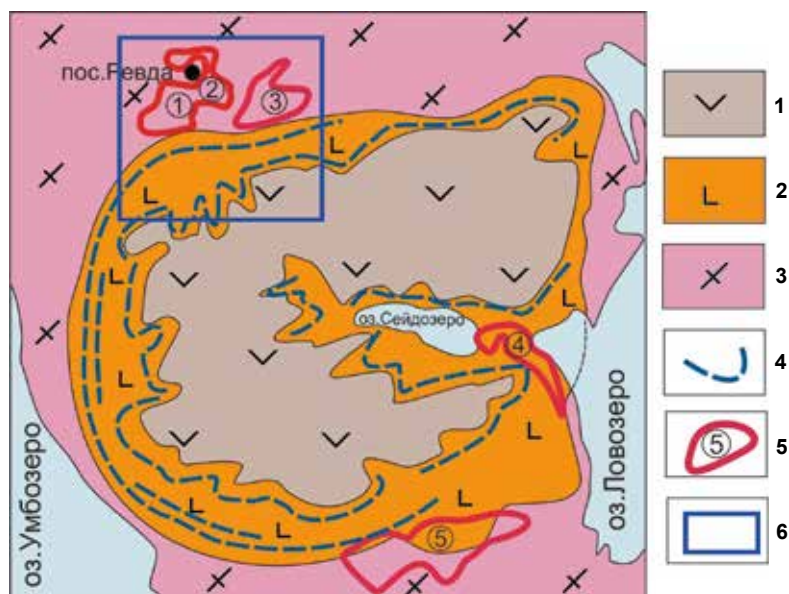


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Ловозерского массива со снятыми четвертичными отложениями: 1 — эвдиалитовые луявриты нерасчлененные; 2 — дифференцированный лопаритоносный комплекс луявритов-фойяитов-уртитов; 3 — вмещающий докембрийский гранито-гнейсовый комплекс; 4 — рудные горизонты массива; 5 — редкометалльные россыпи: 1–3 — Ревдинское месторождение (поле), участки: 1 — Шомиокский, 2 — Ревдинский, 3 — Сергеванский; 4 — Сейдозерское россыпное поле, 5 — Райяврская россыпь (по материалам [4–6]); 6 — полигон моделирования

Fig. 1. Schematic geological map of the Lavozero massif with removed Quaternary deposits: 1 — undivided eudialyte lujaavrites; 2 — differentiated loparitic complex of lujaavrite-foyaite-urtites; 3 — host Precambrian granite-gneiss complex; 4 — ore horizons of the massif; 5 — rare metal placers: 1–3 — Revda placer deposit areas: 1 — Shomiok, 2 — Revda, 3 — Sergevan; 4 — Seidozero placer field, 5 — Rajavr placer (according to [4–6]); 6 — modeling site

рованного комплекса. В верхней зоне находится горизонт малиньитового состава мощностью около 20 см, содержащий до 25% лопарита, в нижней имеется несколько рудных горизонтов уртитов и реже луявритов, содержащих промышленные концентрации лопарита [3]. Рудник «Карнасурт» разрабатывает лопаритовые уртиты и малиньиты в составе верхней зоны дифференцированного комплекса, а рудник «Умбозеро» был заложен в нижней зоне [2].

Лопаритовые россыпи в пределах Ловозерского массива и на его флангах расположены по северной периферии плутона (Шомиокский, Ревдинский и Сергеванский участки Ревдинского месторождения), на его южном склоне (Райяврская россыпь), а также во внутренней котловине и у восточного подножья массива — Сейдозерское россыпное поле (участки Губы Мотка, Прибрежный и перемячка между озерами Сейдозеро и Ловозеро) (рис. 1).

Местоположение россыпей контролируется участками максимального вскрытия лопаритоносных пород дифференцированного комплекса (ледниковыми карами и долинами, поставлявшими фрагментированный обломочный материал в зону предгорий) и элементами рельефа, благоприятными для накопления лопарита: локальными депрессиями коренного ложа по северному и южному обрамлению массива, обработанной ледником и впоследствии занятой подпрудным озером центральной Сейдозерской котловиной, береговой зоной озера Ловозеро [7].

В разрезе рыхлых отложений северного обрамления массива выделяется пять основных комплексов, соответствующих основным этапам развития региона в кайнозое: доледниковые элювиально-склоновые

мезозой-кайнозойские отложения e-d MZ-N (?), флювиогляциальные fgQ_{III-2} и моренные gQ_{III-2} отложения местного горного оледенения и перекрывающая морена покровного оледенения gQ_{III-IV} , а также современные элювиально-склоновые и пролювиальные отложения (по материалам [6; 8]).

Продуктивный пласт россыпи приурочен к флювиогляциальным отложениям и морене местного горного оледенения. Отложения элювиально-склонового комплекса, развитые по гранитогнейсовым породам, и отложения покровного оледенения слабо металлоносны, содержание в них лопарита редко превышает 1 кг/м^3 . Наибольшие содержания приурочены к нижней части продуктивного пласта — комплексу гляциальных и флювиогляциальных отложений местного горного оледенения, характеризующихся преобладанием обломочного материала щелочных пород. Повышенные содержания лопарита до 36 кг/м^3 приурочены к депрессиям коренного рельефа. Среднее содержание по Шомиокской россыпи составляет $4,5 \text{ кг/м}^3$ при мощности пласта $17,1 \text{ м}$, по Сергеваньской россыпи — $3,9 \text{ кг/м}^3$ при мощности пласта $22,65 \text{ м}$ [6]. Россыпное месторождение охватывает почти всю территорию развития шлейфа отложений местных ледников в северных предгорьях Ловозерского массива.

Основным полезным компонентом ловозерских россыпей является лопарит, представленный преимущественно свободными зернами, преобладающей размер — от $0,05$ до $0,8 \text{ мм}$. Лопарит — высококомплексное редкометалльное сырье. В лопарите ловозерских россыпей содержится $8,3\% \text{ Nb}_2\text{O}_5$, $0,67\% \text{ Ta}_2\text{O}_5$, $39,8\% \text{ TiO}_2$, $34,9\% \Sigma \text{TR}_2\text{O}_3$ [6].

Материалы и методы

Для проведения исследования использовались материалы производственных отчетов по поискам, разведке и подсчету запасов Ревдинского россыпного месторождения лопарита. Были изучены геологическое строение района, его металлогения, геоморфология, строение осадочного чехла, структура и минеральный состав россыпей. Геоморфология, фациальный состав и минералогия четвертичных отложений были уточнены в процессе проведения на россыпи маршрутных полевых работ и последующих аналитических исследований.

