

УДК 553.04

ПОИСКОВО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РОССЫПЕЙ БЛИЖНЕГО СНОСА НА ПРИМЕРЕ ЛОВОЗЕРСКОГО РОССЫПНОГО РАЙОНА

© 2023 г. Р. М. Чефранов^{a, *}, А. В. Лаломов^{a, b, **}, А. В. Чефранова^{a, ***}

^aИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Москва, Российская Федерация

^bПермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермь, Российская Федерация

*E-mail: roman_chefr@bk.ru

**E-mail: lalomov@mail.ru

***E-mail: achefra@mail.ru

Поступила в редакцию 11.03.2022 г.

После доработки 22.05.2022 г.

Принята к публикации 27.09.2022 г.

Редкие металлы, в число которых входят и редкоземельные, являются важным сырьем, определяющим научно-технический уровень развития промышленности и, в первую очередь, ее инновационных технологий. Важным источником редких металлов может служить группа уникальных по генезису и минеральному составу лопаритовых россыпей, связанных с Ловозерским массивом нефелиновых сиенитов (Кольский полуостров). В настоящей работе, в пределах северной периферии Ловозерского массива, включающей Ревдинское россыпное месторождение, выделены основные факторы, контролирующие формирование редкометалльных лопаритовых россыпей ближнего сноса. Произведена формализация (численная оценка) этих факторов и выработаны мультипликативные показатели, позволяющие прогнозировать россыпной потенциал территории. Для оценки эффективности предлагаемой методики, на основании разработанных мультипликативных коэффициентов рассчитаны независимые прогнозы россыпной металлоносности для западного и восточного россыпемещающих участков Ревдинской группы россыпей. Для дополнительной верификации методики в работе приведено сравнение полученных результатов с аналогичными прогнозами, полученными посредством методов линейной регрессии и случайного леса деревьев регрессии. Разрабатываемая методика позволяет автоматизировать процесс прогнозирования параметров россыпной металлоносности, что имеет особенно большое значение для оценки сложных с точки зрения поисков и разведки глубокозалегающих россыпей, не проявленных в поверхностных шлихо-геохимических ореолах.

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

DOI: 10.31857/S0016777023020016, **EDN:** LWUBKU

ВВЕДЕНИЕ

В перечень основных видов стратегического минерального сырья входят золото, платина, олово, вольфрам, титан, цирконий, ниобий, тантал, скандий, редкие земли иттриевой группы. Редкие металлы находят широкое применение в современных высокотехнологичных отраслях промышленности – электронике, оптике, энергетике, производстве высоколегированных сплавов и т.д. Область их применения постоянно расширяется. Перспективный прогнозируемый мировой рост потребления редких металлов составляет около 10% в год. В балансе запасов этих место-

рождений россыпи составляют существенную, а иногда и преобладающую часть. Повышенная рентабельность и технологическая доступность россыпей делают их первоочередными объектами при освоении новых или реанимации старых рудно-россыпных площадей (Лаломов и др., 2015).

Легкодоступные близповерхностные россыпные объекты к настоящему времени уже выявлены и в значительной мере отработаны, а основные дальнейшие перспективы связаны со сложными с точки зрения поисков и разведки глубокозалегающими россыпями, не проявленными в поверхностных шлихо-геохимических

ореолах. Их прогнозирование возможно только на основе комплексного анализа всей совокупности россыпеобразующих факторов (наличие коренных источников, благоприятные динамические и литолого-фациальные условия концентрации россыпных минералов и др.), 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. Далее, на основе формализованных (количественно оцененных) факторов методами численного компьютерного моделирования и ГИС-технологий можно создать систему пространственно привязанных мультипликативных показателей, оценивающих потенциал россыпной металлоносности. Полученные результаты могут быть использованы для создания методики прогнозной оценки россыпной металлоносности на закрытых и малоисследованных территориях. В настоящей работе в качестве объекта исследования для разработки модели редкометалльных россыпей ближнего сноса используются россыпи лопарита северной периферии Ловозерского массива.

В настоящее время единственным действующим источником редкоземельных металлов (и значительной части редких металлов) в России является Ловозерский ГОК, где добыча ведется в сложных горно-геологических условиях при низкой рентабельности, причем по мере выработки доступных ресурсов сложность горных работ и себестоимость продукции увеличиваются. В связи с этим возникает насущная потребность в диверсификации сырьевых источников комбината: разработке новых технологических схем переработки традиционных руд, вовлечении в переработку новых видов сырья (эвдиалитового и апатит-лопаритового), переходе к добыче руд открытым карьером.

Одним из возможных источников производства продукции комбината могут служить уникальные по своему составу и генезису россыпи лопарита, расположенные по периферии Ловозерского массива. Наиболее перспективным здесь является Ревдинское россыпное месторождение, приуроченное к северным предгорьям массива и являющееся основным предметом настоящего исследования в контексте развития методики прогнозно-ориентированного моделирования.

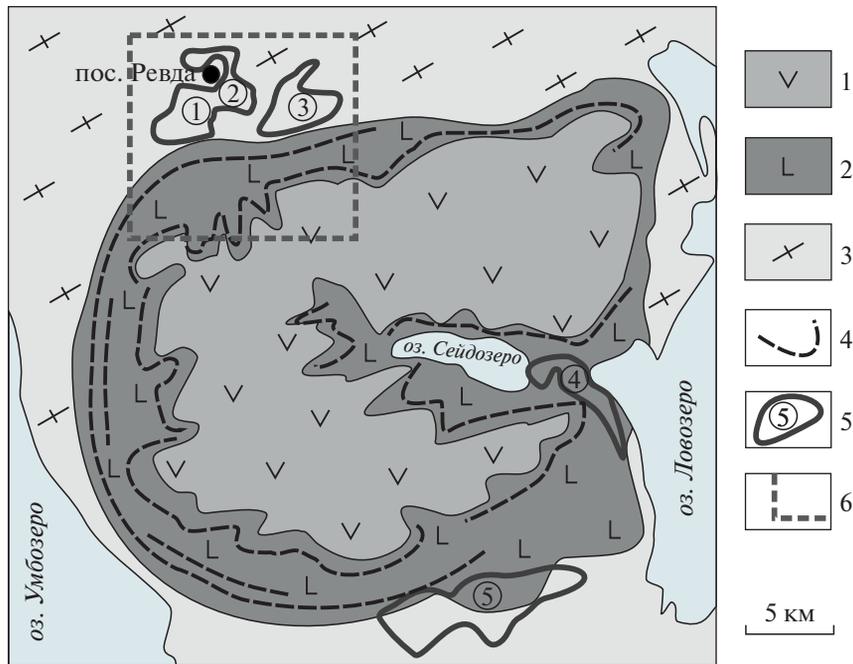
ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РОССЫПЕЙ ЛОВОЗЕРСКОГО МАССИВА

Ловозерский массив относится к позднедевонскому комплексу щелочных и нефелиновых сиенитов и представляет собой сложнопостроенную многофазную интрузию площадью 650 км². Породы Ловозера весьма разнообразны, подавляющее их большинство относится к формации агпаитовых нефелиновых сиенитов (Пеков, 2001). Вмещающими являются докембрийские гранито-гнейсы. По данным геофизических исследований, массив имеет крутое падение, причем щелочные породы прослеживаются на глубину более 7 км (Семенов, 1972).

