

УДК 553.04

ПОИСКОВО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РОССЫПЕЙ ЗОЛОТА НА ПРИМЕРЕ ВАГРАНСКОГО РОССЫПНОГО РАЙОНА

© 2025 г. Р. М. Чефранов^{a,*}, А. В. Лаломов^{a,**}, А. А. Бочнева^{a,***}

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

*e-mail: roman_chefr@bk.ru

**e-mail: lalomov@mail.ru

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

Поступила в редакцию 24.07.2024 г.

После доработки 24.01.2025 г.

Принята к публикации 19.02.2025 г.

В результате полевых исследований и анализа данных фондовых отчетов в пределах Вагранского россыпного узла Северного Урала были выделены два типа шлихового золота, являющихся индикаторами коренной минерализации золото-сульфидно-кварцевого и гипогенно-гипергенного типов, которые были использованы в качестве эталонов для разработки цифровой системы прогнозирования параметров и локализации первичных источников россыпного золота. В настоящей работе формализованы (в виде количественной оценки) типоморфные характеристики шлихового золота (крупность, окатанность, сортировка и пробность, а также содержание элементов-примесей). Эти данные были обработаны с использованием методов мультипликативных показателей, линейной регрессии и дерева регрессии с использованием алгоритма случайного леса, что позволило с большей достоверностью и стабильностью, чем по рядовым параметрам в отдельности, прогнозировать состав и локализацию коренного оруденения. Чтобы получить необходимые данные для подобной оценки, достаточно отчетов по шлиховому опробованию, а дополнительные полевые и высокотратные лабораторные исследования не являются обязательными, что сокращает как время, так и стоимость работ. Анализ матрицы корреляционных связей позволил выделить характерные показатели для коренной минерализации золото-сульфидно-кварцевого и гипогенно-гипергенного типов, а также предложить рекомендации по проведению поисково-разведочных работ с целью выявления коренной золотоносности узла. Все три использованных метода дали близкие результаты, позволяющие прогнозировать параметры коренной золотоносности, при этом метод расчета мультипликативных коэффициентов выявил более контрастный, выраженный результат и представляется наиболее простым и обобщенным, подходящим для любого набора согласованных данных, в то время как другие методы требуют более глубокого анализа входящих параметров. Основными преимуществами предлагаемого метода прогнозных оценок являются повышение эффективности и частичная автоматизация процесса определения перспектив коренного оруденения территорий.

Ключевые слова: россыпи, стратегические металлы, золото, мультипликативные показатели, прогнозная модель

DOI: 10.31857/S0024497X25040044, **EDN:** JESFGN

Старейшим золотодобывающим регионом России является Урал. За всю историю освоения этой территории (а начало ей положил житель деревни Шарташ Ерофей Марков, который в 1745 г. нашел обломки кварца с самородным золотом в пределах нынешнего Березовского золоторудного поля [Сазонов и др., 2001]) основная масса

золота, оцениваемая в 500 т, была добыта из россыпных месторождений.

В настоящее время основным вектором поддержания золотодобычи на Урале являются поиски и разведка коренных объектов, при этом имеющиеся россыпи и шлиховые ореолы могут служить в качестве поискового критерия первичной

золотоносности. Исследования вещественных и пространственно-генетических связей в ряду “коренной источник — промежуточный коллектор — россыпь” являются необходимыми для оценки потенциала длительно развивающихся рудно-россыпных узлов на эндогенное оруденение, в том числе новых нетрадиционных типов [Баранников, 2009].

Несмотря на почти столетний период отработки россыпей золота на территории, расположенного в пределах Северного Урала, Вагранского узла (где за это время было добыто порядка 10 т золота), вопросы, касающиеся коренных источников золота, остаются нерешенными. Предполагается, что на стадии мезозойской пенепленизации Уральского складчатого пояса россыпное золото было высвобождено из зон коренной минерализации золото-сульфидно-кварцевого типа, а затем переотложено в образования четвертичного аллювиального комплекса через системы кор выветривания и эрозионно-структурные депрессии [Баранников, 2009; Сазонов и др., 2001].

Проведение специализированных полевых работ и лабораторных исследований является необходимым для выявления первичных источников россыпного золота. Предлагаемый авторами алгоритм формализации стандартных типоморфных характеристик россыпного золота с последующим объединением их в мультипликативные показатели позволяет частично автоматизировать, а также упростить и оптимизировать процесс прогнозирования коренной минерализации.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПЕРВИЧНАЯ МЕТАЛЛОНОСНОСТЬ УЗЛА

В качестве эталонного объекта авторами был выбран Вагранский золотоносный россыпной узел, который занимает область Ашкинской и Сурьинско-Промысловской минерагенических зон Северного Урала. Граница между этими зонами проходит по региональному меридионально ориентированному разлому. В обеих рудных зонах развиты породы черносланцевой формации: в Ашкинской — верхнерифейского, а в Сурьинско-Промысловской — преимущественно ордовикского возрастов. В тектоническом плане область относится к Вишерско-Кутимскому антиклинорию [Петров и др., 2015].

Углеродистые осадочные породы верхнерифейского возраста, которые претерпели метаморфизм в условиях зеленосланцевой фации, объединены в три свиты: клыктанскую (мраморизованные известняки, доломиты и, реже,

карбонатно-глинистые сланцы), ослянскую (кварцито-песчаники, хлорит-серицит-кварцевые сланцы, иногда кварцитовые конгломераты) и висимскую (подразделена на две подсвиты — нижнюю, представленную глинистыми, хлорит-кварцевыми сланцами и кварцевыми песчаниками, и верхнюю, сложенную кварц-хлорит-серицитовыми сланцами и филлитами) [Сазонов, Великанов, 2010].

Ордовикский комплекс представлен серыми и черными углисто-кварцевыми и углисто-филлитовыми сланцами с подчиненными прослоями карбонатосодержащих разностей. В верхней части появляются эффузивы основного состава с согласно залегающими прослоями кварцевых порфириров. Комплекс интродуцирован серией даек долеритов и габбро-долеритов. Встречаются единичные дайки метаморфизованных гранитоидов, более распространены тела метадолеритов (рис. 1). По геофизическим данным в пределах узла располагается крупный погребенный гранитоидный массив [Петров и др., 2015].

Золоторудная минерализация Урала представлена широким спектром месторождений различных минерально-генетических типов. Здесь выделяются месторождения золото-кварцевой, золото-сульфидно-кварцевой, полиметаллической, колчеданной, скарновой, низкотемпературной гидротермальной и экзогенной формаций [Бортников и др., 2016; Викентьев и др., 2017; Плотинская и др., 2009; Поленов и др., 2015; Сазонов и др., 2001; Филиппов и др., 2013]. Большинство месторождений относятся к полигенно-полихронным: они имеют сложное строение и длительную многоэтапную историю формирования.

В результате исследований в 1967 г. в пределах Вагранского узла выявлены одиночные кварцевые жилы с содержанием сульфидов до 0.5–2%, представленных пиритом, реже халькопиритом и теннантитом, которые показывают слабую, но повсеместную золотоносность с содержанием золота до 0.2 г/т, редко до 2–5 г/т. Кроме этого, слабая золотоносность (до 0.5–1 г/т) сопровождается линейные зоны рассланцевания и пиритизации, участки смятия, дробления в метаморфических сланцах и лиственитоподобных зонах гидротермально измененных пород (Новицкий и др., 1967¹).