В пределах Ревдинского россыпного поля был выбран полигон моделирования, включающий эталонный и тестовый участки. В пределах полигона по сети $500 \times 500 \text{ м}$ были созданы цифровая модель рельефа и база данных, в которую для каждой элементарной ячейки внесены формализованные (количественно оцененные) россыпеконтролирующие параметры. На основании корреляционного анализа на эталонном участке был разработан мультипликативный показатель — объединенный параметр, оценивающий перспективы россыпной металлоносности. Его верификация была проведена на тестовом участке.

Применение прогнозного моделирования в науке о россыпях

В научной геологической литературе по прогнозированию и поискам месторождений полезных ископаемых среди множества имеющихся математических методов прогнозирования ресурсов наибольший интерес представляют три: регрессионный анализ, информационный анализ и распознавание образов [9].

Регрессионный анализ использует структурные, магматические, литологические и другие свойства объектов, а также параметры магнитных и геохимических аномалий. Он основан на множественной линейной зависимости между свойствами изученных объектов (месторождений или рудных полей) и свойствами прогнозируемых объектов.

Информационный анализ основан на изучении частоты различных свойств, он использует сравнение структурных, магматических, литолого-стратиграфических и других признаков «рудных» и «безрудных» объектов с хорошо исследованными свойствами. Чем больше различаются частоты j -го свойства, тем более информативно свойство. По сумме информативности свойств можно оценивать перспективу территории, на которой изучены эти свойства (высокая, средняя, низкая).

Распознавание образов также основано на анализе частоты свойств «рудных» и «безрудных» объектов. Отличие от предыдущего метода состоит в том, что изучаются сочетания свойств, которые более информативны, чем отдельные свойства. Путем анализа сочетаний свойств из них выбирают наиболее информативные, используемые для оценки рудоносности прогнозной территории.

Одним из первых вопросами количественной оценки процессов россыпеобразования начал заниматься Ю. В. Шумилов [10].

Н. Н. Поликарпочкин дал количественную характеристику вторичных ореолов и потоков рассеяния, а также их соотношения с коренными источниками; выявленные им закономерности в значительной мере могут быть применимы и к россыпям [11].

В работах Н. Г. Патык-Кара с соавторами россыпи золота и касситерита ближнего сноса численно моделировались в условиях различных взаимоотношений в системе «коренной источник — аллювиальная долина» с использованием изменяющихся литодинамических характеристик аллювиального и прибрежно-морского потоков [12; 13].

В рамках совместных российско-украинских проектов РФФИ (2012—2013, 2014—2015 гг.) разрабатывались цифровые геолого-динамические модели месторождений тяжелых минералов (в первую очередь редкометалльно-титановых). Удалось сформулировать основные принципы построения количественных оценок факторов россыпеобразования и наметить основные параметры мультипликативных показателей, отражающих россыпной потенциал изучаемых территорий [14—16].

Комплексный количественный подход относительно редкометалльно-титановых россыпей в настоящее время разрабатывается австралийскими учеными из «LEME PIRSA» при изучении объектов Южной и Восточной Австралии [17].

На базе информационного анализа и метода распознавания образов разрабатываются логико-информационные модели для прогноза и оценки новых месторождений золота в Арктической зоне России [18].

Факторы россыпного контроля, разработка и тестирование прогнозных мультипликативных показателей

При прогнозировании россыпей необходимо учитывать комплекс факторов, влияющих на металлоносность отложений, — наличие коренных источников, динамические и литофациальные условия, геоморфологический контроль, тектонические условия и т. д. Только в условиях оптимальной совокупности таких факторов происходит образование россыпей, имеющих промышленное значение.

В учении о россыпях все эти факторы достаточно хорошо изучены [19; 20], некоторые из них имеют количественную оценку, но большинство исследовано на качественном уровне. Авторы поставили задачу компьютеризировать процесс прогнозирования россыпей (на данном этапе — редкометалльных россыпей ближнего сноса) на основе формализованных (количественно оцененных) факторов россыпеобразования.

Для этого по Ревдинскому россыпному узлу (северной периферии Ловозерского массива) на участке 8×11 км, где были разведаны россыпи лопарита, по сети с элементарной ячейкой 500 м была собрана информация относительно россыпной металлоносности, рельефа, геоморфологии, мощности осадочного чехла, литолого-фациальным и стратиграфическим характеристикам осадочного чехла и кристаллического фундамента. Полученные данные были размещены в созданной на ГИС-основе базе данных.

Одним из наиболее значимых факторов контроля россыпной металлоносности является фациально-стратиграфический (ФС): россыпи приурочены в основном к верхнечетвертичным гляциальным отложениям местного горного оледенения и сопровождающих их флювиогляциальным комплексам.

Мощность осадочного чехла (МЧ) закономерно уменьшается по мере удаления от приподнятой части массива, что непосредственно связано с тектоническим режимом блоков массива и фундамента. По этому параметру можно выделить четыре типа рыхлого чехла: (1) отсутствие чехла или маломощные грубообломочные элювиально-делювиальные отложения, приуроченные к приподнятой части и склонам массива; (2) делювиально-пролювиальный чехол мощностью до 5—10 м в периферийных зонах массива; (3) гетерогенный осадочный чехол

мощностью до 10—30 м в экзоконтакте массива; (4) гетерогенный чехол мощностью более 30 м в пределах окружающей равнины. В целом концентрическое расположение этих зон нарушается дифференцированными смещениями отдельных блоков фундамента и массива, а также в результате эрозионной деятельности местного ледника, положение которого, в свою очередь, также определяется локальной тектоникой. Россыпи лопарита локализируются преимущественно в третьей и второй зонах.

Важным фактором аллювиального россыпеобразования являются динамические фазы аллювия, отражающие эрозионно-аккумулятивное состояние долин [21]. Для формализации эрозионно-аккумулятивного состояния (ЭАС) площадей авторы разработали метод и рассчитали баланс материала для элементарной ячейки размером 500×500 м — сумма векторов приноса и выноса материала, пропорциональных разности высот с соседними ячейками. Для ячеек, примыкающих по диагонали, результирующий вектор принимался с коэффициентом 0,7.

Расчет ЭАС производился по формуле

$$\text{ЭАС}_{i,j} = h_{(i,j-1)} + h_{(i,j+1)} + h_{(i-1,j)} + h_{(i+1,j)} + 0,7(h_{(i-1,j-1)} + h_{(i-1,j+1)} + h_{(i+1,j-1)} + h_{(i+1,j+1)}) - 6,8h_{(i,j)} \quad (1)$$

где $h_{(i,j)}$ — высотная отметка в центре ячейки с координатами i, j .