Основными фазами в составе массива являются дифференцированный лопаритоносный комплекс луавритов-фойяитов-уртитов и комплекс эвдиалитовых луавритов, слагающих верхнюю часть массива. Слои нефелиновых сиенитов залегают согласно, почти горизонтально (падение к центру массива не более 10°–15°). В разрезе пород дифференцированного комплекса встречаются горизонты уртитов, резко обогащенные лопаритом. Лопаритовое оруденение приурочено к верхней и нижней зонам дифференцированного комплекса. В верхней зоне залегает горизонт малиньитового состава мощностью около 20 см, содержащий до 25% лопарита, в нижней находятся несколько рудных горизонтов уртитов и реже луавритов, содержащих промышленные концентрации лопарита (Когарко, 2002). Потенциально рудоносный комплекс эвдиалитовых луавритов представлен пластообразной интрузией, прорывающей и перекрывающей породы дифференцированного комплекса. На заключительном этапе становления массива появился комплекс даек щелочных лампрофиров (Когарко, 2002). Рудник “Карнасурт” разрабатывает лопаритовые уртиты и малиньиты в составе верхней зоны дифференцированного комплекса, в нижней части заложен рудник “Умбозеро” (Пеков, 2001).

Лопаритовые россыпи в пределах Ловозерского массива и на его флангах расположены по северной периферии плутона (Шомиокский, Ревдинский и Сергеваньский 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 перемычка между озерами Сейдозеро и Ловозеро) (фиг. 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: обрабо-



Фиг. 1. Схема геологического строения Ловозерского массива со снятыми четвертичными отложениями. 1 – эвдиалитовые лавиты нерасчлененные; 2 – дифференцированный лопаритоносный комплекс лавитов-фойитов-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 Лихачев, 1963ф; Лихачев, Подрез, 1967ф; Лихачев и др., 1980ф); 6 – полигон моделирования.

таннами ледником локальными депрессиями коренного ложа (Россыпные..., 1997). В разрезе рыхлых отложений северного обрамления массива выделяются пять основных комплексов, соответствующих основным этапам развития региона в кайнозой: доледниковые элювиально-склоновые мезозойско-кайнозойские отложения e-d MZ–N (?), флювиогляциальные fgQ_{III}^{1-2} и моренные gQ_{III}^{1-2} отложения местного горного оледенения и перекрывающая морена покровного оледенения $gQ_{III}^{3-IV^1}$, а также современные элювиально-склоновые и пролювиальные отложения (Евзеров, 1978; Лихачев и др., 1980ф¹).

Россыпи Ловозерского массива приурочены к флювиогляциальным отложениям и морене местного оледенения. Отложения элювиально-склонового комплекса, развитые по гранито-гнейсовым породам, и отложения покровного оледенения слабо обогащены лопаритом, содержание в них этого минерала редко превышает 1 кг/м^3 . Наибольшее содержание приурочено к нижней части продуктивного пласта – комплексу гляци-

альных и флювиогляциальных отложений местного горного оледенения, характеризующихся преобладанием обломочного материала щелочных пород. Повышенное содержание лопарита до 36 кг/м^3 приурочено к депрессиям коренного рельефа. Среднее содержание по Шомиокской россыпи составляет 4.5 кг/м^3 при мощности пласта 17.1 м , по Сергеванской россыпи – 3.9 кг/м^3 при мощности пласта 22.65 м (Лихачев и др., 1980ф). Россыпное месторождение охватывает почти всю территорию развития шлейфа отложений местных ледников в северных предгорьях Ловозерского массива.

Лопарит в изучаемых россыпях представлен преимущественно свободными зернами с преобладающим размером от 0.05 до 0.8 мм . Это высококомплексное редкометалльное сырье. В лопарите ловозерских россыпей содержится $8.3\% \text{ Nb}_2\text{O}_5$, $0.67\% \text{ Ta}_2\text{O}_5$, $39.8\% \text{ TiO}_2$, $34.9\% \text{ } \Sigma \text{TR}_2\text{O}_3$ (Лихачев и др., 1980ф).

ЧИСЛЕННОЕ ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В НАУКЕ О РОССЫПЯХ

В научной геологической литературе по прогнозированию и поискам месторождений полезных ископаемых среди множества имеющихся математических методов прогнозирования наи-

¹ 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).

большой интерес представляют три: регрессионный анализ, информационный анализ и распознавание образов (Поротов, 2012).

Регрессионный анализ использует структурные, магматические, литологические и другие свойства объектов, а также параметры магнитных и геохимических аномалий. Он основан на множественной зависимости (не обязательно линейной) 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 некоторого свойства, тем более это свойство информативно. По сумме информативности свойств можно оценивать перспективность территории, на которой эти свойства изучены (высокая, средняя, низкая).

Распознавание образов также основано на анализе частоты свойств “рудных” и “безрудных” объектов. Основное отличие от предыдущего метода состоит в том, что исследуются сочетания свойств, которые более информативны, а не отдельные свойства. Путем анализа сочетаний свойств из них выбираются наиболее информативные, использующиеся для оценки рудоносности прогнозной территории.

Одним из первых вопросами количественной оценки процессов россыпеобразования начал заниматься Ю.В. Шумилов (Шумилов, 1970). 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 (Поликарпочкин, 1976).

В работах Н.Г. Патык-Кара с соавторами были разработаны численные модели россыпей золота и касситерита ближнего сноса в условиях различных взаимоотношений в системе “коренной источник—аллювиальная долина” с использованием изменяющихся литодинамических характеристик аллювиального и прибрежно-морского потоков (Патык-Кара, Кленов, 2005; Patyk-Kara, Lalomov, 2007).

В работах ряда ученых в целях выявления россыпемещающих площадей (редкометалльно-титановых и россыпей алмазов) применялся факторный анализ (Патык-Кара и др., 2002; Бочнева, Патык-Кара, 2005; Бочнева и др., 2013).

В рамках совместных российско-украинских проектов РФФИ (2012–2013, 2014–2015 гг.) разрабатывались цифровые геолого-динамические модели редкометалльно-титановых россыпей, были

сформулированы основные принципы построения количественных оценок факторов россыпеобразования и выявлены основные параметры мультипликативных показателей, отражающих россыпной потенциал изучаемых территорий (Khrushcov et al., 2013; Khrushcov et al., 2014; Laverov et al., 2015).

А.В. Лаломовым была изучена дифференциация тяжелых минералов (на примере касситерита) во вдольбереговом потоке наносов и предложена модель процессов прибрежно-морского россыпеобразования (Лаломов, 2003), а впоследствии в соавторстве с С.Э. Таболичем детально описаны механизмы формирования концентраций титан-циркониевых минералов прибрежно-морских россыпей сублитеральной и литеральной зон (Лаломов, Таболич, 2009, 2011, 2013; Лаломов и др., 2016).

Комплексный количественный подход относительно редкометалльно-титановых россыпей в настоящее время разрабатывается австралийскими учеными из “LEME PIRSA” при изучении объектов Южной и Восточной Австралии (Hou et al., 2011).