В верховьях р. Сурья обнаружено проявление золото-сульфидно-кварцевого типа, представленное

¹ Новицкий В.Я., Ушаков С.А., Суханов Л.П. и др. Отчет о геологоразведочных работах на Вагранском месторождении россыпного золота с подсчетом запасов по состоянию на 01.07.1967 года. Североуральская комплексная экспедиция, Сосьвинская ГРП. г. Североуральск, пос. Покровск-Уральский, 1967 (фондовая, № ТГФ 30652).

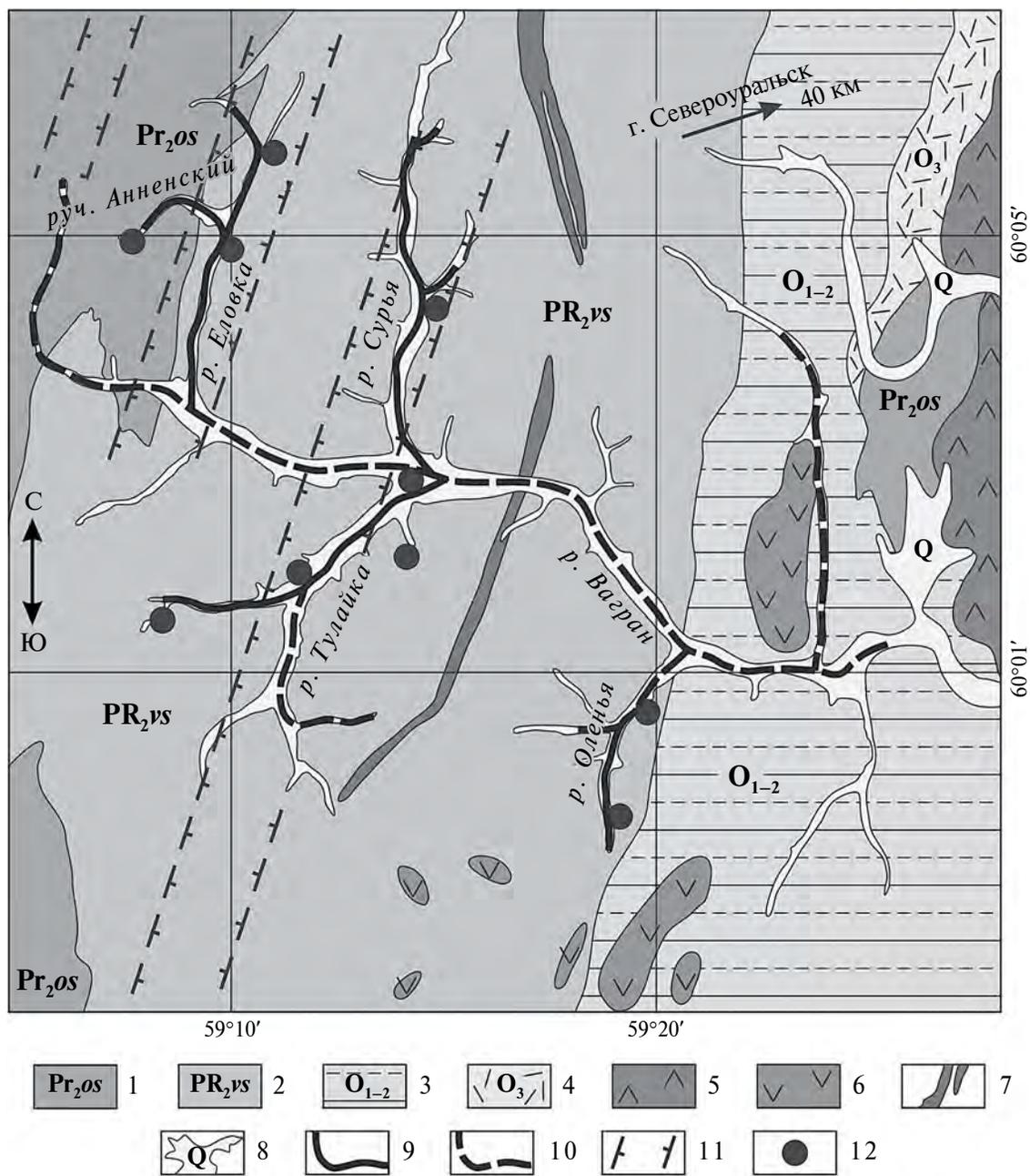


Рис. 1. Геологическая карта Вагранского россыпного узла по материалам отчета [Новицкий и др., 1967]. 1, 2 – метаморфизованные терригенные осадочные породы верхнего протерозоя (рифей): 1 – кварциты и песчаники осянкой свиты, 2 – карбонатно-черносланцевая толща с эффузивами основного состава висимской свиты; 3 – нижний–средний ордовик (черные углисто-кварцитовые и углисто-филлитовые сланцы с подчиненными прослоями карбонатосодержащих разностей); 4 – верхний ордовик (эффузивы основного состава с согласно залегающими прослоями кварцевых порфириров); 5 – габбро-роговообманковые, биотит-роговообманковые амфиболиты; 6 – измененные габбро; 7 – альбитовые гнейсы, гнейсограниты и расланцованные порфиры; 8 – четвертичные аллювиальные отложения; 9, 10 – россыпи золота: 9 – промышленные, 10 – непромышленные; 11 – эрозионно-структурные депрессии; 12 – точки опробования.

зоной прожилково-вкрапленной минерализации пирита, халькопирита, сфалерита, блеклых руд и других сульфидов, сульфоарсенидов, теллуридов с содержанием золота до 8 г/т и платины до 3.7 г/т [Петров и др., 2015].

Предполагается, что кварцево-жильные тела с минерализацией золото-сульфидно-кварцевого типа, послужившие источниками россыпей юрского, раннемиоценового и четвертичного возрастов, на аналогичных рудопроявлениях на

уровне современного эрозионного среза большей частью были эродированы [Баранников, Азовскова, 2017], а Сурьинское проявление представляет собой корневые части этой золоторудной минерализации.

Помимо золото-полисульфидно-кварцевой орогенной минерализации на сопредельной территории установлены новые нетрадиционные для Урала геолого-промышленные типы: золото-черносланцевый сухоложский, золото-аргиллизитовый и рудоносных химических кор выветривания [Лежепеков, 2006; Петров, 2014].

Перспективы выявления новых золоторудных месторождений на Урале связываются с выделяемой в последнее время минерализацией гипогенно-гипергенного типа, которая приурочена к шовным зонам, разрывным нарушениям и зонам разуплотнения пород. Термин “гипогенно-гипергенный” отражает тип золоторудных месторождений, при формировании которых эндогенные и экзогенные рудообразующие процессы были сближенными или сопряженными как во времени, так и в пространстве [Баранников, Азовскова, 2017]. Гипогенная составляющая обусловлена развитием низкотемпературных гидротермальных метасоматитов, в то время как гипергенная – наличием кор химического выветривания. Активизация малоглубинных низкотемпературных процессов золотого рудогенеза протекала в несколько стадий: раннемезозойскую ($T-J_1$), позднемезозойскую (J_2-K) и кайнозойскую (Pg_3-Q), которые в целом совпадали с фазами постколлизийной тектоно-магматической активизации региона [Шуб и др., 1993]. Отличительной особенностью минерализации этого типа является преобладание пластообразных и линзовидных условий залегания и отсутствие отчетливых литологических границ рудных тел, доминирование мелкого и тонкого золота, а также широкий диапазон пробности и отсутствие гипергенных изменений [Грязнов и др., 2007; Баранников, Азовскова, 2017].

