

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОГНОЗНО-МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОМ РАЙОНИРОВАНИИ ЧЕРНОСЛАНЦЕВЫХ КОМПЛЕКСОВ ЛЕНСКОЙ ЗОЛОТОРУДНОЙ ПРОВИНЦИИ

А.Л.Галямов, В.Д.Конкин (ЦНИГРИ Роснедра Минприроды России)

На примере Ленской золоторудной провинции рассмотрены возможности применения ГИС-технологий при прогнозно-металлогеническом районировании, оценке золотоносности и выделении площадей, перспективных на выявление новых месторождений. При использовании базовых принципов прогнозно-металлогенических построений выделены структурно-формационные и металлогенические таксоны, ранжированные по потенциальной перспективности.

Ключевые слова: черносланцевые формации, рудоконтролирующие факторы, прогнозирование, ГИС-технологии, логико-статистические методы.

Галямов Андрей Львович, Конкин Виктор Дмитриевич, metallogeny.tsnigri.ru

GIS TECHNIQUES APPROACH IN METALLOGENIC MAPPING OF BLACK SHALES IN LENSAYA GOLD-ORE PROVINCE

A.L.Galyamov, V.D.Konkin

The GIS methodology in metallogenic taxonomy mapping and potential gold evaluation are considered in case of Lenskaya gold-ore province. The principal metallogenic model elements for mapping and the basic requirements for gold-bearing black-shales of province are shown. Spatial data analysis and weight of evidence techniques applied for the potential ore districts dedication.

Key words: potential black shales, ore control, metallogenic model, GIS techniques, weight of evidence, spatial data analysis.

Современные технологии прогноза и поисков месторождений твердых полезных ископаемых опираются на комплексные прогнозно-поисковые модели металлогенических таксонов соподчиненного ряда: структурно-металлогеническая зона (структурно-формационная зона) – рудный район (структурно-формационная подзона с рудоносными и потенциально рудовмещающими формациями) – рудное поле (структурно-фациальный обособленный блок) – перспективный участок (площадь потенциального месторождения с прямыми косвенными признаками рудной минерализации) – рудное тело. В практике прогнозно-поисковых работ модели месторождений позволяют по геологическим ситуациям определять их возможное положение и оценивать скопления рудного вещества в форме качественных и количественных параметров прогнозных ресурсов.

Как показывает опыт разработки эталонных прогнозно-поисковых моделей металлогенических таксонов и их эквивалентов, перспективных на выявление золоторудных месторождений в черносланцевых терригенных комплексах, а также материалы по закономерностям размещения этих месторождений в золоторудных провинциях восточных регионов России, такие модели создаются на основе факторов — формационный и литолого-стратиграфический, структурно-тектонический и палеоструктурный, магматический, метасоматический и минералого-геохимический, геофизический. Эти факторы и признаки рудоносности разного масштаба обуславливают соответствующий набор методов их выявления, образующих в совокупности рациональный прогнозно-поисковый комплекс. Содержание прогнозно-поисковых комплексов для

золоторудных месторождений в терригенных и черносланцевых структурно-вещественных комплексах детально рассмотрено в соответствующих методических руководствах.

Перспективы выявления новых золоторудных объектов в ареалах распространения потенциально золотоносных углеродисто-терригенных толщ в значительной мере связаны с развитием технологии и методов поисков скрытого и слабоэродированного оруденения. При этом необходимо решить проблему интерпретации и оценки многочисленных геохимических аномалий, обнаруживаемых экспрессными малозатратными методами при площадных съемках, в развитии которых в последние годы достигнуты большие практические успехи.

Выполненные в ЦНИГРИ научно-методические исследования показали, что только комплексный подход к решению прогнозно-поисковых задач обеспечивает новый более высокий уровень достоверности прогнозных оценок, который достигается путем суммирования поисковых вкладов независимых групп критериев. Расширение круга «вещественных» индикаторов оруденения с охватом различных уровней организации вещества (породного, минерального, элементного, ионного, изотопного) возможно при комплексном исследовании околорудных метасоматических, минералогических и геохимических ореолов на основе современных аналитических методов и технологий. Такая методика использована при прогнозе и поисках золоторудных месторождений основных геолого-промышленных типов на золоторудных полях Байкало-Патомского, Северо-Байкальского, Енисейского и Центрально-Колымского регионов, Казахстана, Узбекистана, Урала и в ряде случаев способствовала выявлению новых перспективных площадей и вскрытию ранее неизвестных рудных тел.