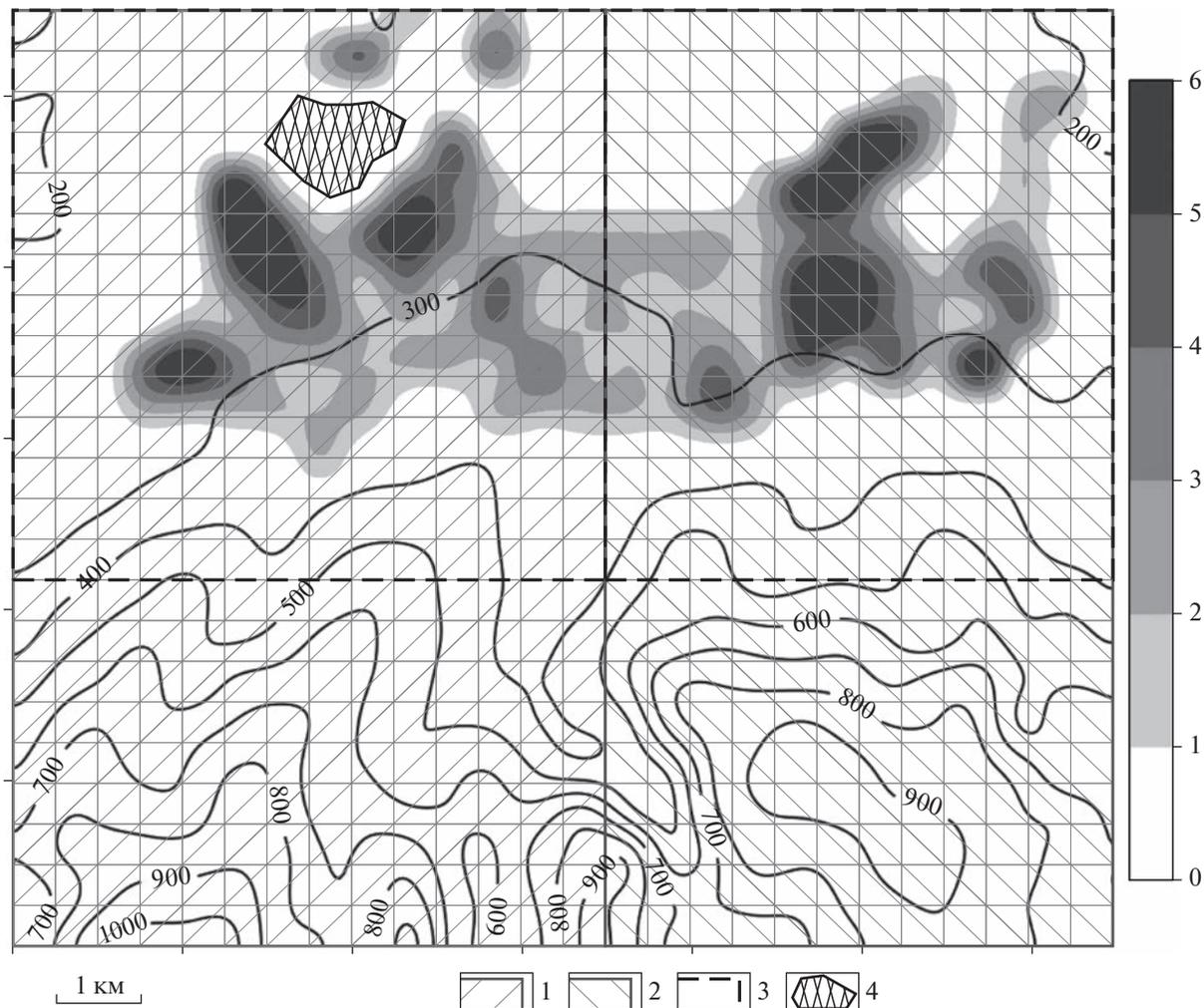
На базе информационного анализа и метода распознавания образов разрабатываются логико-информационные модели для прогноза и оценки новых месторождений золота в Арктической зоне России (Чижова и др., 2019).

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований использовались материалы производственных отчетов по поискам, разведке и подсчету запасов Ревдинского россыпного месторождения лопарита (Лихачев, 1963ф²; Подрез, 1967ф³; Лихачев и др., 1980ф). Были изучены геологическое строение района, его металлогения, геоморфология, строение осадочного чехла, структура и минеральный состав россыпей (фиг. 2). Геоморфология, фациальный состав и минералогия четвертичных отложений были уточнены в процессе проведения на россыпи маршрутных полевых работ и последующих аналитических исследований.

² 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.). Северо-Западное геологическое управление, Кольская комплексная экспедиция, пос. Ревда Мурманской обл. 1963. (фондовая, № ТФГИ № 523)

³ Лихачев А.С., Подрез М.Д. Отчет о результатах поисковых работ на россыпи лопарита в южных предгорьях Ловозерских тундр на Кольском полуострове за 1963–1966 гг. Северо-Западное геологическое управление, Кольское районное геологоразведочное управление, Ловозерская геологоразведочная партия, пос. Ревда Мурманской обл. 1967. (фондовая, № ТФГИ № 1347).



Фиг. 2. Ревдинское россыпное поле и полигон моделирования. 1 – границы участков: 1 – западного, включающего Шомюкскую россыпь, 2 – восточного, включающего Сергеваньскую россыпь; 3 – области участков, визуализируемые на схемах прогнозного распределения лопарита на фиг. 4–6; 4 – пос. Ревда. Изогипсами показаны высотные отметки рельефа. Области в градациях серого цвета на рисунке и соответствующая шкала справа показывают содержание лопарита ($\text{кг}/\text{м}^3$) по данным геологоразведочных работ (Лихачев, 1984ф).

В настоящей работе для оценки россыпной металлоносности применяется мультипликативный коэффициент, используемый ранее при геохимических поисках (Григорян и др., 1983) и представляющий собой математический расчет результатов химического анализа проб, при котором в числителе коэффициента располагаются произведения результатов анализа элементов положительной индикации с искомым месторождением, а в знаменателе произведения элементов, близких по химическим свойствам к элементам числителя, но нейтральных или отрицательных индикаторов искомого месторождения (Бенсман, 1999).

Для этого в пределах Ревдинского россыпного поля был выбран полигон моделирования, в пределах которого были созданы цифровая модель рельефа, а также база данных, в которую для каждой элементарной ячейки внесены формализо-

ванные (количественно оцененные или разбитые на классы и, таким образом, приведенные к номинальной шкале) россыпеконтролирующие параметры, подробно обсуждаемые ниже. Данные рельефа были получены посредством Google Elevation API, прочие данные из указанных выше фондовых материалов.

Авторами была разработана компьютерная программа, считывающая составленную базу данных (в общем случае произвольный набор согласованных данных) с указанными границами эталонного (обучающего) и тестового (прогнозируемого) участков. На основании корреляционного анализа, проводимого на данных эталонного участка и последующего диалога с пользователем, программа формирует вид мультипликативного показателя – объединенного параметра, позволяющего оценить перспективы россыпной метал-

лоносности тестового участка. Далее программа выводит ряд оценочных характеристик полученной модели, основанной на расчете матрицы мультипликативных коэффициентов по данным тестового участка и прогнозную схему. Все представленные в работе статистические данные прогнозных моделей и изображения прогнозных схем являются выводом указанной программы, исходной код которой на языке программирования Python находится в свободном доступе по адресу <https://github.com/chefr/placemr>. Там же можно ознакомиться с инструкцией по установке и работе с программой. В настоящее время программа оснащена текстовым интерфейсом и ее использование возможно посредством интерпретатора Python, но в ближайшем будущем планируется разработать графический web-интерфейс с удаленным доступом клиентов, о чем будет сообщено на указанной выше странице проекта на github.