Для ячеек с преобладанием аккумуляции значения ЭАС положительные, а с преобладанием эрозии — отрицательные. Близкие к нулю значения ЭАС могут возникать как при отсутствии процессов приноса-выноса (горизонтальная поверхность), так и в случае, когда вынос равен приносу (ровный склон). Для разбраковки этих областей отдельно была рассчитана сумма модулей (абсолютных значений) входящих и исходящих векторов.

Для учета геоморфологического фактора был применен показатель энергии рельефа (ЭР) [22], рассчитываемый как разница между максимальной и минимальной высотами в окружающих ячейках, деленная на высоту в центре ячейки.

ЭАС и ЭР рассчитываются на основе данных оцифрованного рельефа и являются независимыми от россыпной металлоносности. ФС- и МЧ-факторы формализуются на эталонных участках, где имеются уже выявленные россыпи, их применение возможно только на объектах, аналогичных эталонному по геологическому строению и минеральному составу.

Формализация ФС- и МЧ-факторов осуществлялась следующим образом: на эталонном объекте в каждой выделенной зоне с использованием данных разведочных работ (в нашем случае использован план изолиний содержания лопарита Ревдинского россыпного месторождения [23]) подсчитывается среднее содержание лопарита. Сумма средних содержаний по всем зонам нормируется на единицу,

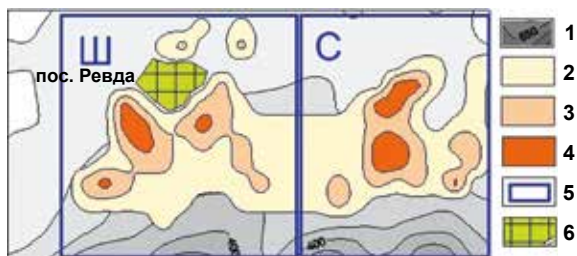


Рис. 2. Ревдинское россыпное поле и полигон моделирования: 1 – высотные отметки рельефа; 2–4 – содержания лопарита в россыпи (кг/м³): 2 – 2–4, 3 – 4–6, 4 – более 6 [23]; 5 – границы участков: Ш – эталонный Шомиокский, С – тестовый Сергеванский; 6 – населенный пункт (поселок Ревда)

Fig. 2. Revda placer field and modeling site: 1 – elevation marks of the relief; 2–4 – content of loparite in the placer (kg/m³): 2 – 2–4, 3 – 4–6, 4 – more than 6 [23]; 5 – the site boundaries: Ш – reference Shomiok zone, С – test Sergevan zone; 6 – locality (Revda village)

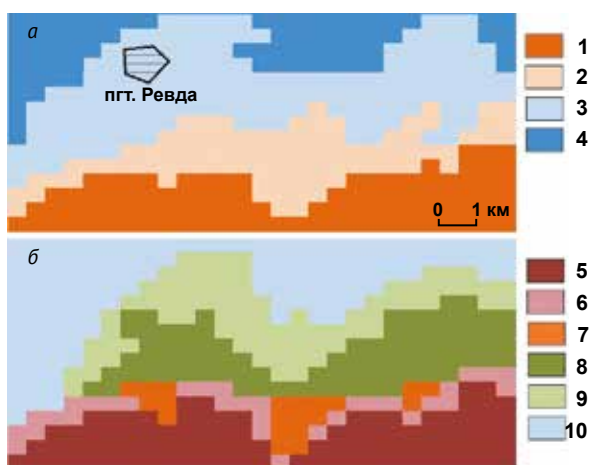


Рис. 3. Схемы распределения факторов в пределах полигона моделирования по элементарным ячейкам 500×500 м: а – мощность осадочного чехла, б – фациально-стратиграфический фактор; 1–4 – мощность осадочного чехла: 1–2 м, 2 – 2–10 м, 3 – 10–30 м, 4 – более 30 м; 5–10 – фациально-стратиграфические комплексы: 5 – выходы коренных пород массива с маломощным элювиальным чехлом, 6 – комплекс склоновых отложений, 7 – пролювиально-солифлюкционные отложения, 8 – моренные gQ_{III-2} отложения местного горного оледенения, перекрытые покровной мореной мощностью 1–5 м, 9 – флювиогляциальные fgQ_{III-2} отложения местного горного оледенения, 10 – морена покровного оледенения $gQ_{III^3-IV^1}$ мощностью более 5 м (по материалам [6])

Fig. 3. Factor distribution schemes within the modeling site by unit cells of 500×500 m: а – thickness of the sedimentary cover; б – facies-stratigraphic factor; 1–4 – thickness of the sedimentary cover: 1–2 m, 2 – 2–10 m, 3 – 10–30 m, 4 – more than 30 m; 5–10 – facies-stratigraphic complexes: 5 – bedrocks with thin eluvial cover, 6 – complex of slope deposits, 7 – proluvial-solifluction deposits, 8 – moraine gQ_{III-2} deposits of local mountain glaciation, overlain by cover moraine 1–5 m thick, 9 – fluvio-glacial fgQ_{III-2} deposits of local mountain glaciation, 10 – ice sheet moraine $gQ_{III^3-IV^1}$ more than 5 m thick (according to [6])

после чего рассчитывается коэффициент перспективности для каждой зоны, который присваивается каждой ячейке, попадающей в эту зону.

Для создания прогнозно-ориентированных логико-информационных моделей месторождений в имеющейся базе данных выделяются две совокупности: обучающая (эталонная) и тестовая, на которой проводится проверка разработанного алгоритма прогнозирования [18]. Для этого полигон моделирования был разделен на два участка — эталонный западный Шомиокский (184 элементарных ячейки) и тестовый восточный Сергеванский (156 элементарных ячеек) (рис. 2).

Статистические данные по значениям используемых факторов приведены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 3.

Для приведения факторов к одному масштабу было проведено нормирование данных по формуле

$$x_i^n = (x_i - \bar{x}) / S, \quad (2)$$

где x_i — исходная величина; x_i^n — нормированное значение; \bar{x} — среднее значение выборки; S — стандартное отклонение.

Для создания обобщенных прогнозных характеристик на данных эталонного объекта (Шомиокский участок) была построена матрица парных коэффициентов корреляции между выделенными факторами и содержаниями в россыпи лопарита (табл. 2) и сформулирован мультипликативный показатель МП, который характеризует зоны, где сочетание частных факторов создает наиболее перспективные условия для локализации редкометалльных россыпей ближнего сноса. В рамках ГИС-системы Ревдинского россыпного поля количественно оцененные факторы и рассчитанный МП получили пространственную привязку.