Общие принципы осуществления прогнозно-металлогенических построений заложены в ходе мировой истории металлогенических исследований, а на современном этапе обобщены А.И.Кривцовым [7] и Е.Хаммербеком [16]. С их помощью используются различные варианты совместного анализа информационных слоев (карт), характеризующих собственно геологическую среду, ее рудоносность и физические характеристики. Основное требование к современным прогнозно-металлогеническим построениям — обеспечение воспроизводимости их результатов, поскольку от этого зависит уровень достоверности прогнозных оценок, определяющих целесообразность постановки ГРП и их очередность. Воспроизводимость построений достигается, прежде всего, за счет использования непосредственно наблюдаемых геологических факторов, совокуп-

ность которых составляет закономерности размещения месторождений в исследуемой геологической среде. Такого рода закономерности, выражаемые комплексом элементов-признаков (характеристик) установлены на достаточно хорошо изученных площадях с выявленными месторождениями. Прогнозно-поисковые модели последних характеризуют эталонные или типовые металлогенические таксоны, которые обладают комплексом выявленных характеристик и признаков, составляющих прямое признаковое пространство. С другой стороны, геофизическими, геохимическими и другими вспомогательными методами выявляется широкий спектр дополнительных характеристик, прогнозно-металлогеническое значение которых может оцениваться через отражение рудоносных обстановок в соответствующих геофизических и геохимических полях и их структурных элементах. Соответственно, на площадях, располагающихся за пределами типовых металлогенических обстановок, выделяются признаки, фиксирующие рудоносность последних, а также участки с характеристиками, для которых обосновано совпадение с теми или иными признаками рудоносности, т.е. их отражение.

Все выявленные элементы признакового пространства провинций сводятся на карте прогнозно-поисковых признаков. При этом должна обеспечиваться сходимость структурно-формационных и металлогенических границ. Целям построений отвечает ограниченное число такого рода сочетаний, выбираемых по принципу: наблюдаемые геологические и металлогенические характеристики — оценка их возможного отражения в различных «слоях» карты. По полноте выраженности прогнозно-поисковых признаков выделяются структурно-вещественные таксоны (формации, зоны, подзоны внутри зон, потенциальные рудные районы) различной перспективности — перспективные, потенциально перспективные, возможно перспективные, с неясными перспективами, что в принципе отвечает очередности геолого-поискового освоения.

В основе использования принципов металлогенических построений лежит изображение геологических объектов в виде моделей. Геологические объекты, как и другие объекты материального мира, представляют собой систему взаимодействующих более мелких подсистем, обладающих некими свойствами, изменяющимися при взаимодействии, а также в результате воздействия внешних факторов на систему в целом. Единство состава и структурная общность определяют целостность системы.

Фундаментальная особенность геологической среды заключается в иерархической простран-

ственной структурированности. Наиболее полная характеристика объектов выявляется при изучении структурированных свойств объекта и моделировании взаимоотношений его элементов между собой и с окружающей средой. Сложный состав и многообразие свойств моделируемых геологических объектов, обусловленные процессами их возникновения и эволюции, определяют необходимость анализа процессов взаимодействия составных элементов объектов во времени и пространстве. В основе такого анализа лежат фундаментальные научные закономерности, законы логики и статистики, а результаты отражаются в моделях объекта в виде формализованных семантических и математических выражений. Существует ряд методов формализации процессов взаимосвязи элементов модели объекта. Среди них наиболее распространены методы фактов и правил, логики предикатов, нейро- и семантических сетей. Все они основываются на анализе пространственных данных с использованием сетевых технологий. Созданные таким образом модели относятся к экспертным и интеллектуальным системам.

При компьютерном анализе картографической информации применяются, как правило, ГИС-технологии. В их основе — возможность непосредственного управления пространственными базами данных, разветвленные механизмы их начальной обработки. Применение ГИС позволяет анализировать важное свойство объектов — их пространственные связи с другими объектами и на этой основе использовать в прогнозно-металлогеническом районировании. Основное средство компьютерных технологий районирования — выявление закономерных пространственных соотношений элементов моделей металлогенических обстановок, выделение областей их благоприятного сочетания и оконтуривание новых площадей, перспективных для обнаружения месторождений того или иного рудно-формационного типа.