Мультипликативный показатель – безразмерный положительный коэффициент, большая величина которого указывает на предполагаемо повышенную металлоносность в точке, для которой он рассчитан. В целом этого достаточно для выделения площадей, наиболее перспективных для поисков проявлений россыпеобразующих минералов, но для более представительных результатов, а также в целях объективного сравнения статистических показателей прогнозных моделей с представленными в работе аналогичными моделями, полученными другими методами (линейной регрессии и дерева регрессии), значения мультипликативного коэффициента были линейно отражены на прогнозные содержания лопарита.

При приведении статистических данных (в основном коэффициента корреляции) в настоящей работе приводится p -значение (p -value), определяющее вероятность получить для данной вероятностной модели распределения значений случайной величины такое же или более экстремальное значение статистики, по сравнению с ранее наблюдаемым, при условии, что нулевая гипотеза верна. Необходимо отметить, что это значение часто подвергается критике, в особенности распространенная практика принятия альтернативной гипотезы для любого p -значения, номинально меньшего 0.05 без других подтверждающих доказательств (Wasserstein, Lazar, 2016). В настоящей работе наименьшее p -значение, при котором мы принимаем значимой соответствующую статистическую меру менее $1.0e-7$, что мы считаем оправданным для практических задач.

Для проверки однородности выборки данных все формализованные показатели были проверены на соответствие нормальному (Гаусса) распределению посредством теста Шапиро–Уилка (Кобзарь, 2006), в результате которого установле-

но близкое соответствие всех данных указанному распределению, с минимальным p -значением $3.57e-18$. Исходя из этого, можно заключить, что собранные данные однородны, не содержат экстремальных значений (выбросов) и могут использоваться для прогнозирования. В контексте решаемой задачи это также указывает на наличие в пределах полигона моделирования единого россыпеобразующего процесса.

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГНОЗНЫХ МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

При прогнозировании россыпей необходимо учитывать комплекс факторов, влияющих на металлоносность отложений: наличие коренных источников, динамические и литолого-фациальные 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 (Шило, 2002; Патык-Кара, 2008), некоторые из них имеют количественную оценку, но большинство исследовано на качественном уровне. Авторы поставили перед собой задачу по возможности автоматизировать процесс прогнозирования россыпей (на данном этапе – редкометалльных россыпей ближнего сноса) на основе формализованных (количественно оцененных) факторов россыпеобразования.

Для этого по Ревдинскому россыпному узлу на участке 12 на 14 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 сведены в единую базу данных в виде матриц значений для каждой элементарной ячейки.

Одним из наиболее значимых факторов контроля россыпной металлоносности является фациально-стратиграфический (ФС). По этому признаку каждая ячейка была отнесена к одному из шести классов: 1) выходы коренных пород массива с маломощным элювиальным чехлом; 2) комплекс склоновых отложений; 3) пролювиально-солифлюкционные отложения; 4) моренные gQ_{III}^{1-2} отложения местного горного оледенения, перекрытые покровной мореной мощностью 1–5 м; 5) флювиогляциальные fgQ_{III}^{1-2} отложения местного горного оледенения; 6) морена покровного оледенения $gQ_{III}^3-IV^1$ мощностью более 5 м. Россыпи приурочены в основном к верхнечетвертич-

ным гляциальным отложениям местного горного оледенения и сопровождающим их флювиогляциальным комплексам.

Мощность осадочного чехла (МЧ) закономерно увеличивается по мере удаления от приподнятой части массива, что непосредственно связано с тектоническим режимом блоков массива и фундамента. Для каждой ячейки был указан один из четырех типов 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 (Карташов, 1961). Для формализации эрозионно-аккумулятивного состояния (ЭАС) площадей авторами был разработан метод расчета баланса материала для каждой элементарной ячейки – сумма векторов приноса и выноса материала, пропорциональных разности высот с соседними ячейками. Для ячеек, примыкающих по диагонали, результирующий вектор принимался с коэффициентом 0.7 ($1/\sqrt{2}$).

Расчет ЭАС производился по формуле (Лаломов, Чефранов, 2020):

$$\begin{aligned} \text{ЭАС}_{i,j} = & h_{(i,j-1)} + h_{(i,j+1)} + h_{(i-1,j)} + \\ & + h_{(i+1,j)} + 0.7(h_{(i-1,j-1)} + h_{(i-1,j+1)} + \\ & + h_{(i+1,j-1)} + h_{(i+1,j+1)}) - 6.8h_{(i,j)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где: $h_{(i,j)}$ – высотная отметка рельефа в центре ячейки с координатами i, j в матрице данных.

Для ячеек с преобладанием аккумуляции значения ЭАС положительные, в то время как для ячеек 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 (ЭАС-абс).

Для учета геоморфологического фактора был применен показатель энергии рельефа (ЭР)

(Спиридонов, 1985), вычисляемый как разница между максимальной и минимальной высотами в окружающих ячейках, деленная на высоту в центре ячейки.

Схемы распределения по площади формализованных факторов россыпеобразования представлены на фиг. 3.

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

Поскольку ФС- и МЧ-факторы выражены в номинальной шкале (она же категориальная, т.е. качественная, а не количественная, где каждое уникальное значение определяет отдельную категорию, отличающуюся от других, но это отличие нельзя количественно измерить), возникает необходимость преобразовать их в количественную шкалу, т.к. для номинальных значений не имеют смысла никакие арифметические и иные операции, кроме проверки на равенство. Итоговая формализация этих факторов, учитывая поисково-ориентированный характер модели, 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 (Лихачев, 1984ф⁴)) подсчитывалось среднее содержание лопарита. Полученные таким образом для каждой зоны значения нормировались к диапазону от 0 до 1 и принимались в качестве коэффициента перспективности, который присваивался каждой ячейке, попадающей в эту зону.

