

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.67-76>

УДК 553.411

Разработка цифровой системы прогнозирования коренных источников золота по результатам шлихового опробования на примере Вагранского россыпного узла (Северный Урал)

А.В. Лаломов, А.А. Бочнева, Р.М. Чефранов

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

На основе результатов полевых исследований, а также данных фондовых отчетов, в пределах Вагранского россыпного узла были выделены два типа шлихового золота, которые являются индикаторами коренной минерализации. Они использованы в качестве эталонов для разработки цифровой системы прогнозирования параметров и локализации первичных источников россыпного золота.

Формализованные типоморфные характеристики шлихового золота (крупность, окатанность, сортировка и пробность, а также содержание элементов-примесей), объединенные в мультипликативные показатели, позволяют с большей достоверностью, чем рядовые параметры в отдельности, прогнозировать состав и локализацию коренного оруденения. Необходимые для такой оценки данные не требуют дополнительных полевых и высоко квалифицированных лабораторных исследований, они содержатся в стандартных отчетах по шлиховому опробованию и, в отличие от характеристик отдельных индикаторных типов россыпного золота, дают более стабильные результаты.

Исследование системы корреляционных связей позволило выделить характеристические показатели для коренной минерализации золото-сульфидно-кварцевого и гипогенно-гипергенного типов и дать рекомендации по проведению поисково-разведочных работ с целью выявления коренной золотоносности узла. Предлагаемый метод создания прогнозных оценок позволяет компьютеризировать процесс определения перспектив коренного оруденения территорий.

Ключевые слова: россыпные месторождения, стратегические металлы, моделирование, прогноз, мультипликативные показатели

Для цитирования: Лаломов А.В., Бочнева А.А., Чефранов Р.М. (2020). Разработка цифровой системы прогнозирования коренных источников золота по результатам шлихового опробования на примере Вагранского россыпного узла (Северный Урал). *Георесурсы*, 22(2), с. 67-76. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.67-76>

За почти 200 лет эксплуатации золотых месторождений Урала основная масса золота была добыта из россыпных месторождений, но в настоящее время перспективы поддержания золотодобычи в регионе связываются с коренными объектами, а имеющиеся россыпи и шлиховые ореолы могут служить в качестве поискового критерия первичной золотоносности. Для оценки потенциала длительно развивающихся рудно-россыпных узлов на эндогенное оруденение, в том числе и новых нетрадиционных типов (Баранников, 2009), необходимо проводить исследования вещественных и пространственно-генетических связей в ряду «коренной источник – промежуточный коллектор – россыпь».

Несмотря на почти столетний период отработки россыпей золота на территории Вагранского узла, вопросы, касающиеся коренных источников золота, остаются нерешенными. Считается, что на стадии мезозойской пенеplanation 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 (ЭСД) (Баранников, 2009; Сазонов и др., 2001).

Для выявления первичных источников россыпного золота необходимо проведение специализированных полевых работ и лабораторных исследований. Предлагаемый авторами алгоритм формализации стандартных типоморфных характеристик россыпного золота и дальнейшее объединение их в мультипликативные показатели позволяет автоматизировать, существенно упростить и оптимизировать процесс прогнозирования коренной минерализации.

Геологическое строение и первичная металлоносность узла

Взятый в качестве эталонного объекта Вагранский золотоносный узел расположен в пределах Ашкинской и Сурьинско-Промысловской минерагенических зон Северного Урала, граница между которыми проходит по региональному меридионально ориентированному разлому. В обеих рудных зонах развиты породы черносланцевой формации: в Ашкинской – верхнерифейского (R_3), а в Сурьинско-Промысловской – преимущественно ордовикского (O) возрастов. Размеры исследованной части узла 12.5 км на 15 км.

* Ответственный автор: Александр Валерианович Лаломов
E-mail: lalomov@mail.ru

© 2020 Коллектив авторов

Рифейский комплекс состоит из метаморфизованных терригенных отложений, в нижней части которых преобладают более грубозернистые разности (хлорит-серицитовые сланцы, кварцито-песчаники, реже кварцитовые конгломераты), в верхней – глинистые хлорит-кварцевые сланцы и филлиты) (Сазонов, Великанов, 2010). Ордовикский комплекс представлен серыми и черными углисто-кварцитовыми и углисто-филлитовыми сланцами с подчиненным прослоями карбонатосодержащих разностей; в верхней части появляются эффузивы основного состава с согласно залегающими прослоями кварцевых порфиритов. 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 погребённый гранитоидный массив (Петров и др., 2015).

В настоящее время в пределах Вагранского узла выявлены одиночные кварцевые жилы с содержанием сульфидов до 0.5-2.0%, 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 0.5-1.0 г/т) сопровождается линейные зоны расланцевания и пиритизации, участки смятия, дробления в метаморфических сланцах и листовитоподобных зонах гидротермально измененных пород (Новицкий и др., 1967).