Россыпная металлоносность локализована в верховьях р. Вагран и ее притоках в пределах четвертичных водотоков I–III порядков. Продуктивный пласт преимущественно аллювиального генезиса залегает на трещиноватых коренных породах, представленных метаморфизованными сланцами, алевролитами и песчаниками, а также на выветрелых элювиальных отложениях. В ряде случаев пласт лежит на ложном плотике в основании второго (среднечетвертичного) цикла развития аллювиальной системы. Характерно неравномерное распределение золота как по мощности и ширине, так и по простиранию россыпей.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ДАННЫЕ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходного материала были использованы данные шлихового опробования различных рыхлых отложений (аллювиальных, ложковых, склоновых и элювиальных), находящихся в пределах современных и отработанных карьеров, а также руслового материала природных водотоков. Шлиховое опробование проводилось на территории россыпного узла общей площадью около 400 км². Во время полевого этапа исследований двадцатикилограммовые пробы были промыты лотком до черного шлиха, из которого золото извлекалось разделением в тяжелой жидкости в лаборатории ИГЕМ РАН. Всего в пределах Вагранского узла было опробовано 20 точек (которые затем были объединены в 10) и получено 372 золотины. Часть данных была взята из фондовых материалов (Новицкий и др., 1967').

Полученное шлиховое золото было изучено под биноклем и классифицировано по морфологии. Выборочно 94 зерна были сфотографированы на сканирующем электронном микроскопе GSM 5610LV. 112 зерен были исследованы в полированных шашках с использованием микрондового анализатора JEOL JXA-8200 (Япония) в Центре коллективного пользования “ИГЕМ-Аналитика” (аналитик Е.В. Ковальчук, ИГЕМ РАН). Семь зерен с включениями и контрастными облагороженными каймами были исследованы детально на сканирующем электронном микроскопе с дисперсионным спектрометром INCA-Energy 450 (аналитик Л.О. Магазина, ИГЕМ РАН).

Данные по геологическому строению узла, гранулометрическому составу и пробности золота были взяты из отчета (Новицкий и др., 1967').

В предыдущих работах [Лаломов и др., 2020а; Лаломов и др., 2020б; Lalomov et al., 2017] авторами были выделены пять типов золота, которые отличаются морфологией, химическим составом и структурой золотин (рис. 2). Тип I представлен хорошо- и среднеокатанными золотинами, высокопробными и без обогащенных кайм, тогда как тип II характеризуется средне- и плохоокатанными высокопробными золотинами без обогащенных кайм. Морфологически тип III идентичен зернам типов I и II, но имеет высокопробную кайму гипергенного происхождения. Золото типа IV идиоморфное и интерстициальное, высокопробное без обогащенной каймы, характеризующее, в первую очередь, мезотермальный уровень зоны минерализации. Золотины V типа – плохоокатанные, средне- и низкопробные, с повышенным содержанием серебра и ртути.

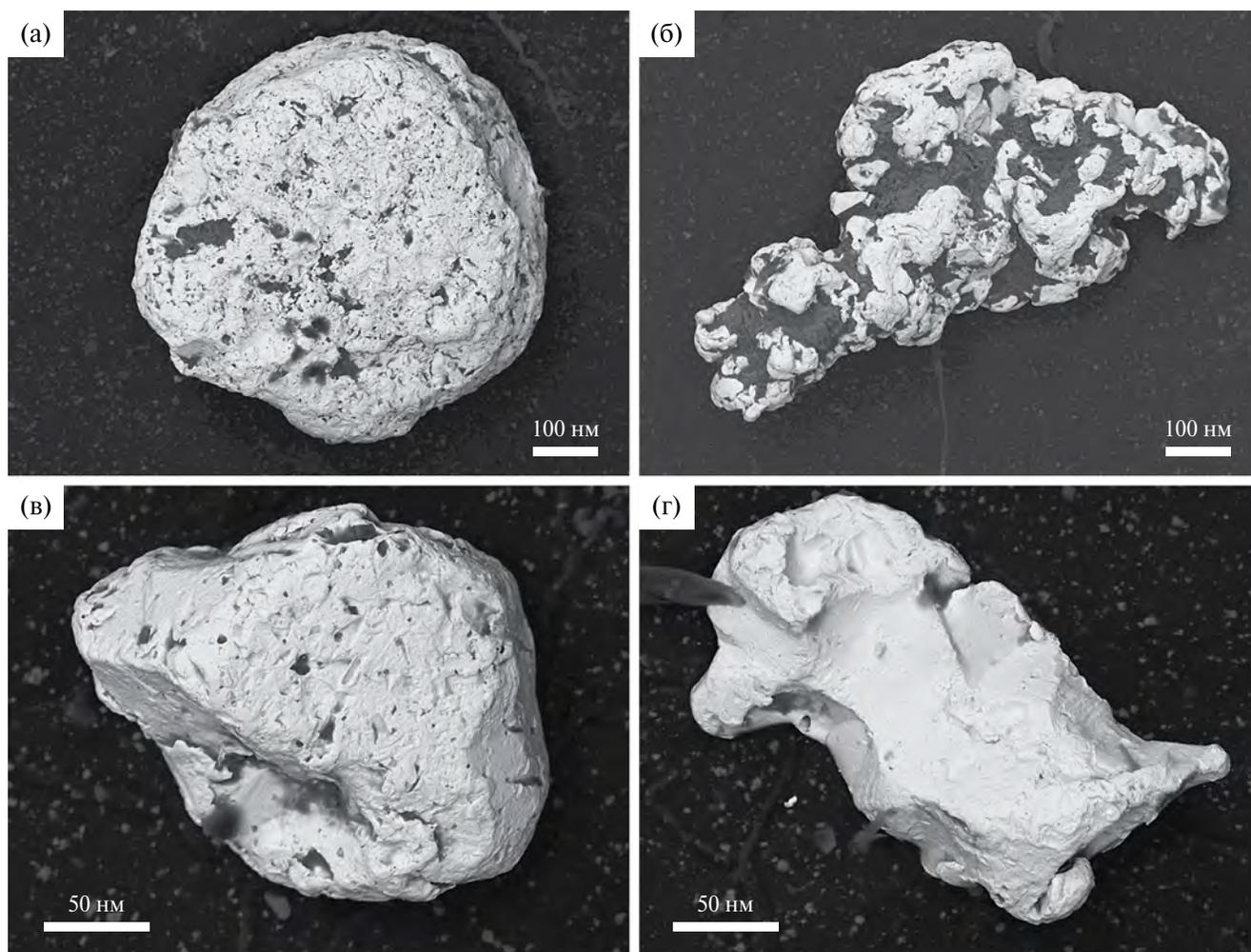


Рис. 2. Морфологические типы шлихового золота Вагранского узла.

а – хорошо- и среднеокатанное высокопробное (тип I); б – средне- и плохоокатанное высокопробное (тип II); в – идиоморфное и интерстициальное, высокопробное (тип IV); г – неокатанное и плохоокатанное, средне- и низкопробное, с повышенным содержанием серебра и ртути (тип V).

Распределение выделенных типов золота в пределах узла неравномерное: типы I и II встречаются по всей территории, при этом на периферии преобладает более окатанное золото типа I. Золото типов III и IV тяготеет к зонам эрозионно-структурных депрессий. Сходство состава золота первых четырех типов указывает на общность их первичного источника, относимого к золото-сульфидно-кварцевой формации, при этом различия могут быть объяснены зональностью первичной минерализации и историей преобразования самородного золота в условиях гипергенеза (рис. 3). Наименее удаленным от источника (наименее окатанным) является золото типа II.