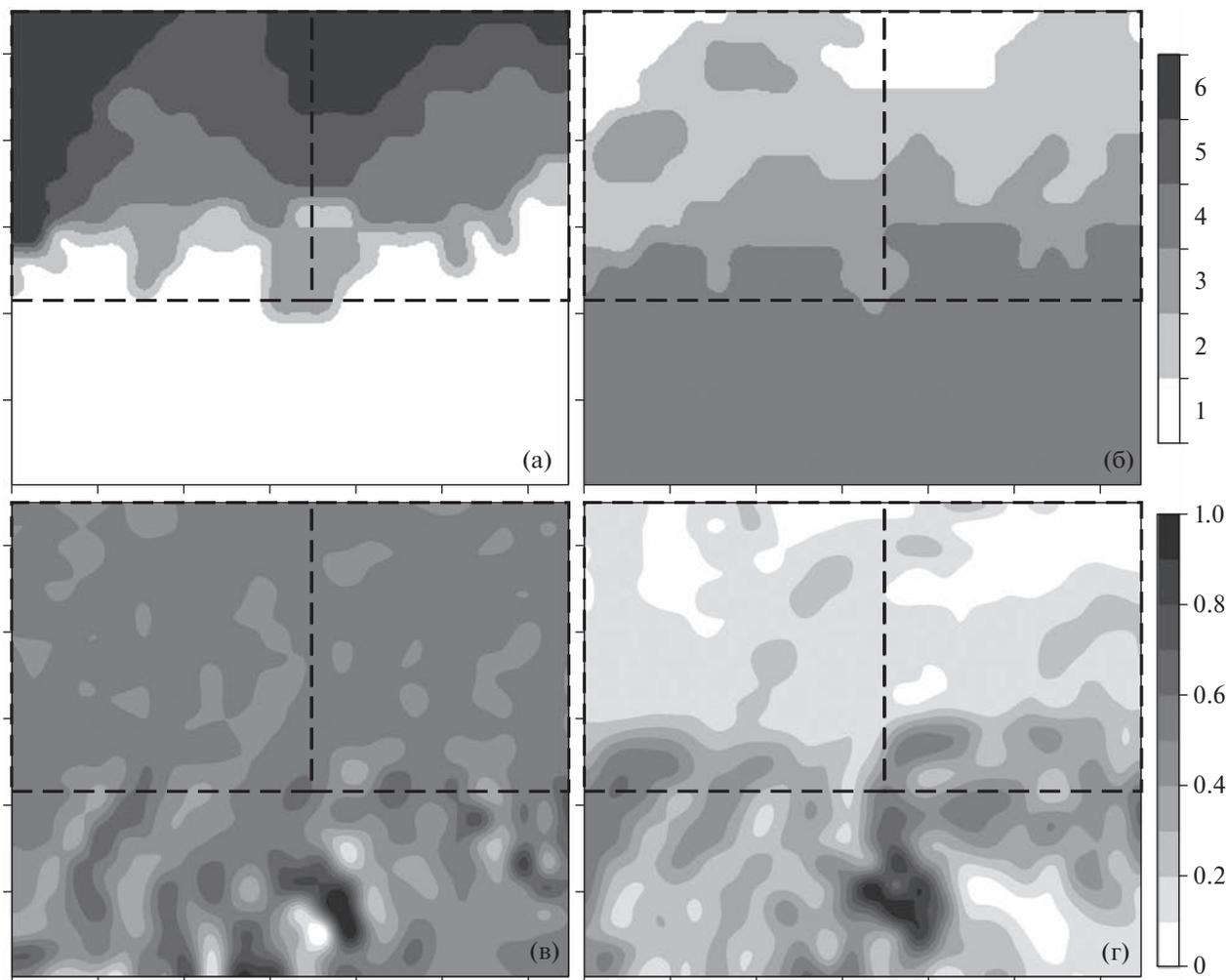
Далее, для приведения факторов к одному масштабу было проведено нормирование данных по формуле:

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

где x_i – исходная величина, x_i^n – нормированное значение, \ddot{x} – среднее значение выборки, S – стандартное отклонение.

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 (Чижова и др., 2019). Поскольку приводимые расчеты произво-

⁴ Лихачев А.С. Геологическая записка к ТЭО и расчету временных кондиций по Ревдинскому россыпному месторождению. ПГО Севзапгеология, Мурманская ГРЭ, Апатиты, 1984. (фондовая, № ТФГИ № 3226)



Фиг. 3. Формализованные факторы россыпеобразования: а–б – в номинальной шкале (перечисление классов в тексте): а – ФС, б – МЧ; в–г – в количественной шкале: в – ЭР, д – ЭАС. Пунктиром указаны границы участков, визуализируемых на схемах прогнозного распределения лопарита на фиг. 4–6.

дидились посредством представленной ранее компьютерной программы, позволяющей произвольно менять границы эталонного и тестового участков, полигон моделирования был разделен сначала на эталонный западный участок, включающий Шомиокскую россыпь (360 элементарных ячеек) и тестовый восточный, включающий Сергеваньскую россыпь (312 элементарных ячеек), после чего роли участков поменяли местами для дополнительной верификации методики (фиг. 2).

Следует отметить, что расчеты производились по всем ячейкам западного и восточного участков, для них же приводятся все статистические показатели прогнозных моделей, но на прогнозных схемах далее представлены только россыпемещающие области участков, из которых исключены 9 южных рядов ячеек, в которых нет повышенного содержания россыпных минералов как по исходным данным, так и по прогнозирующим расчетам.

Для создания обобщенных прогнозных характеристик на данных эталонного объекта строится матрица парных коэффициентов корреляции между выделенными факторами и содержанием в россыпи лопарита (табл. 1) и выводится мультипликативный показатель (МП), который характеризует зоны, где сочетание частных факторов создает наиболее перспективные условия для локализации редкометальных россыпей ближнего сноса. В рамках ГИС-системы Ревдинского россыпного поля количественно оцененные факторы и рассчитанный МП получили пространственную привязку.

Из табл. 1 видно, что все факторы имеют значимую корреляцию с россыпной металлоносностью, кроме ЭАС-фактора. Вероятная причина этого в высокой зависимости указанного параметра от размера элементарной ячейки. Для того чтобы уменьшить влияние этой зависимости, была проведена операция сглаживания данных ме-

Таблица 1. Коэффициенты корреляции Пирсона между формализованными факторами россыпеобразования и содержанием лопарита по данным геолого-разведочных работ

Фактор	Коэф. корр. (<i>p</i> -value) Западный участок эталон	Коэф. корр. (<i>p</i> -value) Восточный участок эталон
ФС	0.756 (2.95e-58)	0.703 (1.09e-40)
МЧ	0.581 (3.43e-29)	0.599 (4.38e-27)
ЭАС	0.005 (0.925)	0.008 (0.891)
ЭАС-абс	-0.253 (6.81e-06)	-0.260 (1.89e-05)
ЭР	-0.298 (1.01e-07)	-0.291 (1.52e-06)
ЭАС_сгл	0.378 (6.99e-12)	0.378 (2.15e-10)
ЭАС-abs_сгл	-0.371 (1.81e-11)	-0.396 (2.4e-11)
ЭР_сгл	-0.368 (2.77e-11)	-0.337 (2.04e-08)

тодом взвешенного скользящего среднего (Грешилов и др., 1997), для чего матрица данных была обработана скользящим окном с перерасчетом значения для каждой ячейки по формуле:

$$x = (2x_{i,j} + x_{(i,j-1)} + x_{(i,j+1)} + x_{(i-1,j)} + x_{(i+1,j)} + 0.7(x_{(i-1,j-1)} + x_{(i-1,j+1)} + x_{(i+1,j-1)} + x_{(i+1,j+1)}))/9. \quad (3)$$

Эта операция многократно повторялась до тех пор, пока не был достигнут максимум корреляционного соотношения сглаживаемого параметра с россыпной металлоносностью. Подобным образом были обработаны данные по ЭАС, ЭАС-абс и ЭР факторам с получением параметров ЭАР_сгл, ЭАР-абс_сгл и ЭР_сгл соответственно.

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. Как указывалось ранее, 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.

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 (Ворошилов, 2011).

Разработанная программа предоставляет пользователю возможность выбрать, исходя из рассчитываемой значимости коэффициентов корреляции, какие параметры учитывать при расчете мультипликативного показателя. В ходе данного исследования было построено множество прогнозных моделей, основанных на мультипликативных коэффициентах, включающих различные факторы. Статистические параметры наиболее успешных из них приведены в табл. 2. Из приведенных моделей наиболее перспективной нам представляется модель, основанная на мультипликативном коэффициенте, включающем все указанные выше параметры (ЭАС и ЭР – сглаженные) и рассчитанный для каждой элементарной ячейки *i* (МП_{*i*}) как произведение значений факторов для этой ячейки, имеющих положительную корреляцию с содержанием лопарита, деленное на значение фактора с отрицательной корреляцией:

$$МП_i = (\Phi C_i \times MЧ_i \times \text{ЭАС_сгл}_i) / \text{ЭР_сгл}_i. \quad (4)$$

Как видно из табл. 2, полученные модели для поочередно рассматриваемых как тестовые восточного и западного участков имеют высокие коэффициенты корреляции с содержанием лопарита (0.686 и 0.754 соответственно), значительно превышающие аналогичные значения коэффициентов для рядовых факторов (табл. 1) за исключением ФС-фактора, который несколько выше. Средняя абсолютная ошибка моделей – 0.105 и 0.077 для восточного и западного участков соответственно, что подтверждает возможность использования предлагаемой методики и расчетных мультипликативных показателей при прогнозировании редкометалльных россыпей ближнего сноса для постановки поисковых работ. На фиг. 4 представлены прогнозные схемы содержания лопарита, построенные по данным рассчитанных мультипликативных коэффициентов.