В верховьях р. Сурия выделено проявление золото-сульфидно-кварцевого типа. Оно представлено 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 возраста, на аналогичных рудопроявлениях на уровне современного эрозионного среза большей частью оказались эродированными (Баранников, Азовскова, 2017), и Сурийское 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: золоточерносланцевый сухоложский,

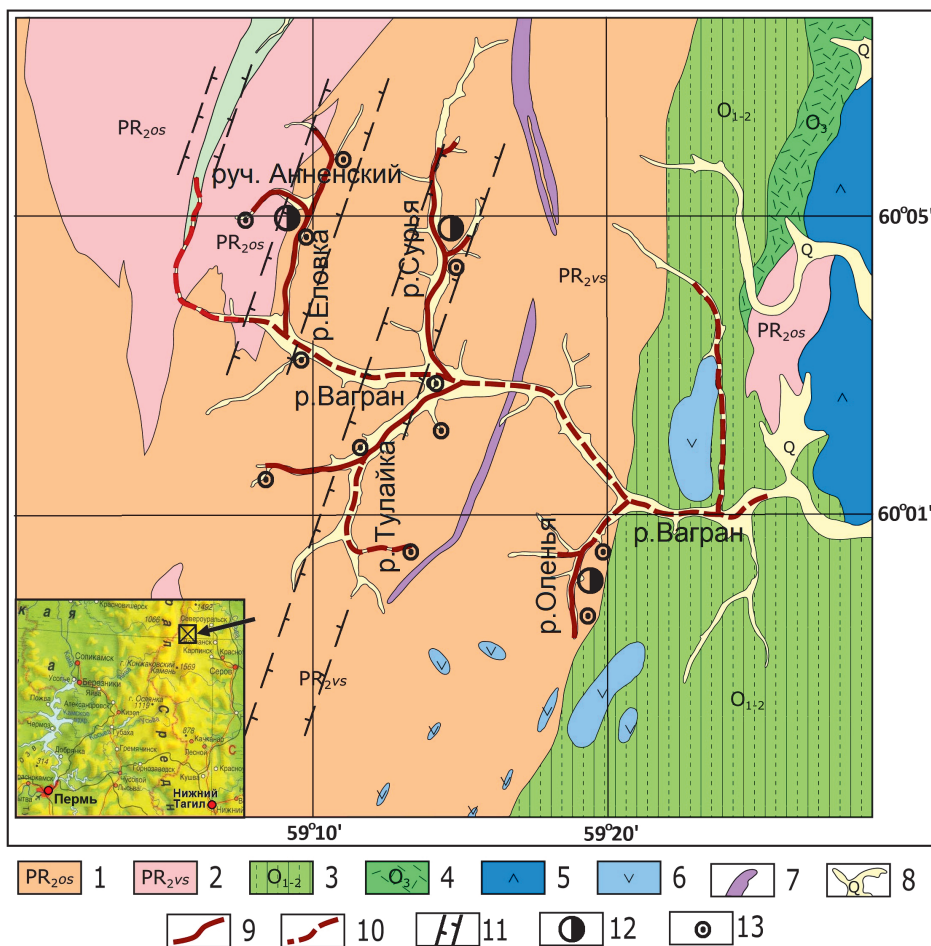


Рис. 1. Геологическая карта Вагранского россыпного узла (по материалам (Новицкий и др., 1967)). 1, 2 – метаморфизованные терригенные осадочные породы верхнего протерозоя (рифей): 1 – кварциты и песчаники ослянской свиты, 2 – карбонатно-черносланцевая толща с эффузивами основного состава висимской свиты; 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 порфиритов); 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 – рудопроявления золота; 13 – точки опробования.

золото-аргиллизитовый и рудоносных химических кор выветривания (Лежелеков, 2006; Петров, 2014).

Выделяемая в последнее время минерализация гипогенно-гипергенного типа связывается с перспективами выявления новых золоторудных месторождений на Урале. Минерализация приурочена к шовным зонам, разрывным нарушениям и зонам разуплотнения пород. Гипогенная составляющая обусловлена развитием низкотемпературных гидротермальных метасоматитов, гипергенная – наличием кор химического выветривания. Активизация малоуглубленных низкотемпературных процессов золотого рудогенеза протекала в несколько стадий: раннемезозойскую (Т- J_1), позднемезозойскую (J_2 -К) и кайнозойскую (Pg_3 -Q), которые в общих чертах совпадали с фазами постколлизийной тектоно-магматической активизации региона (Шуб и др., 1993). Отличительной особенностью минерализации этого типа является доминирование мелкого и тонкого золота, а также широкий диапазон колебаний пробыности 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, которые представлены метаморфизованными сланцами, алевролитами и песчаниками, или на выветрелых элювиальных отложениях; в ряде случаев пласт лежит на ложном плотике в основании второго (среднечетвертичного) цикла развития аллювиальной системы. Распределение золота как по мощности и ширине, так и по простиранию россыпей неравномерное.

Фактический материал и данные предшествующих исследований

Материалом для исследования послужили данные шлихового опробования аллювиальных, ложковых, склоновых и элювиальных отложений в пределах современных и отработанных карьеров и в русловом материале природных водотоков, проведенного на территории россыпного узла общей площадью около 400 км², а также данные взятые из «Отчета о геологоразведочных работах на Вагранском месторождении россыпного золота» (Новицкий и др., 1967). На полевом этапе исследований пробы весом 20 кг были промыты лотком до черного шлиха, из которого золото извлекалось разделением в тяжелой жидкости в лаборатории Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН). В пределах Вагранского узла всего было опробовано 20 точек (которые затем были объединены и общее число точек составило 10), и получены 372 золотины (Лаломов и др., 2020).

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

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

В предыдущих работах (Лаломов и др., 2020; Lalomov et al., 2017) авторами выделены пять типов золота, которые отличаются морфологией, химическим составом и структурой золотины (рис. 2). Тип I представлен хорошо- и среднеокатанными золотинами, высокопробными и без обогатенных кайм, тогда как тип II характеризуется средне- и плохоекатанными высокопробными золотинами без обогатенных кайм. Морфологически тип III идентичен зернам типов I и II, но имеет высокопробную кайму гипергенного происхождения. Золото типа IV идиоморфное и интерстициальное, высокопробное без обогатенных кайм, характеризующее, в первую очередь, мезотермальный уровень зоны минерализации. Золотины V типа – плохоекатанные, средне- и низкопробные, с повышенным содержанием серебра и ртути (табл. 1).