Рядовые показатели далеко не всегда могут однозначно характеризовать прогнозный потенциал исследуемой области, поэтому был применен МП, аналогичный используемому в геохимии для увеличения контрастности индикаторных признаков. МП рассчитывается по формуле, в числителе которой располагаются произведения результатов анализа элементов (в нашем случае количественно оцененных факторов) положительной корреляции с искомым параметром, а в знаменателе — произведения, имеющие нейтральную или отрицательную корреляцию [24].

Благодаря направленному усилению коррелирующихся полезных сигналов влияние флуктуации (фон) сводится к минимуму, в связи с чем мультипликативные ореолы проявляют более тесную связь с геолого-структурными особенностями рудных тел и месторождений, что существенно повышает надежность их интерпретации. При мультипликации m элементов амплитуда аномалии возрастает в m раз, а дисперсия — только в \sqrt{m} раз. Соответственно в \sqrt{m} раз возрастает контрастность аномалии. Также МП дает более стабильный результат, уменьшающий влияние случайных отклонений и ошибок [25].

В нашем случае МП для каждой элементарной ячейки i (МП_{*i*}) по формуле (3) был рассчитан как

Таблица 1. Статистические данные выборки используемых факторов

Характеристика	Фактор				
	ФС	МЧ	ЭАС	ЭР	МП
<i>Шомионский участок (эталонный)</i>					
Среднее	0,19	0,37	9,36	0,16	0,09
S*	0,22	0,22	62,8	0,08	0,41
Пределы изменчивости:					
от	0	0	-159	0,02	-1,05
до	0,57	0,58	228	0,47	3,80
<i>Сергеваньский участок (тестовый)</i>					
Среднее	0,23	0,35	11,6	0,16	0,09
S*	0,25	0,24	74,0	0,09	0,35
Пределы изменчивости:					
от	0	0	-319	0,05	-1,06
до	0,57	0,57	215	0,45	2,45

Примечание. S* — стандартное отклонение, ФС — фациально-стратиграфический фактор, МЧ — мощность чехла, ЭАС — эрозионно-аккумулятивное состояние, ЭР — фактор энергии рельефа, МП — мультипликативный показатель.

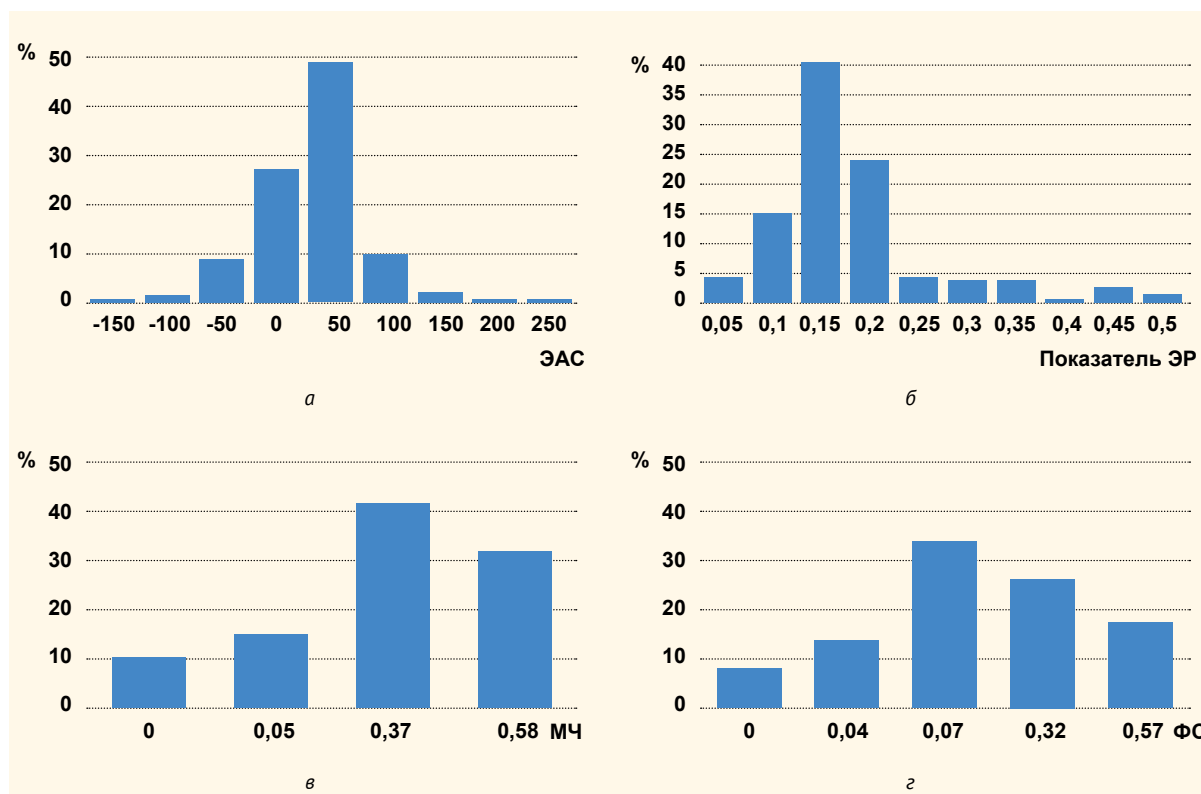


Рис. 4. Распределение значений факторов по частотам встречаемости эталонного участка: а — эрозионно-аккумулятивное состояние (ЭАС), б — энергия рельефа (ЭР), в — мощность осадочного чехла (МЧ), г — фациально-стратиграфический фактор (ФС)
Fig.4. Distribution of factor values by the frequency of occurrence of the reference site: а — erosion-accumulative state (ЭАС), б — relief energy (ЭР), в — sedimentary cover thickness (МЧ), г — facies-stratigraphic factor (ФС)

Таблица 2. Коэффициенты корреляции R между содержаниями лопарита и формализованными показателями россыпной металлоносности для эталонного Шомиокского участка

Коэффициент корреляции	Фактор россыпеобразования				МП _{эт}
	ФС	МЧ	ЭАС	ЭР	
R	0,54	0,46	0,23	-0,26	0,55

Примечание. ФС — фациально-стратиграфический фактор, МЧ — фактор мощности чехла, ЭАС — эрозионно-аккумулятивное состояние, ЭР — энергия рельефа, МП_{эт} — рассчитанный мультипликативный показатель для эталонного участка. Критическое значение $R = 0,18$ при объеме выборки $N = 184$ и доверительной вероятности $\alpha = 0,99$.