Несмотря на то что модели, учитывающие только самые значимые факторы (ФС и МЧ), имеют несколько лучшие значения как коэффи-

Таблица 2. Статистические характеристики прогнозных распределений

Метод	Параметры	Восточный тестовый			Западный тестовый		
		Pearson (<i>p</i> -value)	RMSE	MAPE	Pearson (<i>p</i> -value)	RMSE	MAPE
МП	ФС, МЧ	0.670 (8.55e-36)	1.110	0.098	0.764 (3.95e-60)	0.856	0.074
МП	ФС, МЧ, ЭР	0.569 (4.36e-24)	1.179	0.125	0.755 (5.09e-58)	0.922	0.091
МП	ФС, МЧ, ЭАС_abs, ЭР	0.373 (3.92e-10)	1.328	0.149	0.489 (6.52e-20)	1.159	0.114
МП	ФС, МЧ, ЭАС_sm, ЭР_sm	0.686 (4.94e-38)	1.068	0.105	0.754 (6.52e-58)	0.865	0.077
ЛР	ФС, МЧ, ЭАС, ЭР	0.688 (2.62e-38)	1.057	0.086	0.720 (1.68e-50)	0.913	0.067
ЛР	ФС, МЧ, ЭАС_sm, ЭР_sm	0.692 (5.91e-39)	1.086	0.082	0.721 (1.31e-50)	1.013	0.080
СЛР	ФС, МЧ, ЭАС, ЭР	0.657 (5.49e-34)	1.192	0.115	0.668 (4.13e-41)	0.985	0.084
СЛР	ФС, МЧ, ЭАС_sm, ЭР_sm	0.591 (3.19e-26)	1.279	0.126	0.727 (5.88e-52)	0.909	0.092

Примечание. Методы: МП – мультипликативный показатель, ЛР – линейная регрессия, СЛР – случайный лес деревьев регрессии. Оценка прогноза: Pearson – коэффициент корреляции Пирсона, RMSE – среднеквадратичная ошибка, MAPE – средняя абсолютная ошибка.

циента корреляции прогнозного содержания с фактическим содержанием лопарита, так и среднеквадратичной и средней абсолютной ошибок, приведенная выше модель, учитывающая все факторы, имеет преимущество ввиду ее стабильности и выраженности вследствие ее более комплексного характера и уменьшения влияния отдельных параметров.

СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

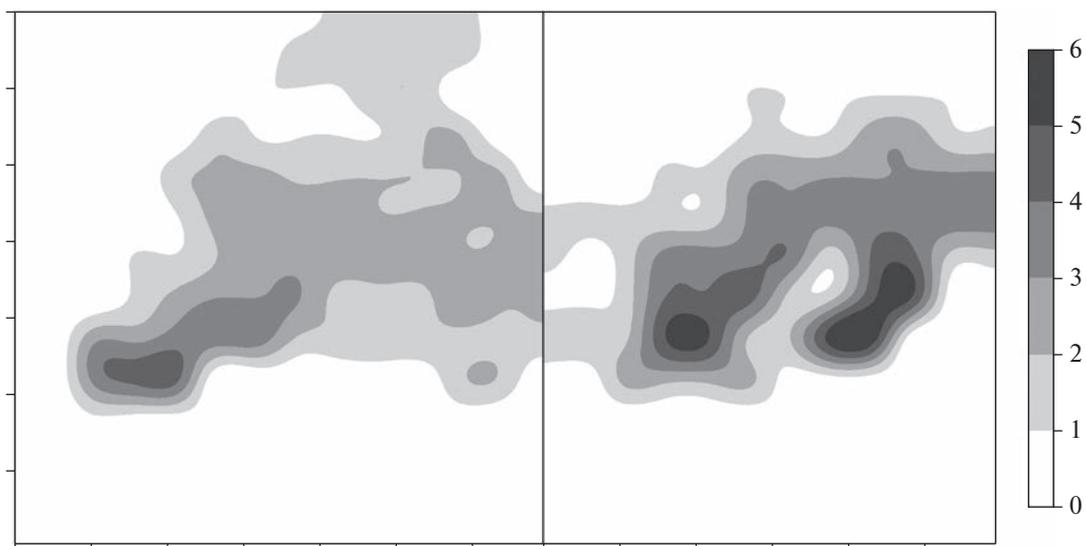
Для дополнительной оценки эффективности описанного выше прогнозирования россыпной металлоносности посредством расчета МП было проведено сравнение полученного при помощи

этой методики прогноза с результатами других методов регрессии – линейной регрессии (linear regression) и случайного леса (random forest) деревьев регрессии (regression tree).

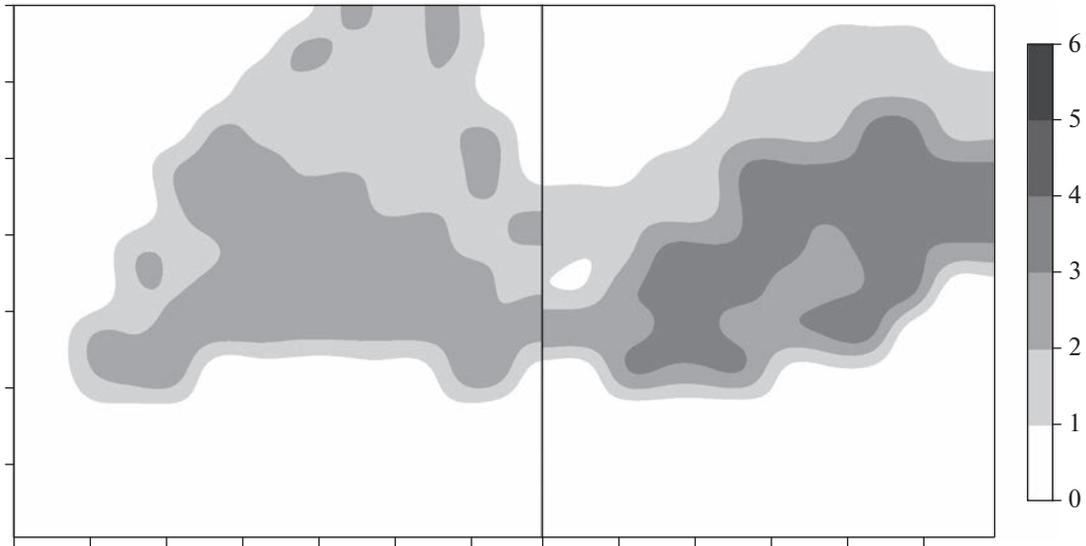
Линейная регрессия (ЛР) является регрессионной моделью зависимости одной (зависимой) переменной y от одной или нескольких других независимых переменных x линейной функцией зависимости, вида (Демиденко, 1981):

$$f(x, b) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k. \quad (5)$$

В целях прогноза россыпной металлоносности в настоящем исследовании в качестве зависимой переменной рассматривается содержание лопарита, в то время как независимыми переменными являются ранее описанные формализованные



Фиг. 4. Прогнозное распределение содержания лопарита ($\text{кг}/\text{м}^3$) для россыпемещающих частей западного (слева) и восточного (справа) участков по результатам расчета мультипликативных показателей, включающих ФС, МП, ЭР_сгл и ЭАС_сгл факторы.