Распределение выделенных типов золота в пределах узла неравномерное: типы I и II встречаются по всей территории, при этом на периферии преобладает более окатанное золото первого типа I. Золото типов III и IV тяготеет к зонам ЭСД. Золото типа V слабо связано с современной гидросетью и контролируется диагональной по отношению к структурам Урала зоной северо-западного простирания.

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. 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

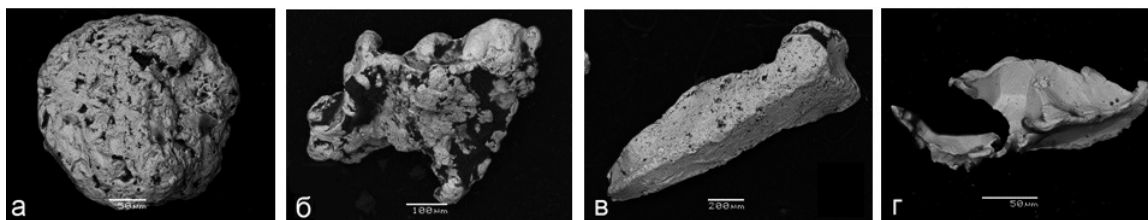


Рис. 2. Морфологические типы шлихового золота Вагранского узла. а – хорошо- и среднеокатанное высокопробное (тип I); б – средне- и плохоекатанное высокопробное (тип II); в – идиоморфное и интерстициальное, высокопробное (тип IV); г – неокатанное и плохоекатанное, средне- и низкопробное, с повышенным содержанием серебра и ртути (тип V).

	I тип золота	II тип золота	III тип золота	IV тип золота	V тип золота
Морфология	Золотины округлой формы с шероховатой, реже сглаженной поверхностью, с частыми царапинами и следами волочения.	Зерна с шероховатой сглаженной поверхностью, Форма золотин преимущественно дендритовидная, проволочная, листовидная, внутренняя структура однородная.	Аналогична зернам I и II типов	Золотины идиоморфной и интерстициальной морфологии с шероховатой поверхностью.	Золотины представлены угловатыми монокристалльными выделениями идиоморфных и ксеноморфных частиц с гладкой и раковистой поверхностью.
Окатанность	Хорошая и средняя	Средняя и плохая	Хорошая, средняя и плохая	Умеренные следы окатанности	Плохая и отсутствие окатанности
Пробность	933 (882–970) *	931 (901–957)	В ядре – 932 (882–970), в кайме – 986 (967–997)	948 (923–966)	828 (571–901)
Элементы-примеси (в мас. %)	Ag 6.18 (2.03–11.62); Cu 0.15 (0.06–1.08); Hg (0.154–0.268) - в единичных зернах.	Аналогичные типу I.	Ag 6.38; Cu 0.15	Ag 4.76.; Cu 0.17	Ag 15.8.; Hg до 1.15
% в россыпях	36.7	28.8	13.8	9.2	11.5 (0 – 76.5)
Внутренняя структура	Преимущественно однородная, наблюдается комковатое, губчатое и слоистое строение, образовавшееся при сворачивании в шарообразные агрегаты частиц золота неправильной формы в процессе транспортировки.	Преимущественно однородная, в отдельных зернах наблюдаются включения кобальтина.	Наличие высокопробной каймы (10–40 мк)	Без обогащенных кайм. Внутренняя структура равномерная, по составу аналогична зернам I и II типа.	Структура равномерная, с прожилками, обогащенными ртутью. Тонкие (3–5 мк) высокообогащенные (пробн. 923–967) каймы в отдельных зернах.
Расположение	Распространены по всей территории узла, имеют признаки переноса и длительного нахождения в зоне гипергенеза.		Тяготеет к зонам ЭСД.	Тяготеет к зоне Сосьвинской ЭСД.	Характерны признаки ближнего сноса и относительно короткого времени нахождения в зоне гипергенеза.
	Хорошо окатанное золото преобладает на флангах узла.	Дендритовидное среднеокатанное золото преобладает в центральной части			

Табл. 1. Выделенные типы золота (по Лаломов и др., 2020). Примечание: * среднее содержание (разброс значений).

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., 2020).

Таким образом, шлиховые ореолы золота второго и пятого типов имеют наибольшую связь с первичной минерализацией и могут служить индикаторами коренного оруденения, что было использовано в качестве эталонов для создания комплексных поисковых показателей.

Разработка прогнозных мультипликативных показателей

При поисках коренных месторождений золота применяется комплекс методов, среди которых весьма важным является шлиховое опробование. При этом информативным является не только общее содержание золота в рыхлых отложениях, но и его морфология, в

первую очередь окатанность, что свидетельствует 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.

Иногда таких данных достаточно для решения задачи выявления коренного источника россыпей, но чаще всего уровень признаков по отдельности не является достаточно информативным, и необходимы методы получения комплексных показателей, более контрастных 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.

С целью создания компьютеризированной системы прогнозирования коренного оруденения последовательно были осуществлены следующие этапы:

- выделены основные индикаторные характеристики (ИХ) шлиховых ореолов золота, определены направленность и степень связи ИХ с показателями коренной минерализацией;

- произведена формализация (количественная оценка) этих ИХ;

- в рамках ГИС-проекта Вагранского узла количественно оцененные ИХ получили пространственную привязку;

- на основании корреляционного анализа первичные ИХ объединены в мультипликативные показатели, построенные с учетом направленности влияния параметров на общий прогнозный результат.