Характеристики золота типа V свидетельствуют о втором коренном источнике шлихового золота, вскрытом на более поздних этапах формирования россыпей узла, при этом слабая

окатанность указывает на его минимальное смещение. Распределение золота этого типа по площади слабо контролируется гидросетью: повышенные содержания приурочены к линейной зоне, диагонально ориентированной по отношению к складчатым структурам Урала. Предположительно, источником этого золота является минерализация гипогенно-гипергенного типа [Лаломов и др., 2020а].

Таким образом, в качестве эталонов для разработки комплексных поисковых показателей были использованы шлиховые ореолы золота типов II и V, поскольку они имеют наиболее тесную связь с первичной минерализацией и могут служить индикаторами коренного оруденения.

При поисках коренных месторождений золота применяется комплекс методов, среди которых весьма важным является шлиховое опробование.

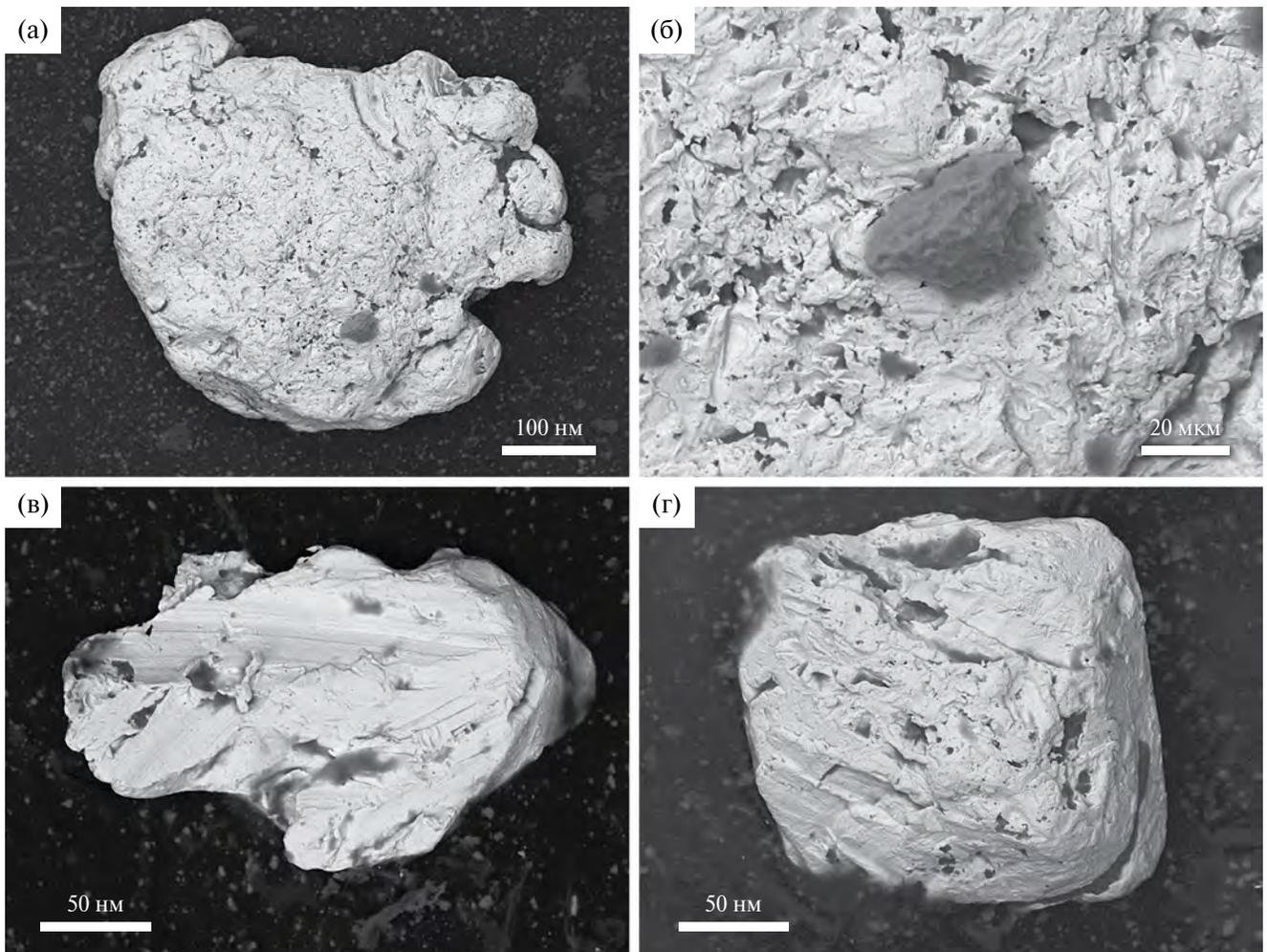


Рис. 3. Окатанные зерна золота Вагранского узла со следами механической деформации.

а, б — окатанное зерно золота со следами механического разрушения, с шероховатой поверхностью; в, г — окатанные зерна золота со следами жесткой механической деформации (царапины, следы волочения).

При этом информативным является не только общее содержание золота в рыхлых отложениях, но и его морфология, в первую очередь — окатанность, свидетельствующая о степени его удаленности от коренного источника. На современном этапе дополнительно выделяются разные типы шлихового золота, исследуются его состав, структура и характер включений, что позволяет устанавливать типы коренных источников и историю преобразования золота в зоне гипергенеза.

В ряде случаев вполне достаточно таких данных для выявления коренного источника россыпей, но чаще признаки по отдельности не дают четкой картины, в связи с чем необходимо использовать методы получения комплексных показателей, которые являются более контрастными по сравнению с отдельными факторами. Разносторонняя изученность шлихового золота

Вагранского узла позволила на его примере сформулировать и апробировать методы создания и применения таких комплексных показателей.

В настоящей работе для оценки россыпной металлоносности применяется мультипликативный коэффициент — используемый при геохимических поисках 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; Григорян и др., 1983].

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 метод расчета мультипликативных показателей дает более стабильный результат, уменьшающий влияние случайных отклонений и ошибок [Ворошилов, 2011].

Для применения указанного метода в пределах Вагранского россыпного узла была создана цифровая модель рельефа, а также сформирована база данных, в которую для каждой точки были внесены формализованные (количественно оцененные или разбитые на классы и, таким образом, приведенные к номинальной шкале) индикаторные характеристики, подробно обсуждаемые ниже. Номинальная шкала, 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.

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 металлоносности. Далее программа выводит ряд оценочных характеристик полученной модели, основанной на расчете матрицы мультипликативных коэффициентов по данным тестового участка и прогнозную схему. Исходный код программы, написанной на языке программирования python, размещен в открытом 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. Ранее программа использовалась авторами для численного прогнозирования редкометалльных россыпей ближнего

сноса Ловозерского россыпного района [Чефранов и др., 2023] и редкометалльно-титановых россыпей Зауралья [Чефранов, Лаломов, 2024], после чего была дополнена модулем, позволяющим строить прогнозные модели на произвольном наборе данных, не обязательно согласованных матриц данных по ровной сети точек, в том случае, если для каждой точки указаны координаты. Интерполяция данных производится методом кригинга.

В настоящем исследовании, учитывая крайне малое количество точек (10) и, соответственно, невозможность выделить два независимых подмножества для обучающей и тестовой выборки, эталонная выборка была случайным образом сформирована из общего множества данных с условием равномерного распределения по классам фактора, выраженного в номинальной шкале (окатанность), после чего прогноз проводился для всех точек. Учитывая то, что роль обучения в рассматриваемом методе сводится к выявлению вида корреляционной зависимости между формализованными индикаторными характеристиками и металлоносностью (значимая или нет, положительная или отрицательная), а также переводу факторов, выраженных в номинальной шкале в количественно выраженную перспективность каждого класса, этот подход представляется корректным.