Фиг. 5. Прогнозное распределение содержания лопарита ($\text{кг}/\text{м}^3$) для россыпемещающих частей западного (слева) и восточного (справа) участков, рассчитанное методом линейной регрессии.

россыпеконтролирующие параметры $\Phi\text{С}$, МЧ , ЭАС и ЭР .

Если рассматривать в качестве обучающего западный участок, то создается следующая линейная модель для содержания лопарита (y) в точке i :

$$y_i = -0.13 + 2.68\Phi\text{С}_i + 0.71\text{МЧ}_i - 0.36\text{ЭАС}_i + 0.66\text{ЭР}_i. \quad (6)$$

На основании данных восточного участка модель несколько меняется, хотя общим остается закономерно значительно больший вклад более влиятельных факторов (прежде всего $\Phi\text{С}$):

$$x_i = 0.003 + 2.16 \times 2.16\Phi\text{С}_i + 0.35\text{МЧ}_i - 0.1\text{ЭАС}_i + 0.07\text{ЭР}_i. \quad (7)$$

При этом, как видно из табл. 2, качество модели практически не зависит от смены сырых данных по ЭАС и ЭР их сглаженными версиями, в связи с незначительным влиянием этих данных в итоговое значение зависимой переменной.

На фиг. 5 представлены прогнозные схемы содержания лопарита для западного и восточного участков рассматриваемой территории, рассчитанные методом линейной регрессии, а в табл. 2 – статистические данные соответствующих моделей.

Деревья регрессии и классификации (Breiman et al., 1984), известные также под общим названием как деревья решений, представляют собой структуры данных, позволяющие интерпретировать шаблоны данных с целью их распознавания. Деревья решений организованы в виде иерархической структуры, состоящей из узлов принятия решений по оценке значений определенных перемен-

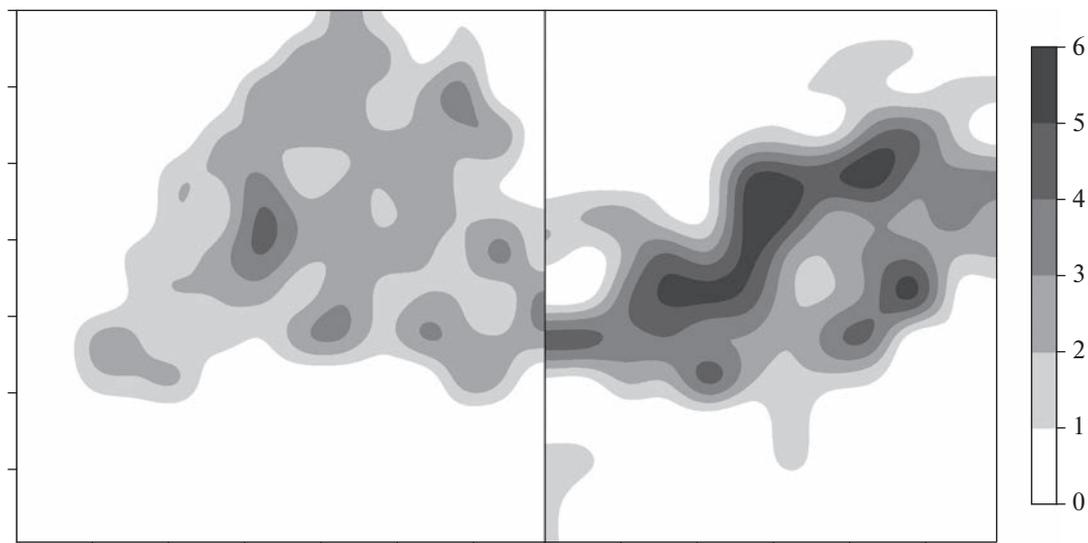
ных для прогнозирования результирующих непрерывных значений (в случае деревьев регрессии).

Случайный лес (Breiman, 2001) является алгоритмом машинного обучения и заключается в использовании большого количества описанных выше деревьев, результаты которых усредняются. Алгоритм применяется, в частности, для решения задачи регрессии. Основная идея заключается в использовании большого ансамбля решающих деревьев, каждое из которых само по себе может не давать хороший результат, но за счет их большого количества и комбинирования достигается высокое качество результата.

В настоящем исследовании метод случайного леса деревьев регрессии был применен для прогнозирования содержания лопарита по данным $\Phi\text{С}$, МЧ , ЭАС и ЭР параметров. Поскольку, грубо говоря, дерево решений выделяет кластеры схожих объектов по указанным характеристикам, можно заключить, что этот метод в данном случае позволяет определить группы ячеек, сформировавшихся в схожих условиях, в различной степени благоприятных для россыпеобразования и, таким образом, его применение логически обосновано для решения указанной задачи.

На фиг. 6 представлены прогнозные схемы содержания лопарита для западного и восточного участков рассматриваемой территории, рассчитанные методом случайного леса деревьев регрессии, а в табл. 2 – статистические данные соответствующих моделей.

Сравнивая результаты прогнозных моделей, полученных различными методами (МП , линейная регрессия и дерево регрессии), можно заключить, что в целом они дают близкие результаты,



Фиг. 6. Прогнозное распределение содержания лопарита для россыпевмещающих частей западного (слева) и восточного (справа) участков, рассчитанное методом случайного леса деревьев регрессии.

при этом МП предлагает более контрастный, выраженный результат. Также МП представляется наиболее простым и обобщенным методом, подходящим для любого набора согласованных данных, в то время как другие методы требуют более глубокого анализа входящих параметров. В частности, роль обучения в методе расчета МП сводится к выявлению вида корреляционной зависимости между формализованными факторами и металлоносностью (значимая или нет, положительная или отрицательная), а также переводу факторов, выраженных в номинальной шкале в количественно выраженную перспективность каждого класса. Для грубой оценки территорий представляется возможным провести такую оценку на минимальном наборе данных, в то время как другие методы требуют представительных обучающих выборок.

Таким образом, предлагаемый метод расчета мультипликативного коэффициента позволяет проводить прогнозную оценку оперативно, с меньшими затратами и в автоматизированном режиме:

1) может осуществляться дистанционно, без специализированных полевых и лабораторных исследований, поскольку использует стандартные данные геологических отчетов и картографического материала;

2) состоит из стандартных операций в рамках разработанного алгоритма и не требует высокой квалификации и большого практического опыта (Лаломов и др., 2020).

3) метод выдает результаты на уровне других методов регрессии, таких как линейная регрессия и дерево регрессии, но менее требователен к качеству обучающей выборки.

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

1) 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;

2) верификация методики произведена только на одном объекте, необходимо тестирование на других аналогичных площадях;

3) 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.

4) анализ ячеек производится без внимания к рассмотрению включающей их территории как единого геологического объекта. Дальнейшие работы предлагается ориентировать на устранение этого недостатка.

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 совер-

шенствовании, 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, но может быть использована в качестве гибридной системы, работающей в режиме диалога “оператор – компьютер”, облегчающей специалисту процесс принятия решений. Аналогичный подход уже используется, в частности, для экспресс-оценки новых рудопроявлений золота в Арктической зоне России (Чижова и др., 2019).