произведение значений факторов для этой ячейки, имеющих положительную корреляцию с содержанием лопарита, деленное на значение фактора с отрицательной корреляцией:

$$МП_i = \frac{ФС_i МЧ_i ЭАС_i}{ЭР_i} \quad (3)$$

Коэффициент корреляции МП с содержанием лопарита на эталонном участке ($R = 0,55$) является значимым для данной выборки (критическое значение $R = 0,18$ при объеме выборки $N = 184$ и доверительной вероятности $\alpha = 0,99$) и превышает значение коэффициентов для рядовых факторов, что позволяет использовать его в качестве критерия выделения площадей для поисков проявлений редкометалльных россыпей ближнего сноса.

Верификация предлагаемого алгоритма прогнозирования была проведена на тестовом Сергиванском участке. На основании оцифрованного рельефа, геологической карты кайнозойских отложений и морфоструктурной схемы территории с применением коэффициентов, полученных на эталонном участке, для тестового участка на ГИС основе был рассчитан массив пространственно привязанных мультипликативных показателей (МП-тест).

Коэффициент корреляции рассчитанных значений МП-тест с содержаниями лопарита в россыпи, полученными по разведочным данным, $R = 0,57$, что указывает на значимую корреляцию между этими параметрами (критическое значение $R = 0,21$ при объеме выборки $N = 156$ и доверительной вероятности $\alpha = 0,99$) (рис. 5). Это показывает возможность использования предлагаемой методики и расчетных мультипликативных показателей для прогнозирования редкометалльных россыпей ближнего сноса для постановки поисковых работ.

Проблемы и перспективы методики

Предлагаемый метод позволяет проводить прогнозную оценку оперативно, с меньшими затратами и в автоматизированном режиме:

- может осуществляться дистанционно, без специализированных полевых и лабораторных иссле-

дований, поскольку использует стандартные данные геологических отчетов и картографического материала;

- состоит из стандартных операций в рамках разработанного алгоритма и не требует высокой квалификации и большого практического опыта оператора [26].

В настоящее время метод находится в стадии разработки, и имеется ряд нерешенных вопросов, которые необходимо исследовать при продолжении работ:

- в предлагаемой модели учтены не все возможные факторы, влияющие на локализацию и параметры россыпей, — необходимо дополнение модели факторами учета коренных источников, промежуточных коллекторов и потоков рассеяния;
- верификация методики произведена только на одном объекте, необходимо тестирование на других аналогичных площадях;
- полученное уравнение расчета МП решает поставленную задачу в первом приближении, основываясь на предположении о линейном характере связи выделенных факторов с россыпным потенциалом территорий; в случае нелинейности этих связей расчетные формулы МП могут измениться, но качественный характер скорее всего сохранится.

Применение комплексных мультипликативных показателей позволяет уменьшить влияние отдельных характеристик (даже если они имеют нелинейную корреляционную зависимость) и усилить общие закономерности. Данный вопрос требует дополнительных исследований на следующих этапах разработки прогнозной модели.

На сегодня предлагаемая система прогнозирования россыпного потенциала находится в стадии разработки и нуждается в дальнейшем совершенствовании, но уже имеющиеся данные показывают возможность применения аналогичного подхода для широкого круга россыпных объектов различного вещественного, фациального, структурного и динамического типов.

Применение разрабатываемой методики не подразумевает отказ от существующих методов прогнозирования россыпного потенциала территорий. Она не сможет полностью заменить специалиста

и поэтому может быть использована в качестве гибридной системы, работающей в режиме диалога «оператор — компьютер», облегчающей специалисту процесс принятия решения. Аналогичный подход уже используется для экспресс-оценки новых рудопроявлений золота в Арктической зоне России [9].

Выводы

1. На основе формализованных (количественно оцененных) факторов россыпеобразования методами численного компьютерного моделирования и ГИС-технологий создана компьютеризированная система пространственного расчета и позиционирования мультипликативных показателей, оценивающих потенциал россыпной редкометалльной металлоносности.

2. На «полигоне моделирования» с уже известными месторождениями и россыпепроявлениями в пределах «эталонной» выборки данных формализованные показатели выделяются и оцифровываются, верифицируются на «тестовой» выборке. В случае подтверждения ее адекватности система может быть использована для прогнозирования россыпного потенциала на площадях, сходных по геолого-структурным и металлогеническим характеристикам с полигоном моделирования. Метод получил подтверждение на участке Сергиванском.

3. Создаваемая система позволяет собирать, хранить, обрабатывать и визуализировать данные на всех этапах процесса создания прогнозных оценок. Она не требует специализированных данных и использует данные стандартных геологических отчетов и картографические материалы. Применение методики основано на стандартных алгоритмах и не требует от оператора высокой квалификации и обширного геологического опыта.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ

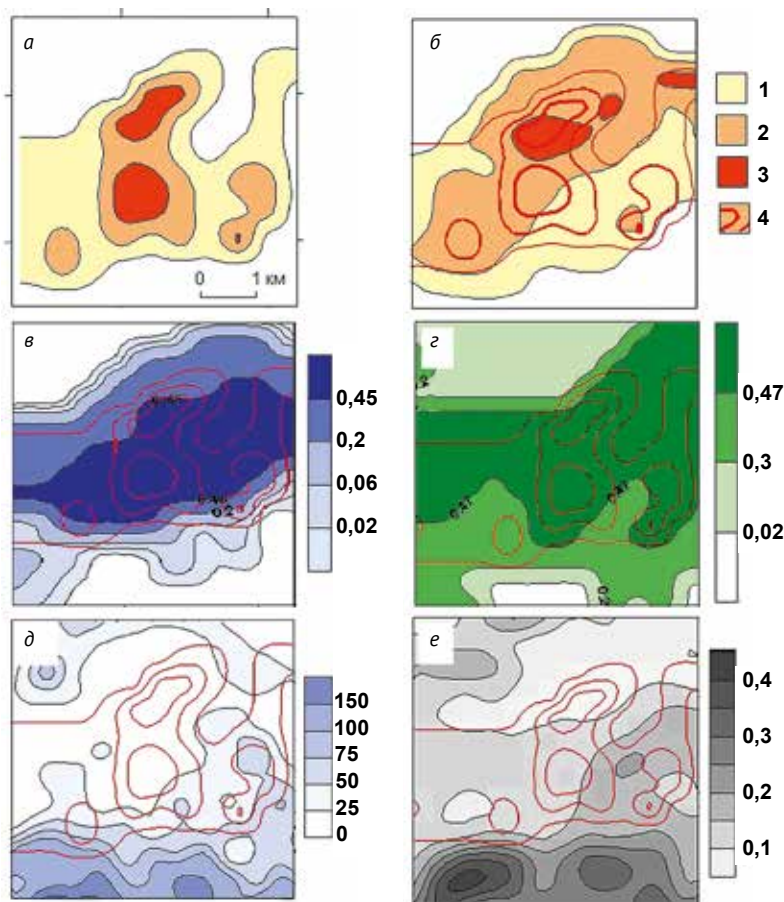


Рис. 5. Формализованные факторы россыпеобразования и верификация методики прогнозирования редкометалльных россыпей на основе расчета мультипликативных показателей на Сергиванском участке: а – содержания лопарита в россыпи по данным геологоразведочных работ [23]; б – расчетные значения содержания лопарита по мультипликативным показателям (МП); в – ФС фактор; г – фактор мощности осадочного чехла (МЧ); д – ЭАС-фактор; е – ЭР-фактор; 1–3 – содержания лопарита в россыпи (kg/m^3): 1 – 2–4, 2 – 4–6, 3 – более 6; 4 – изолинии содержания лопарита в россыпи в соответствии с рис. 5а

Fig. 5. Formalized factors of placer formation and verification of the method for forecasting rare metal placers based on the calculation of multiplicative indicators at the Sergevan Site: а – the content of loparite in the placer according to geological exploration data [23]; б – calculated values of the content of loparite by multiplicative indicators (MI); в – ФС factor; г – the sedimentary cover thickness factor (МЧ); д – ЭАС factor; е – ЭР factor; 1–3 – content of loparite in placer (kg/m^3): 1 – 2–4, 2 – 4–6, 3 – more than 6; 4 – isolines of the loparite content in the placer in accordance with Fig. 5a

№ 18-05-00113 «Разработка поисково-ориентированных геолого-генетических моделей россыпных месторождений и создание компьютеризированной системы прогноза россыпного потенциала стратегических металлов (редкие металлы, золото) Арктической зоны Российской Федерации» при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России № 075-15-2020-802.

Литература

1. Лаломов А. В., Бочнева А. А., Чефранов Р. М., Чефранова А. В. Россыпные месторождения Арктической зоны России: современное состояние и пути развития минерально-сырьевой базы // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 2. — С. 66—77.
2. Пеков И. В. Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. — М.: ТО «Земля», 2001. — 464 с.

3. Козарко Л. Н. Проблемы генезиса гигантских редкометалльных месторождений Кольского полуострова // Российская Арктика: геологическая история, минерагения, экология. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. — С. 773—787.
4. Лихачев А. С. Отчет о поисковых работах на россыпи лопарита в юго-восточных предгорьях Ловозерских тундр на Кольском полуострове (отчет Сейдозерской партии за 1958—1962 гг.) / Сев.-Зап. геол. упр. Кольская комплекс. экспедиция. — Пос. Ревда Мурман. обл., 1963. — (Фондовая, № ТФГИ № 523).
5. Лихачев А. С., Подрез М. Д. Отчет о результатах поисковых работ на россыпи лопарита в южных предгорьях Ловозерских тундр на Кольском полуострове за 1963—66 гг. / Сев.-Зап. геол. упр. Кольское районное геологоразведоч. упр. Ловозер. геологоразведоч. партия. Пос. Ревда Мурман. обл., 1967. — (Фондовая, № ТФГИ № 1347).
6. Лихачев А. С., Ельников Е. И., Пантелеймонов В. М., Сотемский В. Г. Отчет о детальной разведке Шомиокского участка Ревдинского россыпного месторождения лопарита с подсчетом запасов по состоянию на 01.07.1980 г. / ПГО Севзапгеология, Мурманская ГРЭ. — Апатиты, 1980. — (Фондовая, № ТФГИ № 2823).
7. Россыпные месторождения России и других стран СНГ / Отв. ред. Н. П. Лаверов, Н. Г. Патык-Кара. — М.: Науч. мир, 1997. — 479 с.
8. Евзеров В. Я. Роль древних кор выветривания в формировании антропогенных отложений и связанных с ними месторождений северо-восточной части Балтийского щита // Литология и полез. ископаемые. — 1978. — № 1. — С. 50—58.
9. Поротов Г. С. Прогнозирование и поиски месторождений полезных ископаемых. — СПб.: Нац. минерал.-сырьевой ун-т «Горный», 2012. — 120 с.
10. Шумилов Ю. В. К вопросу о количественной оценке процессов россыпеобразования // Проблемы геологии россыпей. — Магадан: СВКНИИ, 1970. — С. 125—132.
11. Поликарпочкин Н. Н. Вторичные ореолы и потоки рассеяния. — Новосибирск: Наука, 1976. — 284 с.
12. Патык-Кара Н. Г., Кленов В. И. Численные имитационные модели формирования россыпей золота во врезающихся долинах // Материалы Совещания по геологии россыпей и кор выветривания. — Пермь: Перм. гос. ун-т, 2005. — С. 124—127.
13. Patyk-Kara N. G., Lalomov A. V. Dynamic numerical modelling of sea-land interaction in technogeneous landscapes // Proceedings of the Tenth International Symposium on River Sedimentation (10th ISRS). — Vol. 5. — Moscow, Moscow State Univ., 2007. — P. 94—97.
14. Khrushchov D., Lalomov A., Lobasov A. et al. Modeling of prospective sedimentary formations: digital structural-lithological and ecological-mining-geological models // 14 Geokinematischer tag. Freiberg, 16 and 17 mai 2013. — P. 215—229.
15. Khrushchov D., Lalomov A., Chizhova I. et al. Structural-lithological geological-dynamic modeling of heavy minerals placers // 19th International Sedimentological Congress from 18 to 22 august 2014 in Geneva, Switzerland. Sedimentology at the crossroads of new frontiers. Abstracts Book / Univ. de Geneve. — Geneva, Switzerland, 2014, 18—22 Aug. — P. 350. — (19th ISC).
16. Laverov N., Chizhova I., Khrushchov D., Lalomov A. Digital Modeling of Heavy Mineral Placer Deposits for Defining of Prospects of Further Deposit Development // Geological 3D Modelling and Soils: functions and threats. Proceedings of the 8th European Congress on REgional GEOscientific Cartography and Information Systems, Barcelona, Catalonia, Spain, June 15th—17th 2015. — Barcelona: Inst. Cartografia i Geologia de Catalunya, 2015. — P. 20—21. — ISBN: 978-84-393-9292-7.
17. Hou B., Keeling J., Reid A. et al. Heavy mineral sands in the Eucla Basin, southern Australia: Deposition and province-scale prospectivity // Economic Geology. — 2011. — 106. — P. 687—712.
18. Чижова И. А., Лобанов К. В., Волков А. В. Логико-информационные модели для прогноза и оценки новых месторождений золота в Арктической зоне России // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 107—117. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-107-117.
19. Шило Н. А. Учение о россыпях. — Владивосток: Дальнаука, 2002. — 576 с.
20. Патык-Кара Н. Г. Минерагения россыпей: типы россыпных провинций. — М.: ИГЕМ РАН, 2008. — 528 с.
21. Карташов И. П. Фации, динамические фазы и свиты аллювия // Изв. АН СССР. Сер. геол. — 1961. — № 9. — С. 77—90.
22. Спиридонов А. И. Геоморфологическое картирование. — М.: Недра, 1985. — 184 с.
23. Лихачев А. С. Геологическая записка к ТЭО и расчету временных кондиций по Ревдинскому россыпному месторождению / ПГО Севзапгеология, Мурманская ГРЭ. — Апатиты, 1984. — (Фондовая, № ТФГИ № 3226).
24. Григорян С. П., Соловов А. П., Кузин М. Ф. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. — М.: Недра, 1983. — 191 с.
25. Ворошилов В. Г. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учебное пособие. — Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. — 104 с.
26. 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, № 2. — С. 67—76. — DOI: 10.18599/grs.2020.2.67-76.