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 золота.

При указании статистических данных (в основном коэффициента корреляции Пирсона) 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 (т.е. принимаемое по умолчанию предположение о том, что связи между двумя характеристиками нет) верна. Обычная практика

заключается в принятии альтернативной гипотезы для любого p -значения, номинально меньшего 0.05, но, учитывая крайне малое количество точек наблюдения в настоящем исследовании, при расчете коэффициентов корреляции Пирсона мы принимаем величину статистически значимой при p -значении ниже 0.11, что примерно соответствует эмпирическому критическому значению 0.55 для объема выборки $N = 10$ и доверительной вероятности $\alpha = 0.90$.

Для проверки однородности выборки данных все формализованные показатели были проверены на соответствие нормальному (Гаусса) распределению посредством теста Шапиро-Уилка [Кобзарь, 2006], в результате которого установлено близкое соответствие всех данных указанному распределению, с минимальным p -значением 0.154 (не позволяющим отвергнуть нулевую гипотезу о противном). Исключение составляет содержание серебра, для которого статистика теста составила более 0.8, а p -значение – 0.016, что меньше ожидаемого 0.05. Однако мы посчитали, что это не существенно для любых практических задач и позволили себе 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 ПРОГНОЗНЫХ МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Для решения поставленной задачи были использованы следующие типоморфные индикаторные характеристики шлихового золота (рис. 4).

Формализация сортированности осуществлена посредством коэффициента вариации крупности по размерным классам, что вызвано рядом причин. Энтропия распределения по С.И. Романовскому требует более дробного анализа гранулометрического состава [Романовский, 1988]. Классический коэффициент сортированности с использованием квантилей по Траску [Trask, 1932] не является универсальным, он пригоден только для наиболее грубой и приблизительной оценки гранулометрии осадков [Логвиненко, Сергеева, 1986]. Величина стандартного отклонения зависит от крупности анализируемых частиц, поэтому коэффициент вариации (безразмерная величина стандартного отклонения

крупности, деленная на средневзвешенную крупность) является в данном случае наиболее представительным показателем сортированности золота по крупности.

Значения окатанности формализованы по пятибалльной шкале от 0 (неокатанные) до 4 (очень хорошо окатанные зерна) для разных типов и по пробе в целом. Поскольку значения окатанности выражены в номинальной шкале (каждой ячейке приписан отдельный класс, представленный в виде уникального идентификатора), 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 этого признака, учитывая поисково-ориентированный характер модели, осуществлялась посредством расчета среднего содержания россыпеобразующих минералов в каждом классе по данным эталонного объекта. Для приведения факторов к одному масштабу было проведено линейное нормирование данных к интервалу от 0 до 1.

Для создания обобщенных прогнозных характеристик была построена матрица парных коэффициентов корреляции между индикаторными характеристиками и содержанием золота типов II и V, которые являются эталонными показателями первичной минерализации (табл. 1). На основе этих данных были сформированы формулы расчета мультипликативных коэффициентов, которые характеризуют зоны, наиболее перспективные для поисков коренных источников золота.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции Пирсона (p -value) между типоморфными индикаторными характеристиками и содержанием индикаторных типов золота

Характеристика	Содержание золота II типа, % (C_{II})	Содержание золота V типа, % (C_V)
Крупность (K)	0.444 (0.199)	-0.535 (0.110)
Сортированность (S)	-0.126 (0.728)	-0.519 (0.124)
Окатанность (O)	-0.291 (0.415)	-0.469 (0.171)
Содержание серебра, % (Ag)	-0.615 (0.059)	0.803 (3.5e -04)
Содержание ртути, % (Hg)	-0.359 (0.308)	0.809 (2.6e -04)
Содержание меди, % (Cu)	0.460 (0.180)	-0.503 (0.138)

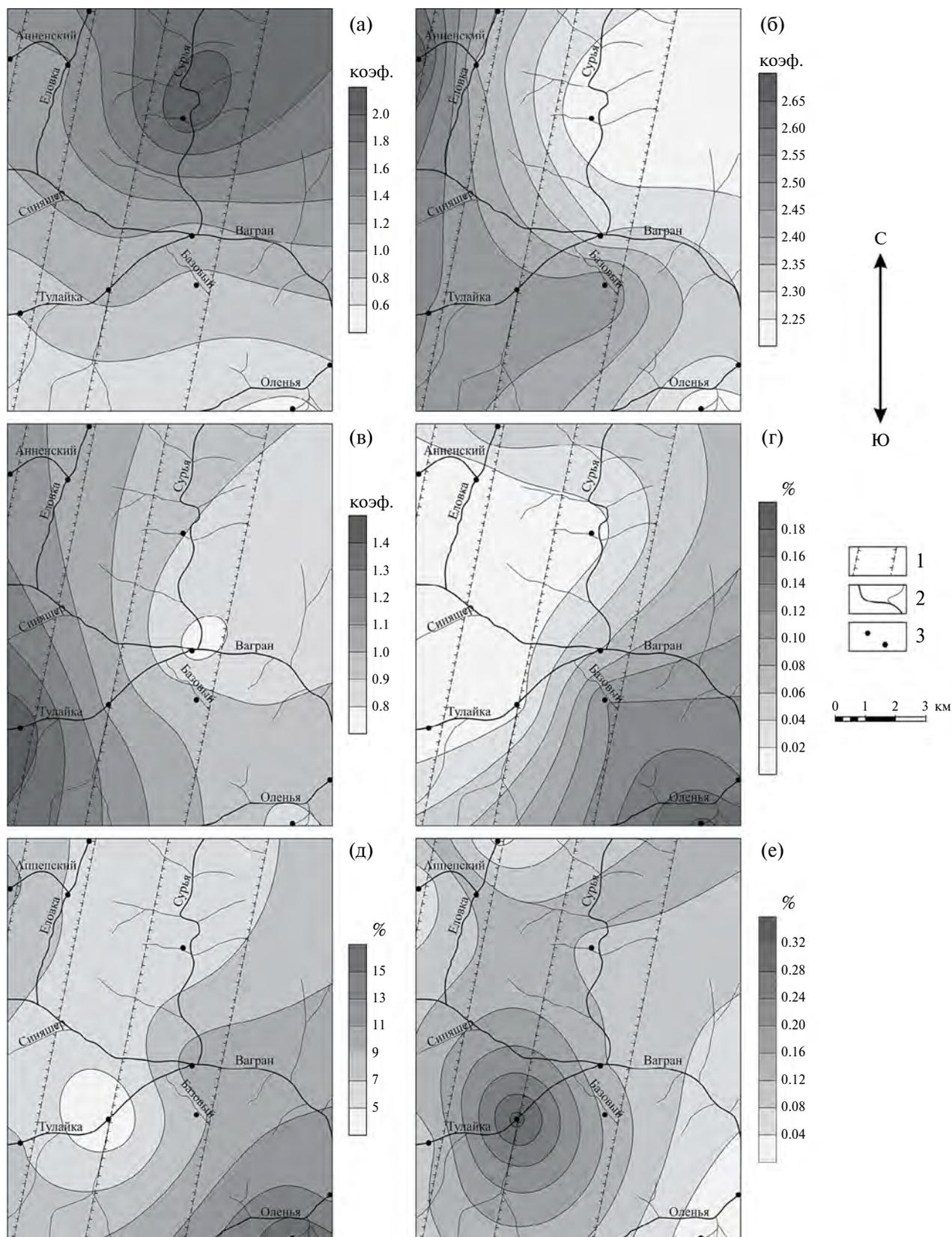


Рис. 4. Распределение формализованных индикаторных характеристик по площади узла. а – средневзвешенная крупность; б – сортированность; в – окатанность; г – содержание Ag, %; д – содержание Hg, %; е – содержание Cu, %. 1 – эрозионно-структурные депрессии; 2 – водотоки; 3 – точки опробования.