Создаваемая компьютеризированная система позволяет собирать, хранить, обрабатывать и визуализировать данные на всех этапах процесса создания прогнозных оценок.

Для решения поставленной задачи были использованы следующие типоморфные ИХ шлихового золота – средняя крупность, сортированность (формализованная через коэффициент вариации крупности по размерным классам), окатанность по 5-бальной шкале от 0 (неокатанные) до 4 (очень хорошо окатанные зерна) для разных типов и по пробе в целом, пробность и содержание в золоте серебра, меди и ртути (рис. 3). Все полученные характеристики пространственно привязаны в рамках ГИС-проекта в пакете ArcGis.

Формализация сортированности через коэффициент вариации вызвана рядом причин: энтропия распределения по С.И. Романовскому требует более дробного анализа гранулометрического состава (Романовский, 1988); Классический коэффициент сортированности с

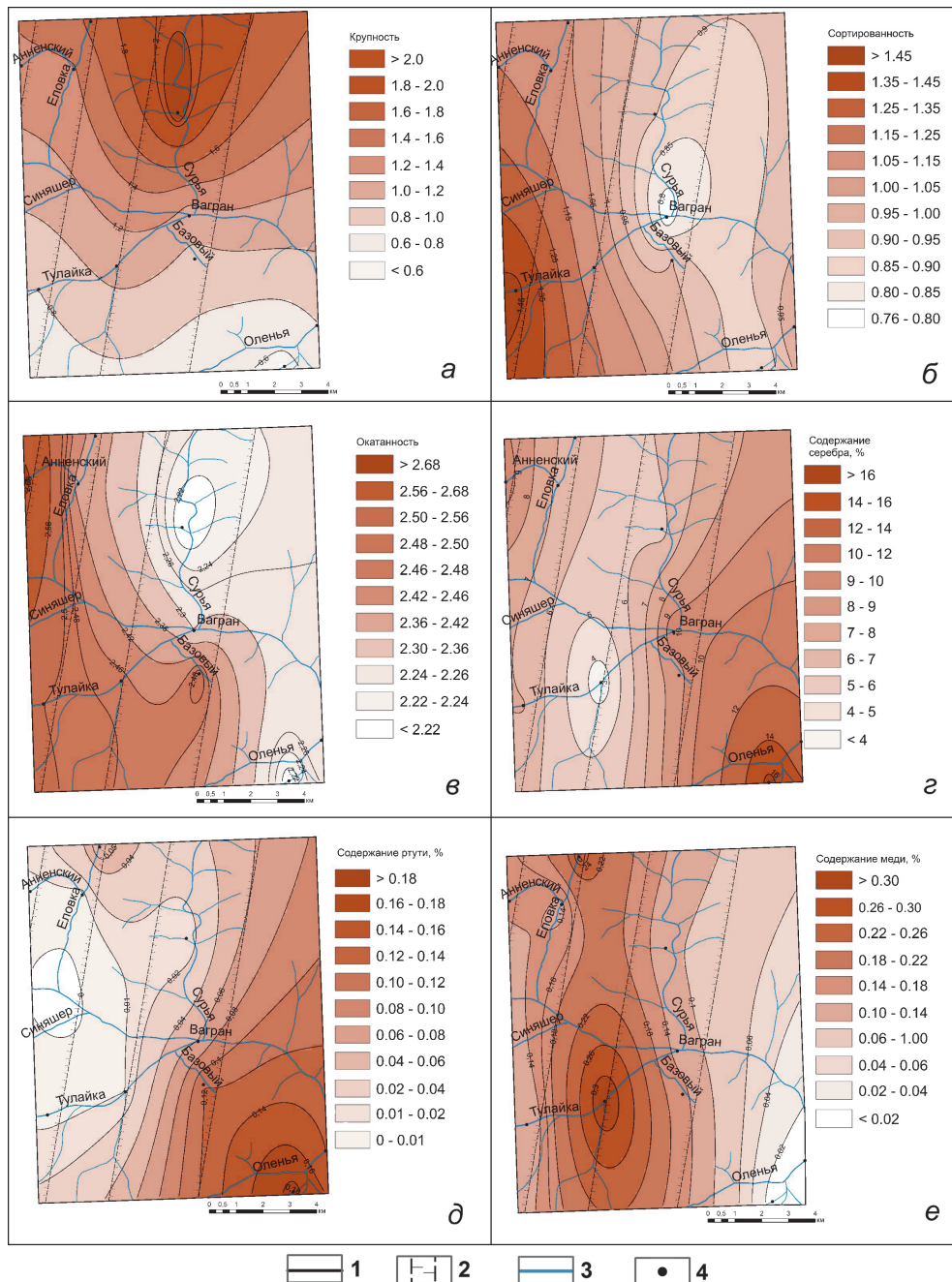


Рис. 3. Распределение формализованных индикаторных характеристик по площади узла: а – крупность, б – сортированность, в – окатанность, г – содержание Ag, д – содержание Hg, е – содержание Cu. 1 – границы участка, 2 – эрозионно-структурные депрессии, 3 – водотоки, 4 – точки отробования.

использованием квантилей по Траску (Trask, 1932) не является универсальным, он пригоден 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 средне-взвешенную крупность) является, в данном случае, наиболее представительным показателем сортированности золота по крупности.