Информация об авторах

Лаломов Александр Валерианович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), профессор, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614990, Россия, Пермь, ул. Букирева, д. 15), e-mail: lalomov@mail.ru.

Чефранов Роман Михайлович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: roman_chefr@bk.ru.

Библиографическое описание данной статьи

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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-54-65.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR FORECASTING THE POTENTIAL OF PLACERS BY FORMALIZING THE FACTORS OF PLACER FORMATION BASED ON LOPARITE PLACERS OF THE LOVOZERO MASSIF

Lalomov A. V.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (Moscow, Russian Federation)
Perm State National Research University (Perm, Russian Federation)

Chefranov R. M.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (Moscow, Russian Federation)

The article was received on September 18, 2020

Abstract

Within the Northern periphery of the Lovozero massif (Kola Peninsula), the authors have identified the main formation factors of proximal (near drift) rare-metal loparite placers. They have performed the formalization (numerical evaluation) of factors; developed multiplicative indicators that reflect the placer potential of territories; and assessed the effectiveness of the developed indicators on the reference objects of the Northern periphery of the massif. The developed method allows automating the process of forecasting of placer parameters.

Keywords: *placers, rare metals, multiplicative indicators, forecast model.*

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research grant No. 18-05-00113 “Development of exploration-oriented geological and genetic models of placer deposits and the creation of a computerized system for forecasting the placer potential of strategic metals (rare metals, gold) in the Russian Arctic zone” and with the financial support of the project by the Russian Federation represented by the Ministry of education and science of Russia № 075-15-2020-802.