Как видно из табл. 1, с золотом второго типа (C_{II}) в положительной корреляции находятся крупность частиц и содержание меди, в отрицательной или нейтральной (ниже порога значимости) – сортированность, окатанность частиц и содержания серебра и ртути. Поэтому мультипликативный показатель, характеризующий (через распространенность золота типа II) коренные источники золото-сульфидно-кварцевой формации, вскрытые на этапе пенепленизации и прошедшие через промежуточные коллектора ($МП_{II}$), рассчитывается по формуле:

$$МП_{II} = (K \times Cu) / (S \times O \times Ag \times Hg). \quad (1)$$

С золотом пятого типа (C_V) в положительной корреляции находятся содержания серебра и ртути, в отрицательной – крупность, сортированность, окатанность частиц и содержание меди. Таким образом, мультипликативный показатель, характеризующий (через распространенность золота типа V) коренные источники гипогенно-гипергенного типа, вскрытые на четвертичном этапе ($МП_V$), рассчитывается по формуле:

$$МП_V = (Ag \times Hg) / (K \times S \times O \times Cu). \quad (2)$$

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что $МП_V$ имеет реальную устойчивую корреляцию с содержанием золота V типа ($R = 0.855$), более существенную, чем корреляционные связи отдельных характеристик, что позволяет использовать его в качестве критерия выделения площадей для поисков проявлений гипогенно-гипергенной минерализации.

Мультипликативный показатель $МП_{II}$ имеет менее очевидную связь с зоной первичного источника, индикаторным признаком которой является золото типа II. Хотя $МП_{II}$ имеет эквивалентную или более высокую корреляцию (0.456) с главным индикаторным признаком золото-кварцевого оруденения, чем частные связи (за исключением содержания серебра), ее значение все же

меньше критического. Вероятно, это связано с тем, что золото поступало в россыпи не непосредственно из зон первичной минерализации, а через систему промежуточных коллекторов, что внесло искажение в картину пространственно-генетических связей между первичным источником и россыпным золотом четвертичных водотоков.

С другой стороны, хотя содержание серебра (что эквивалентно пробности из-за низких содержаний других примесей) имеет более высокую корреляцию (-0.615) с содержанием золота II типа по сравнению с $МП_{II}$, его применение отдельно от других индикаторных характеристик может иметь повышенную погрешность и характеризовать зональность изменения пробности единого источника, а не наличие разных формационных источников. Исходя из этого, можно заключить, что применение мультипликативного коэффициента дает более стабильный и обоснованный результат.

Устойчивая отрицательная корреляция между содержаниями золота II и V типов ($R = -0.59$) подтверждает предположение, что эти типы россыпного золота поступали из разных источников.

Конечные результаты обработки данных представлены на рис. 5. Максимальное значение $МП_{II}$ приходится на междуречье рек Сурья на востоке, Еловка на западе, Тулайка на юге и уменьшается к периферии участка. Это приблизительно совпадает с распределением золота типа II и подтверждает предположение, что в этой зоне был локализован основной первичный источник россыпного золота узла.

Максимальные значения $МП_V$ сосредоточены в линейной зоне, протягивающейся от среднего течения р. Оленья, через участок впадения в р. Вагран рек Сурья, Тулайка и руч. Базовый, к верхней части долины р. Еловка (выше руч. Анненский).

Имеющиеся в наличии разрозненные материалы по коренному оруденению узла недостаточны для разработки мультипликативных показателей, поэтому в предлагаемом исследовании в качестве

Таблица 2. Статистические характеристики прогнозных распределений

Метод	Золото II типа			Золото V типа		
	Pearson (p-value)	RMSE	MAPE	Pearson (p-value)	RMSE	MAPE
МП	0.456 (0.185)	11.371	0.411	0.855 (0.00163)	11.749	0.571
Линейная регрессия	0.345 (0.32874)	17.266	0.448	0.853 (0.00171)	13.177	0.573
Дерево регрессии	-0.021 (0.95477)	13.479	0.460	0.729 (0.01666)	17.305	0.505

Примечание. МП – мультипликативный показатель.

Оценка прогноза: Pearson – коэффициент корреляции Пирсона, RMSE – среднеквадратичная ошибка, MAPE – средняя абсолютная ошибка.

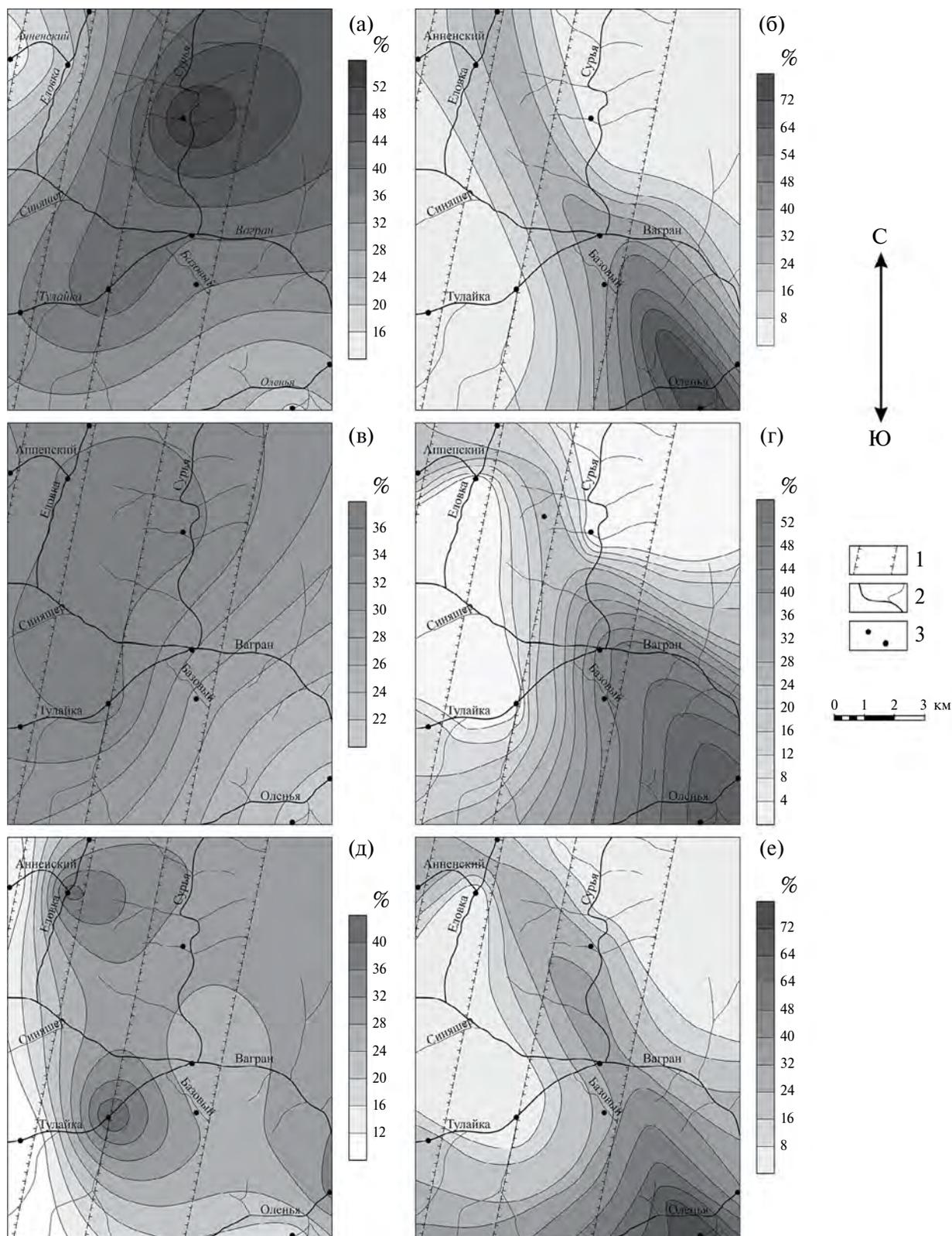


Рис. 5. Фактическое (по данным шлихового опробования) и прогнозные содержание золота типов II и V в пределах Вагранского узла.