Рядовые показатели далеко не всегда могут однозначно характеризовать прогнозный потенциал исследуемой области на минерализацию различных типов, поэтому были применены мультипликативные показатели (МП), аналогичные используемым в геохимии для увеличения контрастности индикаторных признаков. МП рассчитывается по формуле, в которой в числителе располагаются произведения результатов анализа элементов (в нашем случае – ИХ) положительной корреляции с искомым типом минерализации, а в знаменателе произведения нейтральных или отрицательных индикаторов искомого параметра (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 МП дает более стабильный результат, уменьшающий влияние случайных отклонений и ошибок (Ворошилов, 2011).

Для создания обобщенных прогнозных характеристик построена матрица парных коэффициентов корреляции между ИХ и содержанием золота типов II и V, которые являются эталонными показателями первичной минерализации (табл. 2). На основе этих данных сформулированы МП, которые характеризуют зоны, наиболее перспективные для поисков коренных источников золота.

С золотом второго типа («C_{II}») в положительной корреляции находятся крупность частиц и содержание меди, в отрицательной – сортированность, окатанность частиц и содержания серебра и ртути. Поэтому МП,

характеризующий (через распространенность золота типа II) коренные источники золото-сульфидно-кварцевой формации, вскрытые на этапе пенеппенизации и прошедшие через промежуточные коллектора (МП 1), рассчитывается по формуле:

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

С золотом пятого типа («C_V») в положительной корреляции находятся содержания серебра и ртути, в отрицательной – крупность, сортированность, окатанность частиц и содержание меди. Поэтому МП, характеризующий (через распространенность золота типа V) коренные источники гипогенно-гипергенного типа, вскрытые на четвертичном этапе (МП 2), рассчитывается по формуле:

$$\text{МП 2} = (\text{Ag} \times \text{Hg}) / (K \times S \times O \times \text{Cu}). \quad (2)$$

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что МП 2 имеет реальную устойчивую корреляцию с содержанием золота V типа ($R = 0.86$), 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 1 имеет менее очевидную связь с зоной первичного источника, индикаторным признаком которой является золото типа II. Хотя МП 1 имеет более устойчивую корреляцию с главным индикаторным признаком золото-кварцевого оруденения, чем частные связи (за исключением содержания серебра), общая устойчивость корреляции ($R = 0.46$) меньше критического значения $R = 0.55$ при уровне доверительной вероятности $\alpha = 0.90$. Очевидно, 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.

Хотя содержание серебра (что эквивалентно пробности из-за низких содержаний других примесей) более контрастно по сравнению с МП 1 ($R = -0.61$), его применение отдельно от других ИХ может иметь повышенную погрешность и характеризовать зональность изменения пробности единого источника, а не наличие разных формационных источников; поэтому применение МП дает более стабильный и обоснованный результат.

	C _{II}	C _V	K	S	O	Ag	Hg	Cu	МП 1	МП 2
C _{II}		-0.59	0.44	-0.12	-0.31	-0.61	-0.34	0.31	0.46	-0.48
C _V			-0.54	-0.52	-0.45	0.80	0.80	-0.56	-0.53	0.86
K				-0.10	-0.05	-0.60	-0.60	0.36		
S					0.61	-0.37	-0.50	0.18		
O						-0.33	-0.46	0.43		
Ag							0.81	-0.79		
Hg								-0.54		
Cu										

Табл. 2. Матрица парных коэффициентов корреляции (R) между типоморфными индикаторными характеристиками, содержанием индикаторных типов золота и полученными мультипликативными показателями. Примечание: «C_{II}», «C_V» – содержание золота индикаторных типов II и V в общем илиховом золоте; «K» – средний размер илихового золота (крупность); «S» – сортированность, выраженная через коэффициент вариации размерности; «O» – окатанность по 5-бальной шкале; «Ag», «Hg», «Cu» – содержание серебра, ртути и меди в золоте; «МП 1», «МП 2» значения мультипликативных показателей. Критическое значение $R = 0.55$ при объеме выборки $N=10$ и доверительной вероятности $\alpha = 0.90$.

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. 4. В качестве эталонных показателей коренного оруденения были приняты распределения индикаторных типов золота II и V, а в качестве прогнозных критериев – МП 1 и МП 2.

МП 1 имеет максимальное значение в районе среднего и верхнего течения р. Сурья; второй, менее выраженный максимум, связан с бассейном р. Еловка (устье руч. Анненский). Значения МП 1 уменьшаются к периферии узла. Это приблизительно совпадает с распределением золота типа II и подтверждает предположение, что в этой зоне локализован основной первичный источник россыпного золота узла.

Максимальные значения МП 2 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 МП, поэтому в предлагаемом исследовании в качестве 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 содержаниями золота до 8 г/т (Петров и др., 2015). Оно совпадает с максимальными содержаниями золота типа II и повышенными значениями МП 1. 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 МП 2, в отобранных штучных 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 с шлиховым золотом типа V. Несомненно, что использование в качестве эталонов непосредственно коренных проявлений повысит достоверность исследований.

Полученные по мультипликативным показателям перспективные площади могут быть использованы для постановки поисковых работ на золоторудные объекты.