ВЫВОДЫ

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.

На “полигоне моделирования” с уже известными месторождениями и россыпепроявлениями в пределах “эталонной” выборки данных формализованные показатели выделяются и оцифровываются, а затем 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 рассматриваемых поочередно и независимо западном и восточном участках Ревдинской группы россыпей.

Создаваемая система позволяет собирать, хранить, обрабатывать и визуализировать данные на всех этапах процесса создания прогнозных оценок с учетом использования достоверной первичной информации о содержании полезного компонента. 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.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.2021.0018 (руководитель академик Н.С. Бортников).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бенсман В.Р.* Поисковая геохимия в республике Беларусь // Природные ресурсы. 1999. № 4. С. 124–137.
- Бочнева А.А., Лаломов А.В., Чефранов Р.М.* Геостатистический подход к выявлению потенциальных титан-циркониевых россыпных площадей на примере Зауральского россыпного района // Литология и полез. ископаемые. 2013. № 3. С. 234–255.
- Бочнева А.А., Патык-Кара Н.Г.* Структура минеральных ассоциаций как критерий распознавания алмазных промежуточных коллекторов // Геоинформатика. 2005. № 3. С. 31–38.
- Ворошилов В.Г.* Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 104 с.
- Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А.* Математические методы построения прогнозов. М.: Радио и связь, 1997. 112 с.
- Григорян С.П., Соловов А.П., Кузин М.Ф.* Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1983. 191 с.
- Демиденко Е.З.* Линейная и нелинейная регрессия. М.: Финансы и статистика, 1981. 302 с.
- 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.
- Карташов И.П.* Фации, динамические фазы и свиты аллювия // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1961. № 9. С. 77–90.
- Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
- Когарко Л.Н.* Проблемы генезиса гигантских редкометалльных месторождений Кольского полуострова // Российская Арктика: геологическая история, минерогения, экология. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. С. 773–787.
- Лаломов А.В.* Дифференциация тяжелых минералов во вдольбереговом потоке наносов и моделирование процессов прибрежно-морского россыпеобразования // Литология и полез. ископаемые. 2003. № 4. С. 361–369.
- Лаломов А.В., Таболич С.Э.* Прогнозирование динамики техногенных россыпей в береговой зоне моря на основе численного моделирования // Геология руд. месторождений. 2009. № 3. С. 239–249.
- Лаломов А.В., Таболич С.Э.* Механизмы формирования концентраций титан-циркониевых минералов прибрежно-морских россыпей сублиторальной зоны // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2011. Т. 153. Кн. 4. С. 232–242.
- Лаломов А.В., Таболич С.Э.* Модель образования прослоев тяжелых минералов в отложениях потока наносов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2013. Т. 153. Кн. 4. С. 157–171.
- 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>

- 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.
- Лаломов А.В., Таболич С.Э., Чефранов Р.М.* Геолого-динамическое моделирование образования прибрежно-морских оловоносных россыпей на примере Восточного сектора Арктики России // Геология руд. месторождений. 2016. № 2. С. 120–133.
- 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. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.67-76>
- Патык-Кара Н.Г.* Минерагения россыпей: типы россыпных провинций. М.: ИГЕМ РАН, 2008. 528 с.
- Патык-Кара Н.Г., Кленов В.И.* Численные имитационные модели формирования россыпей золота во врезающихся долинах // Матер. Совещ. по геологии россыпей и кор выветривания. Пермь: Пермский гос. университет, 2005. С. 124–127.
- Патык-Кара Н.Г., Лапшин А., Чижова И.А., Федоров О.П., Шиятый И.Н.* Использование метода главных компонент при изучении осадочных формаций для целей прогноза титано-циркониевых россыпей в Ханты-Мансийском АО // Отечественная геология, 2002. № 3. С. 15.
- Пеков И.В.* Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. М.: ТО “Земля”, 2001. 464 с.
- Поликарпочкин Н.Н.* Вторичные ореолы и потоки рассеяния. Новосибирск: Наука, 1976. 284 с.
- Поротов Г.С.* Прогнозирование и поиски месторождений полезных ископаемых. СПб: Национальный минерально-сырьевой университет “Горный”, 2012. 120 с.
- Россыпные месторождения России и других стран СНГ / Отв. ред. Н.П. Лаверов, Н.Г. Патык-Кара. М.: Научный мир, 1997. 479 с.
- Семенов И.Е.* Минералогия Ловозерского щелочного массива. М.: Наука, 1972. 305 с.
- Спиридонов А.И.* Геоморфологическое картирование. М.: Недра, 1985. 184 с.
- 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. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-4-107-117>
- Шило Н.А.* Учение о россыпях. Владивосток: Дальнаука, 2002. 576 с.
- Шумилов Ю.В.* К вопросу о количественной оценке процессов россыпеобразования // Проблемы геологии россыпей. Магадан: СВКНИИ, 1970. С. 125–132.
- Breiman L.* Random Forests // Machine Learning. 2001. V. 45. P. 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J.* Classification and regression trees. Monterey, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, 1984. P. 358. <https://doi.org/10.1002/cyto.990080516>
- GitHub: Where the world builds software. <https://github.com/chefr/placermp>
- Hou B., Keeling J., Reid A., Fairclough M., Warland I., Belousova E., Frakes L. and Hocking R.* Heavy mineral sands in the Eucla Basin, southern Australia: Deposition and province-scale prospectivity // Economic Geology. 2011. V. 106. № 4. P. 687–712.
- Khrushchov D., Lalomov A., Chizhova I., Lobasov I., Kovalchuk M., Vasylenko S., Kravchenko E., Svivalneva T.* Structural-lithological geological-dinamic 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. Universite de Geneve. 19th ISC 2014. 18–22 August, Geneva, Switzerland. P. 350.
- Khrushcov D., Lalomov A., Lobasov A., Chizhova I., Revezova 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. P. 215–229.
- 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: Institut Cartografio I Geologio de Catalunya, 2015. P. 20–21.
- Patyk-Kara N.G., Lalomov A.V.* Dynamic numerical modeling of sea-land interaction in technogeneous landscapes // Proceedings of the Tenth International Symposium on River Sedimentation. (10-th ISRS), Moscow, Moscow State University, 2007. V. 5. P. 94–97.
- Wasserstein R.L., Lazar N.A.* The ASA statement on *p*-Values: context, process, and purpose / The american statistician. 2016. V. 70. P. 129–133. <https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108>
- Лихачев А.С.* Геологическая записка к ТЭО и расчету временных кондиций по Ревдинскому россыпному месторождению. ПГО Севзапгеология, Мурманская ГРЭ, Апатиты, 1984. (фондовая, № ТФГИ № 3226).
- 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.). Северо-Западное геологическое управление, Кольская комплексная экспедиция, пос. Ревда Мурманской обл. 1963. (фондовая, № ТФГИ № 523)
- Лихачев А.С., Подрез М.Д.* Отчет о результатах поисковых работ на россыпи лопарита в южных предгорьях Ловозерских тундр на Кольском полуострове за 1963–1966 г.г. Северо-Западное геологическое управление, Кольское районное геологоразведочное управление, Ловозерская геологоразведочная партия, пос. Ревда Мурманской обл. 1967. (фондовая, № ТФГИ № 1347).
- Лихачев А.С., Ельников Е.И., Пантелеймонов В.М., Содемский 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).