References

1. *Lalomov A. V., Bochneva A. A., Chefranov R. M., Chefranova A. V.* Rossypnye mestorozhdeniya Arkticheskoi zony Rossii: sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy. [Placer deposits of Arctic zone of Russia: present-day condition and paths of the development of mineral raw materials base]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2015, no. 2, pp. 66—77. (In Russian).
2. *Pekov I. V.* Lovozerskii massiv: istoriya issledovaniya, pegmatity, mineraly. [Lovozer sky massif: history of research, pegmatites, minerals]. Moscow, TO "Zemlya", 2001, 464 p. (In Russian).
3. *Kogarko L. N.* Problemy genezisa gigantskikh redkometall'nykh mestorozhdenii Kol'skogo poluostrova. [Problems of genesis of giant rare metal deposits of the Kola Peninsula]. *Rossiiskaya Arktika: geologicheskaya istoriya, minerageniya, ekologiya*. St. Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 2002, pp. 773—787. (In Russian).
4. *Likhachev A. S.* Otchet o poiskovykh rabotakh na rossypi loparita v yugo-vostochnykh predgor'yakh Lovozerskikh tundr na Kol'skom poluostrove (otchet Seidozerskoi partii za 1958—1962 gg.). [Report on search operations on the loparite placer in the South-Eastern foothills of the Lovozero tundra on the Kola Peninsula (report of the Seidozero detachment for 1958—1962)]. *Sev.-Zap. geol. upr. Kol'skaya kompleks. ekspeditsiya*. Pos. Revda Murman. obl., 1963. (Fondovaya, no. TFGI no. 523). (In Russian).
5. *Likhachev A. S., Podrez M. D.* Otchet o rezul'tatakh poiskovykh rabot na rossypi loparita v yuzhnykh predgor'yakh Lovozerskikh tundr na Kol'skom poluostrove za 1963—66 gg. [Report on the results of search operations on the loparite placer in the southern foothills of the Lovozero tundra on the Kola Peninsula for 1963—66]. *Sev.-Zap. geol. upr. Kol'skoe raionnoe geologorazvedoch. upr. Lovoz. geologorazvedoch. partiya*. Pos. Revda Murman. obl., 1967. (Fondovaya, no. TFGI no. 1347). (In Russian).
6. *Likhachev A. S., El'nikov E. I., Panteleimonov V. M., Sotemskii V. G.* Otchet o detal'noi razvedke Shomiokskogo uchastka Revdinskogo rossypnogo mestorozhdeniya loparita s podschetom zapasov po sostoyaniyu na 01.07.1980 g. [Report on detailed exploration of the Shomioksky section of the Revdinsky placer Deposit of loparite with reserves calculation as of 01.07.1980]. *PGO Sevzappeologiya, Murmanskaya GRE. Apatity*, 1980. (Fondovaya, no. TFGI no. 2823). (In Russian).
7. *Rossypnye mestorozhdeniya Rossii i drugikh stran SNG*. Otv. red. N. P. Laverov, N. G. Patyk-Kara. Moscow, Nauch. mir, 1997. 479 p. (In Russian).
8. *Evzerov V. Ya.* Rol' drevnykh kor vyvetriviya v formirovanii antropogenovykh otlozhenii i svyazannykh s nimi mestorozhdenii severo-vostochnoi chasti Baltiiskogo shchita. [Role of ancient weathering crusts in genesis of Anthropogen sediments and concerned mineral deposits of the north-west part of the Baltic Shield]. *Litologiya i polez. iskopaemye*, 1978, no. 1, pp. 50—58. (In Russian).
9. *Porotov G. S.* Prognozirovanie i poiski mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh. [Forecasting and prospecting for mineral deposits]. St. Petersburg, Nats. mineral-syr'evoi un-t "Gornyi", 2012, 120 p. (In Russian).
10. *Shumilov Yu. V.* K voprosu o kolichestvennoi otsenke protsessov rossypeobrazovaniya. [On the question of the quantitative assessment of placer formation processes]. *Problemy geologii rossypei*. Magadan, SVKNII, 1970, pp. 125—132. (In Russian).
11. *Polikarpochkin N. N.* Vtorichnye oreoly i potoki rasseyaniya. [Secondary halos and scattering streams]. Novosibirsk, Nauka, 1976, 284 p. (In Russian).
12. *Patyk-Kara N. G., Klenov V. I.* Chislennyye imitatsionnyye modeli formirovaniya rossypei zolota vo vrezayushchikh dolinakh. [Numerical simulation models of the formation of gold placers in incised valleys]. *Materialy Soveshchaniya po geologii rossypei i kor vyvetriviya*. Perm', Perm. gos. un-t, 2005, pp. 124—127. (In Russian).
13. *Patyk-Kara N. G., Lalomov A. V.* Dynamic numerical modelling of sea-land interaction in technogeneus landscapes. *Proceedings of the Tenth International Symposium on River Sedimentation (10th ISRS)*. Vol. 5. Moscow, Moscow State Univ., 2007, pp. 94—97.
14. *Khrushchov D., Lalomov A., Lobasov A., Chizhova I., Remezova O., Kovalchuk M., Svival'neva T., Kravchenko O., Bosevskaya L.* Modeling of prospective sedimentary formations: digital structural-lithological and ecological-mining-geological models. *14 Geokinematischer tag*. Freiberg, 16 and 17 mai 2013, pp. 215—229.
15. *Khrushchov D., Lalomov A., Chizhova I., Lobasov I., Kovalchuk M., Vasilenko S., Kravchenko E., Svival'neva T.* Structural-lithological geological-dynamic modeling of heavy minerals placers. *19th International Sedimentological Congress from 18 to 22 august 2014 in Geneva, Switzerland. Sedimentology at the crossroads of new frontiers. Abstracts Book*. Univ. de Geneve. Geneva, Switzerland, 2014, 18—22 Aug., pp. 350. (19th ISC).
16. *Laverov N., Chizhova I., Khrushchov D., Lalomov A.* Digital Modeling of Heavy Mineral Placer Deposits for Defining of Prospects of Further Deposit Development. *Geological 3D Modelling and Soils: functions and threats. Proceedings of the 8th European Congress on REgional GEOscientific Cartography and Information Systems*, Barcelona, Catalonia, Spain, June 15th—17th 2015. Barcelona, Inst. Cartografio i Geologio de Catalunya, 2015, pp. 20—21. ISBN: 978-84-393-9292-7.
17. *Hou B., Keeling J., Reid A., Fairclough M., Warland I., Belousova E., Frakes L., Hocking R.* Heavy mineral sands in the Eucla Basin, southern Australia: Deposition and province-scale prospectivity. *Economic Geology*, 2011, 106, pp. 687—712.
18. *Chizhova I. A., Lobanov K. V., Volkov A. V.* Logiko-informatsionnyye modeli dlya prognoza i otsenki novykh mestorozhdenii zolota v Arkticheskoi zone Rossii. [Logical and information models for the forecast and rapid assessment of new gold deposits in the Arctic zone of Russia]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2019,

- no. 4 (36), pp. 107—117. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-107-117. (In Russian).
19. *Shilo N. A.* Uchenie o rossypyakh. [The doctrine of placers]. Vladivostok, Dal'nauka, 2002, 576 p. (In Russian).
20. *Patyk-Kara N. G.* Minerageniya rossypei: tipy rossypanykh provintsii. [Minerageny of placers: types of placer provinces]. Moscow, IGEM RAN, 2008, 528 p. (In Russian).
21. *Kartashov I. P.* Fatsii, dinamicheskie fazy i svity al'yuvii. [Facies, dynamic phases and alluvium formations]. Izv. AN SSSR. Ser. geol., 1961, no. 9, pp. 77—90. (In Russian).
22. *Spiridonov A. I.* Geomorfologicheskoe kartirovanie. [Geomorphological mapping]. Moscow, Nedra, 1985, 184 p. (In Russian).
23. *Likhachev A. S.* Geologicheskaya zapiska k TEO i raschetu vremennykh konditsii po Revdinskomu rossypnomu mestorozhdeniyu. [Geological note to the feasibility study and calculation of temporary conditions for the Revdinskoye placer deposit]. PGO Sevzapgeologiya, Murmanskaya GRE. Apatity, 1984. (Fondovaya, no. TFGI no. 3226). (In Russian).
24. *Grigoryan S. P., Solovov A. P., Kuzin M. F.* Instruksiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdenii. [Instructions on geochemical methods of prospecting for ore deposits]. Moscow, Nedra, 1983, 191 p. (In Russian).
25. *Voroshilov V. G.* Geokhimicheskie metody poiskov mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh: Uchebnoe posobie. [Geochemical methods of prospecting for mineral deposits: textbook]. Tomsk, Izd-vo Tom. politekhn. un-ta, 2011, 104 p. (In Russian).
26. *Lalomov A. V., Boneva A. A., Chefranov R. M.* The development of numerical forecasting systems of primary sources of gold on the results of placer sampling in the example Vagran placer cluster (North Urals). Georesursy = Georesources, 2020, vol. 22, iss. 2, pp. 67—76. Available at: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.67-76>.

Information about the authors

Lalomov Alexander Valerianovich, Doctor of Geology and Mineralogy, Leading Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), Professor, Perm State National Research University (15, Bykireva str., Perm, Russia, 614990), e-mail: lalomov@mail.ru.

Chefranov Roman Mikhailovich, PhD of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Mineralogy, Petrography and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: roman_chefr@bk.ru.

Bibliographic description

Lalomov A. V., Chefranov R. M. Development of a method for forecasting the potential of placers by formalizing the factors of placer formation based on loparite placers of the Lovozero massif. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 4 (40), pp. 54—65. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-54-65. (In Russian).

© Lalomov A. V., Chefranov R. M., 2020