Таким образом, относительно прогноза коренной золотой минерализации в пределах Вагранского узла, наиболее перспективной представляется линейная зона СЗ-ЮВ простирания, контролирующая распределение в россыпях среднепробного ртутистого шлихового золота низкотемпературного гипогенно-гипергенного типа. Предполагается, что она определяется линейной зоной разломов и/или разуплотнения пород, заложённой на

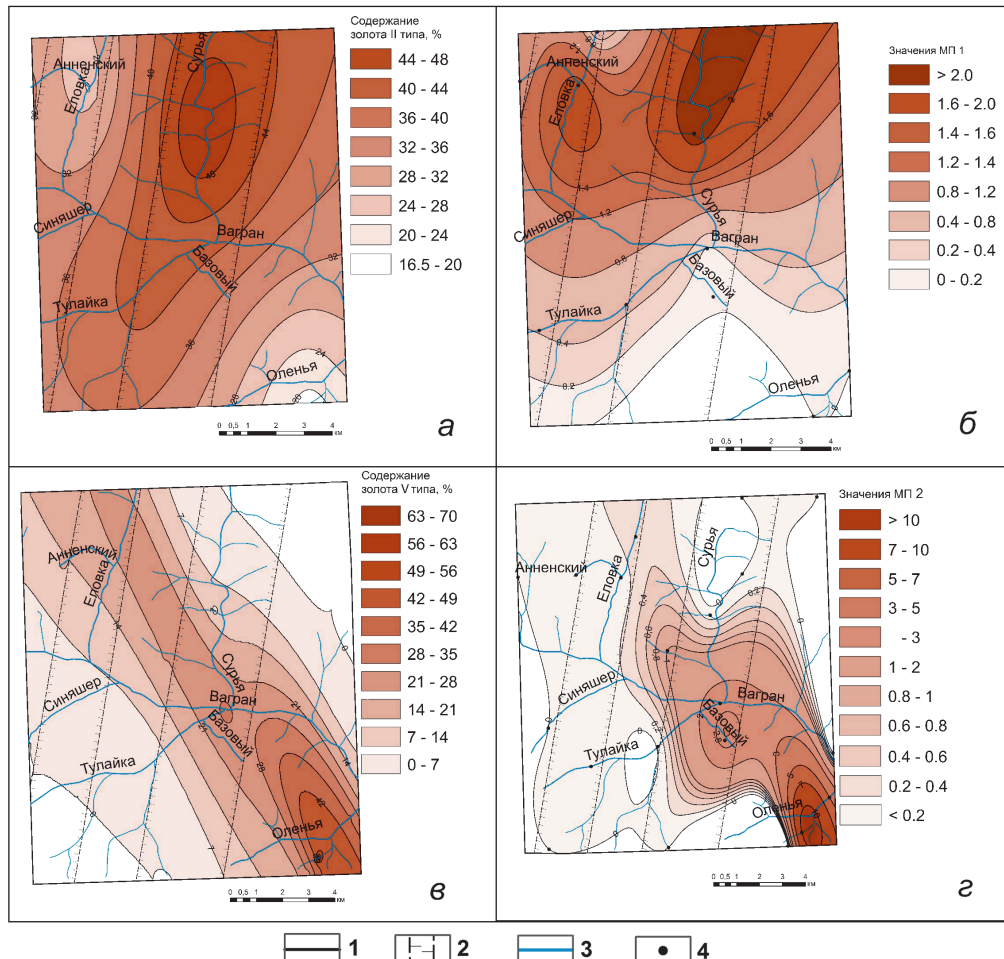


Рис. 4. Распределение индикаторных типов коренного золота и мультипликативных показателей: а – золото типа II (%), б – МП 1, в – золото типа V (%), з – МП 2. 1 – границы участка, 2 – эрозионно-структурные депрессии, 3 – водотоки, 4 – точки отробования.

этапе постколизийной тектоно-магматической активизации. Слабое проявление связи распределения золота четвертого типа с элементами гидросети указывает на его позднее вскрытие (четвертичное время), что позволяет предположить небольшой уровень его эрозионного среза и, соответственно, повышенный рудный потенциал.

Применение компьютеризированной системы обработки данных шлихового опробования и полученных 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 рядом причин:

- для выделения индикаторных типов шлихового золота, указывающих на коренные объекты, необходимо проведение 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 необходимо проводить специализированные аппаратные аналитические исследования (электронную микроскопию, микрозондовый анализ в шлифованных шашках);

- для выделения индикаторных типов шлихового золота и создания прогноза коренного оруденения требуется высокая квалификация и большой практический опыт исследователя в изучении коренного и россыпного самородного золота, в настоящее время количество таких специалистов в России недостаточно для проведения массовых прогнозных оценок.

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

- не требует специальных полевых и лабораторных исследований, использует стандартные данные геологических отчетов по изучению золота россыпей и шлиховых ореолов;

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

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

- ИХ апробированы в пределах одного золотоносного узла на двух типах первичной минерализации (золото-сульфидно-кварцевом и гипогенно-гипергенном); количество использованных ИХ 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 этой 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 ИХ с рудным потенциалом территорий; в случае нелинейности этих связей, расчетные формулы МП могут измениться, но качественный

характер, скорее всего, сохранится. Применение комплексных мультипликативных показателей позволяет уменьшить влияние отдельных характеристик (даже если они имеют нелинейную корреляционную зависимость) и усилить общие закономерности. Данный вопрос требует дополнительных исследований на последующих этапах разработки методики.

Таким образом, в современном 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.

Заключение

На основе формализованных (количественно оцененных) индикаторных характеристик шлихового золота, методами численного компьютерного моделирования и ГИС-технологий на примере Вагранского золотоносного узла создана система пространственно расчета и позиционирования мультипликативных показателей, оценивающих зону вероятного нахождения коренной металлоносности.

Предлагаемая методика дает возможность на начальных этапах работ использовать для прогноза результаты рядовых анализов, в том числе, содержащиеся в фондовых отчетах.