а, б – содержание золота (%) типов II (а) и V (б) по данным разведки; в, г – прогнозные содержание золота (%) типов II (в) и V (г), рассчитанное методом мультипликативных показателей; д, е – прогнозные содержание золота (%) типов II (д) и V (е), рассчитанное методом линейной регрессии.

1 – эрозионно-структурные депрессии, 2 – водотоки, 3 – точки опробования.

индикаторных признаков первичной минерализации использованы шлиховые проявления золота ближнего сноса. Тем не менее, выделенные перспективные площади подтверждаются имеющимися данными по коренной золотой минерализации. В верховьях р. Сурья выявлено проявление золото-сульфидно-кварцевого типа с содержанием золота до 8 г/т [Петров и др., 2015]. Оно совпадает с максимальным содержанием золота типа II и повышенными значениями MP_{II} . К сожалению, в имеющейся публикации нет описания типоморфных особенностей золота, не указана пробность, поэтому тип минерализации можно охарактеризовать только предположительно.

В зоне Оленья–Еловка, соответствующей повышенным содержаниям золота типа V и MP_V , в отобранных штуфных пробах присутствует рудное золото с содержанием 2–6.9 ppm. Содержание серебра 3.6–1.7 ppm и ртути 0.05–0.1 ppm указывает на его возможную связь со шлиховым золотом типа V. Несомненно, использование в качестве эталонов непосредственно коренных проявлений повысит достоверность исследований.

Таким образом, наиболее перспективной относительно прогноза коренной золотой минерализации в пределах Вагранского узла представляется линейная зона СЗ–ЮВ простираения, которая контролирует распределение в россыпях среднепробного ртутистого шлихового золота низкотемпературного гипогенно-гипергенного типа. Предполагается, что эта линейная зона разломов и/или разуплотнения пород была заложена на этапе постколлизии тектоно-магматической активизации. Распределение золота типа V слабо связано с элементами гидросети, что указывает на его позднее вскрытие (четвертичное время). Это позволяет предположить небольшой уровень его эрозионного среза и, соответственно, повышенный рудный потенциал. Полученные в результате расчета мультипликативных показателей перспективные площади могут быть использованы для постановки поисковых работ на золоторудные объекты.

СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Для дополнительной оценки эффективности описанного выше прогнозирования россыпной металлоносности посредством расчета мультипликативных показателей было проведено сравнение полученного при помощи этой методики прогноза с результатами других методов регрессии – линейной регрессии (linear regression) и

дерева регрессии (regression tree) с использованием алгоритма случайного леса (random forest). Поскольку эти методы более требовательны к отбору обучающей и тестовой выборок, но крайне малое количество точек не позволяло разбить их на два указанных независимых подмножества, расчет производился для каждой точки отдельно, путем исключения этой точки из выборки с дальнейшим обучением модели по всем оставшимся точкам и расчетом прогноза для этой точки. Далее составленные таким образом прогнозы для каждой отдельной точки были объединены в один общий прогноз.

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

$$f(x, b) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k. \quad (3)$$

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

На рис. 4д и 4е представлены прогнозные схемы содержаний золота типов II и V в пределах 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 переменных для прогнозирования результирующих непрерывных значений (в случае деревьев регрессии).

Случайный лес [Breiman, 2001] является алгоритмом машинного обучения, заключающийся в использовании комитета (множества) решающих деревьев, применяемый, 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 дерева регрессии был применен для прогнозирования содержания золота типов II и V по данным индикаторных характеристик. Поскольку, грубо говоря, дерево решений выделяет кластеры схожих объектов по указанным характеристикам, можно заключить, что этот метод в данном случае позволяет определить группы ячеек, формировавшихся в схожих условиях, в различной степени благоприятных для россыпеобразования и, таким образом, его применение логически обосновано для решения указанной задачи. Было построено множество деревьев регрессии при помощи алгоритма случайный лес и отобрано лучшее решение исходя из минимального значения среднеквадратичной ошибки.

В табл. 2 представлены статистические данные прогнозных моделей содержания золота II и V типов в пределах рассматриваемой территории, рассчитанные методом дерева регрессии с использованием алгоритма случайного леса, но их показатели столь низки (особенно для типа золота II), что приводят соответствующие схемы нет смысла.

Сравнивая результаты прогнозных моделей, полученных различными методами, можно заключить, что в целом они дают близкие результаты (за исключением прогноза содержания золота типа II методом дерева регрессии, где результат вообще не имеет ценности), при этом метод расчета мультипликативных коэффициентов в каждом случае выигрывает, предлагая более контрастный, выраженный результат. Также этот метод представляется наиболее простым и обобщенным, подходящим для любого набора согласованных данных, в то время как другие методы требуют более глубокого анализа входящих параметров. Для грубой оценки территорий метод расчета мультипликативных коэффициентов предоставляет возможность провести такую оценку на минимальном наборе данных, в то время как другие методы требуют представительных обучающих выборок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение представленной в работе компьютеризированной системы обработки данных шлихового опробования и получения мультипликативных показателей может быть использовано для прогноза коренной металлоносности. Хотя распределение индикаторных типов золота более непосредственно, чем мультипликативные показатели связано с проявлениями коренной минерализации, их применение осложняется необходимостью проведения опробования всей

исследуемой площади и получения шлихового золота для специализированных исследований. Связи шлихового золота с первичными источниками проявляются на уровне внутренней структуры зерен и их химического состава, поэтому также необходимо проведение специализированных аппаратных аналитических исследований (электронная микроскопия, микрозондовый анализ в шлифованных шашках).

Для выделения индикаторных типов шлихового золота и создания прогноза коренного оруденения требуется высокая квалификация и значительный практический опыт исследователя в изучении коренного и россыпного самородного золота, в то время как предлагаемый метод позволяет проводить прогнозную оценку оперативно, с меньшими затратами и в частично автоматизированном режиме. Для его применения не требуется специальных полевых и лабораторных исследований, первичная оценка может быть получена из стандартных данных геологических отчетов по изучению золота россыпей и шлиховых ореолов. Разрабатываемый метод, по меньшей мере, не уступает другим методам регрессии, таким как линейная регрессия и дерево регрессии, но менее требователен к качеству данных.

В настоящее время метод находится в стадии разработки и имеет ряд нерешенных вопросов, которые будет необходимо исследовать при продолжении работ. В частности, индикаторные характеристики апробированы в пределах одного золотоносного узла на двух типах первичной минерализации (золото-сульфидно-кварцевом и гипогенно-гипергенном). В будущем количество использованных индикаторных показателей и характеризующих ими типов первичной минерализации может быть увеличено. На текущем этапе в качестве индикаторных типов коренных источников использовано шлиховое золото с минимальными признаками переноса, имеющее максимальную связь с первичной минерализацией. Применение методики на объектах с известными рудными проявлениями повысит достоверность модели.