Полученные в данной работе мультипликативные показатели ориентированы на прогноз двух типов оруденения (золото-сульфидно-кварцевое и гипогенно-гипергенное); для других рудоносных формаций могут быть использованы другие параметры, что будет являться темой дальнейших исследований.

Тем не менее, уже в имеющемся виде она может быть использована для планирования геолого-поисковых работ, а также служить основой для дальнейшей разработки более детальных и точных вариантов методики, а также расширения ее на другие геолого-генетические типы минерализации.

На основании проведенных исследований в пределах Вагранского золотоносного узла выделена зона, перспективная на выявление коренной минерализации гипогенно-гипергенного типа.

Применение разрабатываемой методики не означает отказ от существующих методов прогнозирования коренного оруденения. Она не сможет полностью заменить специалиста, и поэтому может быть использована в качестве гибридной системы, работающей в режиме диалога «оператор – компьютер», облегчающей специалисту процесс принятия решения. Аналогичный подход уже используется для экспресс-оценки новых рудопроявлений золота в Арктической зоне России (Чижова и др., 2019).

Финансирование

Работы проведены в рамках государственного задания по программе № 0136-2019-0006. Полевые работы проведены при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-05-00113. Аналитические работы выполнены в ЦКП «ИГЕМ-Аналитика» в рамках программы НИР ИГЕМ.

Литература

- Баранников А.Г. (2009). Мезозойские золотоносные россыпи Урала. *Естественная геология*, 2, с. 22-33.
- Баранников А.Г., Азовскова О.Б. (2017). Золотоносные объекты гипогенно-гипергенного типа на Урале. Конвергентность признаков их отличия от рудоносных кор выветривания. *Известия Уральского государственного горного университета*, 2, с. 13-22. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-13-22>
- Ворошилов В.Г. (2011). Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 104 с.
- Григорян С.П., Соловов А.П., Кузин М.Ф. (1983). Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М.: Недра, 191 с.
- Грязнов О.Н., Баранников А.Г., Савельева К.П. (2007). Нетрадиционные типы золото-аргиллизитового оруденения в мезозойских структурах Урала. *Известия Уральского государственного горного университета*, 22, с. 41-53.
- Лаломов А.В., Наумов В.А., Григорьева А.В., Магазина Л.О. (2020). Эволюция Вагранского золотоносного россыпного узла (Северный Урал) и перспективы выявления коренной минерализации. *Геология рудных месторождений* (в печати).
- Лежелеков М.А. (2006). Золотоносные рудно-россыпные узлы южной части Сурьинско-Промысловской минерагенической зоны. Автореферат дис. канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: УГГУ, 25 с.
- Логвиненко Н.В., Сергеева Э.И. (1986). Методы определения осадочных пород. Л.: Недра. 240 с.
- Новицкий В.Я., Ушаков С.А., Суханов Л.П., и др. (1967). Отчет о геологоразведочных работах на Вагранском месторождении россыпного золота с подсчетом запасов по состоянию на 01.07.1967 года. Североуральская комплексная экспедиция, Сосьвинская ГРП. Североуральск, пос. Покровск-Уральский. № ТГФ 30652.
- Петров Г.А. (2014). Прогнозирование благороднометалльного оруденения в допалеозойских черносланцевых толщах центральной части Уральского подвижного пояса. *Литосфера*, 6, с. 88-101.
- Петров Г.А., Александров В.В., Зубков А.И., и др. (2015). К проблеме рудоносности черных сланцев Вишерско-Кутимского антиклинария (Северный Урал). *Вестник Пермского университета. Геология*, 4, с. 32-42.
- Романовский С.И. (1988). Физическая седиментология. Л.: Недра, 240 с.
- Сазонов В.Н., Великанов А.Я. (2010). Ашкинская благороднометаллическая зона (Средний и Северный Урал): геологическая позиция,

особенности строения, состав рудных тел и сопряженных метасоматитов, практическая значимость. *Литосфера*, 4, с. 116-127.

Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А. и др. (2001). Месторождения золота Урала. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 622 с.

Чиждова И.А., Лобанов К.В., Волков А.В. (2019). Логико-информационные модели для прогноза и оценки новых месторождений золота в Арктической зоне России. *Арктика: экология и экономика*, 4(36), с. 107-117. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-4-107-117>

Шуб В.С., Баранников А.Г., Шуб И.З. и др. (1993). Золото Урала. Россыпные месторождения (к 250-летию золотой промышленности Урала). Екатеринбург: УИФ «Наука», 135 с.

Lalomov A.V., Chefranov R.M., Naumov V.A. et al. (2017). Typomorphic features of placer gold of Vagran cluster (the Northern Urals) and search indicators for primary bedrock gold deposits (2017). *Ore Geology Reviews*, 85, pp. 321-335. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.018>.

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

Сведения об авторах

Александр Валерианович Лаломов – доктор геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

119017 Москва, Старомонетный пер., 35

Тел: +7(499)2308427, e-mail: lalomov@mail.ru

Анна Александровна Бочнева – канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

119017 Москва, Старомонетный пер., 35

Роман Михайлович Чефранов – канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

119017 Москва, Старомонетный пер., 35

Статья поступила в редакцию 17.03.2020;

Принята к публикации 06.05.2020; Опубликована 30.06.2020

IN ENGLISH

The development of numerical forecasting systems of primary sources of gold on the results of placer sampling in the example Vagran placer cluster (North Urals)

A.V. Lalomov, A.A. Boneva, R.M. Chefranov*

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**Corresponding author: Alexander V. Lalomov, e-mail: lalomov@mail.ru*

Abstract. Based on the results of field research, as well as data from stock reports, two types of placer gold were identified within the Vagran placer cluster, which are indicators of primary mineralization. They are used as benchmarks for developing a digital system for predicting parameters and localizing primary sources of placer gold.