Уравнения (1) и (2) решают поставленную задачу в первом приближении, основываясь на предположении о линейном характере связи индикаторных характеристик с рудным потенциалом территорий. В случае нелинейности этих связей, расчетные формулы мультипликативных коэффициентов могут измениться, но качественный характер должен сохраниться. Применение комплексных мультипликативных показателей позволяет уменьшить влияние отдельных

характеристик (даже если они имеют нелинейную корреляционную зависимость) и усилить общие закономерности. Следует также отметить, что на текущем этапе анализ точек производится без внимания к рассмотрению включающей их территории как единого геологического объекта. Данные вопросы требуют дополнительных исследований на последующих этапах разработки методики.

Таким образом, в сегодняшнем состоянии предлагаемая методика оптимально применима на начальных этапах прогнозирования и планирования геологоразведочных работ, когда задача должна быть решена с использованием доступных данных и без применения дополнительных исследований. В случае подтверждения прогноза рекомендуется постановка более детальных работ на предполагаемых перспективных площадях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранников А.Г.* Мезозойские золотоносные россыпи Урала // Отечественная геология. 2009. № 2. С. 22–33.
- Баранников А.Г., Азовскова О.Б.* Золотоносные объекты гипогенно-гипергенного типа на Урале. Конвергентность признаков их отличия от рудоносных кор выветривания // Известия Уральского государственного горного университета. 2017. № 2(46). С. 13–22.
- Бенсман В.Р.* Поисковая геохимия в республике Беларусь // Природные ресурсы. 1999. № 4. С. 124–137.
- Бортников Н.С., Волков А.В., Галям А.Л., Викентьев И.В., Аристов В.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю.* Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 97–119.
- Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н., Тюкова Е.Э., Соболев И.Д., Абрамова В.Д., Выхристенко Р.И., Хубанов В.Б., Трофимов А.П., Грознова Е.О., Двуреченская С.С., Кряжев С.Г.* Золото-порфиоровое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.
- Ворошилов В.Г.* Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 104 с.
- Григорян С.П., Соловов А.П., Кузин М.Ф.* Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1983. 191 с.
- Грязнов О.Н., Баранников А.Г., Савельева К.П.* Нетрадиционные типы золото-аргиллизитового оруденения в мезозойских структурах Урала // Известия Уральского государственного горного университета. 2007. № 22. С. 41–53.
- Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
- 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. 2020а. Т. 22. № 2. С. 67–76.
- Лаломов А.В., Наумов В.А., Григорьева А.В., Магазина Л.О.* Эволюция Вагранского золотоносного россыпного узла (Северный Урал) и перспективы выявления коренной минерализации // Геология рудных месторождений. 2020б. Т. 62. № 5. С. 450–461. <https://doi.org/10.31857/S0016777020050044>
- Лежнепек М.А.* Золотоносные рудно-россыпные узлы южной части Сурьинско-Промысловской минералогической зоны / Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2006. 25 с.
- Логвиненко Н.В., Сергеева Э.И.* Методы определения осадочных пород. Л.: Недра, 1986. 240 с.
- Петров Г.А.* Прогнозирование благороднометалльного оруденения в допалеозойских черносланцевых толщах центральной части Уральского подвижного пояса // Литосфера. 2014. № 6. С. 88–101.
- Петров Г.А., Александров В.В., Зубков А.И., Маслов А.В., Ронкин Ю.Л.* К проблеме рудоносности черных сланцев Вишерско-Кутимского антиклинория (Северный Урал) // Вестник Пермского университета. Геология. 2015. № 4. С. 32–42.
- Плотинская О.Ю., Грознова Е.О., Коваленкер В.А., Новоселов К.А., Зелтманн Р.* Минералогия и условия образования руд Березняковского рудного поля (Южный Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51. № 5. С. 414–443.
- Поленов Ю.А., Огородников В.Н., Бабенко В.В.* Березовское месторождение золота – уникальный объект полихронного и полигенного рудообразования. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. 150 с.
- Романовский С.И.* Физическая седиментология. Л.: Недра, 1988. 240 с.
- Сазонов В.Н., Великанов А.Я.* Ашкинская благороднометалльная зона (Средний и Северный Урал): геологическая позиция, особенности строения, состав рудных тел и сопряженных метасоматитов, практическая значимость // Литосфера. 2010. № 4. С. 116–127.
- Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А.* Месторождения золота Урала. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2001. 622 с.
- Филиппов В.А., Рябинин В.Ф., Сысоева З.З.* Гагарское золоторудное месторождение на Среднем Урале, Россия // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 1. С. 33–47.

Чефранов Р.М., Лаломов А.В., Чефранова А.В. Поисково-ориентированная методика численного прогнозирования редкометалльных россыпей ближнего сноса на примере Ловозерского россыпного района // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 2. С. 138–151.

Чефранов Р.М., Лаломов А.В. Поисково-ориентированная методика численного прогнозирования редкометалльно-титановых россыпей на примере Умытшинской россыпи (Ханты-Мансийский автономный округ) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2024. № 21. С. 244–250.

Шуб В.С., Баранников А.Г., Шуб И.З. и др. Золото Урала. Россыпные месторождения (к 250-летию золотой

промышленности Урала). Екатеринбург: УИФ “Наука”, 1993. 135 с.

Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. V. 45. P. 5–32.

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.

Lalomov A.V., Chefranov R.M., Naumov V.A., Naumova O.B., LeBarge W., Dilly R.A. Typomorphic features of placer gold of Vagran cluster (the Northern Urals) and search indicators for primary bedrock gold deposits // Ore Geology Reviews. 2017. № 85. P. 321–335.

Trask P.D. Origin and environment of source sediment of petroleum. Houston, 1932. 281 p.

SEARCH-ORIENTED TECHNIQUE OF THE NUMERICAL FORECASTING OF THE GOLD PLACERS: EVIDENCE FROM THE VAGRAN PLACER DISTRICT

R. M. Chefranov^{1, *}, A. V. Lalomov^{1, **}, A. A. Bochneva^{1, ***}

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

**e-mail: roman_chefr@bk.ru*

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

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

As a result of field research, as well as analysis of data from stock reports, two types of placer gold were identified within the Vagran placer cluster of the Northern Urals, which are indicators of primary mineralization of gold-sulfide-quartz and hypogene-hypergene types, which were used as benchmarks for developing a digital system for predicting parameters and localizing primary sources of placer gold. In the present work the typomorphic characteristics of placer gold (size, roundness, sorting and fineness, as well as the content of impurity elements) are formalized (in the form of a quantitative assessment). These data were processed using the methods of multiplicative indicators, linear regression method and a regression tree method using a random forest algorithm, which make it possible to forecast the composition and localization of the primary mineralization with greater confidence and stability than ordinary parameters separately. The data required for such an assessment do not require additional field and highly qualified laboratory studies, they are contained in standard reports on the heavy minerals testing. The study of the correlation matrix allowed to identify characteristic indicators for the primary mineralization of gold-sulfide-quartz and hypogenic-hypergenic types, and to give recommendations for conducting prospecting and exploration in order to identify the primary gold content of the cluster. All three methods used gave consistent results that make it possible to predict the parameters of primary gold content, while the method of calculating multiplicative coefficients gives a more contrasting, pronounced result, seems to be the simplest and most generalized, suitable for any set of consistent data, while other methods require a more in-depth analysis incoming parameters. The proposed method of creating forecast estimates allows to increase efficiency and partially automate the process of determining the prospects for primary mineralization of territories.

Keywords: placers, strategic metals, gold, multiplicative indicators, forecast model