Formalized typomorphic characteristics of placer gold (size, roundness, fineness, sorting and content of impurity elements), combined in multiplicative indicators, make it possible to forecast the composition and localization of the primary mineralization with greater confidence 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, and, in contrast to the characteristics of individual indicator types of placer gold, they give more stable results.

The study of the correlation system 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. The proposed method of creating forecast estimates allows to computerize the process of determining the prospects for primary mineralization of territories.

Keywords: placer deposits, strategic metals, modeling, forecast, multiplicative indicators

Recommended citation: Lalomov A.V., Boneva A.A., Chefranov R.M. (2020). The development of numerical forecasting systems of primary sources of gold on the results of placer sampling in the example Vagran placer cluster (North Urals). *Georesursy = Georesources*, 22(2), pp. 67-76. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.2.67-76>

References

- Barannikov A. G., Azovskova O. B. (2017). Gold-bearing objects of hypogene-supergene type in the Urals. Convergence of signs of their difference from ore-bearing weathering crusts. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University*, 2, pp. 13-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-13-22>
- Barannikov A.G. (2009). Mesozoic gold-bearing placers of the Urals. *Otechestvennaya geologiya*, 2, pp. 22-33. (In Russ.)
- Chizhova I.A., Lobanov K.V., Volkov A.V. (2019). Logical and information models for the forecast and rapid assessment of new gold deposits in the Arctic zone of Russia. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*, 4(36), pp. 107-117. (In Russ.) <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-4-107-117>
- Grigoryan S.P., Solovov A.P., Kuzin M.F. (1983). Instructions on geochemical methods of ore deposits prospecting. Moscow: Nedra, 191 p. (In Russ.)
- Gryaznov O.N., Barannikov A.G., Savelieva K.P. (2007). Non-traditional types of gold-argillite mineralization in Mesozoic structures of the Urals. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University*, 22, pp. 41-53. (In Russ.)
- Lalomov A.V., Chefranov R.M., Naumov V.A. et al. (2017). Typomorphic features of placer gold of Vagran cluster (the Northern Urals) and search indicators for primary bedrock gold deposits (2017). *Ore Geology Reviews*, 85, pp. 321-335. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.018>
- Lalomov A.V., Naumov V.A., Grigorieva A.V., Magazina L.O. (2020). Evolution of Vagren gold bearing cluster (North Ural) and prospects for detecting of primary mineralization. *Geology of Ore Deposits* (in print). (In Russ.)
- Lezhepekov M.A. (2006). Gold-bearing ore-placer nodes in the southern part of the Suryinsko-Promyslovsky mineralogenous zone. Abstract cand. sci. diss. Ekaterinburg: UGGU, 25 p. (In Russ.)
- Logvinenko N.V., Sergeeva E.I. (1986). Methods for the determination of sedimentary rocks. Leningrad: Nedra, 240 p. (In Russ.)
- Novitskiy V.Ya., Ushakov S.A., Sukhanov L.P. et al. (1967). Report on geological exploration at the Vagranskoe deposit of alluvial gold with a reserve estimate on 01.07.1967. Severouralsk integrated expedition, Sosvinskaya GRP. Seveouralsk, Pokrovsk-Uralsky. No. TGF 30652. (In Russ.)
- Petrov G.A. (2014). Prediction of noble metal mineralization in the pre-Paleozoic black shale strata of the central part of the Ural mobile belt. *Lithosphere (Russia)*, 6, pp. 88-101. (In Russ.)
- Petrov G.A., Aleksandrov V.V., Zubkov A.I., et al. (2015). To the Problem of Ore Content of Black Shale of Vi-shera-Kutim Anticlinorium (Northern Urals). *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya = Bulletin of Perm University. Geology*, 4, pp. 32-42. (In Russ.)
- Romanovsky S.I. (1988). Physical sedimentology. Leningrad: Nedra, 240 p. (In Russ.)
- Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A. et al. (2001). Gold deposits of the Urals. Yekaterinburg: IGIG UrO RAN, 622 p. (In Russ.)
- Sazonov V.N., Velikanov A. Ya. (2010). Ashka noble metal zone (Middle and North Urals): geological position, structural features, composition of ore bodies and associated metasomatites, practical significance. *Lithosphere (Russia)*, 4, pp. 116-127. (In Russ.)
- Shub V.S., Barannikov A.G., Shub I.Z. et al. (1993). Gold of the Urals. Alluvial deposits (to the 250th anniversary of the gold industry of the Urals). Yekaterinburg: Nauka, 135 p. (In Russ.)
- Trask P.D. (1932). Origin and environment of source sediment of petroleum. Houston, 281 p.
- Voroshilov V.G. (2011). Geochemical methods of prospecting for mineral deposits. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 104 p. (In Russ.)

About the Authors

Alexander V. Lalomov – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Mineralogy, Petrography and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences

35, Staromonetny st., Moscow, 119017, Russian Federation
Tel: +7(499)2308427, e-mail: lalomov@mail.ru

Anna A. Bochneva – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Mineralogy, Petrography and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences

35, Staromonetny st., Moscow, 119017, Russian Federation

Roman M. Chefranov – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Mineralogy, Petrography and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences

35, Staromonetny st., Moscow, 119017, Russian Federation

Manuscript received 17 March 2020;

Accepted 6 May 2020;

Published 30 June 2020