Одним из подходов при анализе, изучении и моделировании металлогенических обстановок является применение логико-статистических пакетов определения закономерностей размещения рудных объектов в связи с различными геологическими факторами — вмещающими породами, структурными формами геологических тел, тектоническими нарушениями, наложенными гидротермальными изменениями и др. Впервые этот подход к решению оценки потенциальной рудоносности продемонстрирован в публикациях Геологической службы Канады [15]. В них описывается новый методологический подход к составлению карт перспективной рудоносности путем логико-статисти-

ческого пространственного сопоставления геологических, геофизических и геохимических данных. Методика основана на статистических расчетах, разработанных для решения задач диагностики в медицине [18]. Новое направление позднее использовалось для прогнозирования массивных сульфидных руд в районе Абитибиды [14], золота Новой Шотландии [14], месторождений типа Куроко [17]. При этом используются различные методические модели (признаковой значимости, вероятностная, нечеткой логики и др.). В настоящее время этим методом осуществляется выявление потенциальных рудоносных площадей в Австралии, Канаде, Южной Америке, Южной Корее, Иране и Китае (материалы 32-го МКГ).

На примере анализа с применением ГИС-технологии разномасштабных геологических, структурно-формационных, геохимических и геофизических карт, а также данных специализированного дешифрирования космоснимков приведены прогнозно-металлогеническое районирование территории Ленской провинции, оценка перспектив потенциальной золотоносности отдельных рудных районов и площадей ранга рудных узлов.

Байкало-Патомская (Ленская) золотоносная провинция охватывает северную часть Байкальской складчатой области [4, 5, 10]. Основные структурные элементы провинции — Мамско-Бодайбинский и Патомский синклиналии, Олоkitский синклиналии, Витимо-Патомо-Нечерский антиклинорий, образованный Чуйским, Нечерским и Тонодским выступами докембрийского основания. Контуры провинции соответствуют границам развития рудоносных рифей-вендских углеродистых формаций. На востоке, севере и западе — это граница Байкальской складчатой области со структурами чехла Сибирской платформы. Южная граница проводится по северному фасу выходов гранитоидных батолитов, трассирующих зону Муйского (Байкало-Муйского) глубинного разлома, прослеживающегося от северного окончания оз. Байкал до северного фланга архейско-протерозойской Муйской глыбы.

В рифейский период территория Ленской провинции была представлена активной окраиной Сибирского палеоконтинента восточно-азиатского типа [8, 11]. Здесь формировались терригенные и карбонатно-терригенные структурно-вещественные комплексы мелководного внешнего (Прибайкало-Патомского прогиба) и внутреннего (Мамско-Бодайбинского прогиба) шельфов палеоконтинента и отложения разделяющей их Чуйско-Тонодско-Нечерской зоны внутренних палеоподнятий — вулканы основного-среднего и реже кислого состава.

вов, железистые кварциты, песчано-алевролитоглинистые осадки. Терригенные обломочные фации, слагающие склоны поднятий, к югу замещаются мощными толщами флишевых карбонатно-терригенных и терригенных формаций внешнего шельфа, переходящими вблизи южной границы провинции в турбидитные фации.

Золотоносные черносланцевые структурно-вещественные комплексы формировались в осадочном бассейне в обстановках прогибов на шельфе и склоне континентальной окраины от раннего протерозоя до позднего рифея–венда включительно с унаследованными режимами осадконакопления. Рифтовые структуры в основании прогибов на Тонодском и Чуйском поднятиях и в основании Бодайбинского синклинория проявлены в распределении фаций нижнерифейских вулканогенных отложений [3–5, 11]. Золоторудная минерализация наиболее широко развита в центральных и южных частях надрифтового прогиба в относительно глубоководном сегменте морского бассейна к югу от предполагаемой его внешней шельфовой зоны в полосе Чуйско-Тонодской дуги поднятий.

Интрузивно-вулканогенные комплексы, распространённые южнее провинции, относятся к реликтам предполагаемой рифейской энсиматической океанической коры. Комплекс, протягивающийся от Северо-Муйской и Южно-Муйской архей-протерозойских глыб к северному окончанию оз. Байкал, рассматривается одними геологами как рифтогенный [11], а другими как островодужный [12].

В позднем венде – раннем палеозое толщи провинции испытали региональный метаморфизм и складчатость. Региональный метаморфизм пород Бодайбинского и Олоkitского прогибов по изотопным датировкам фиксируется в интервале 625–520 млн. лет [6]. Осадочные породы зонально метаморфизованы, степень метаморфизма изменяется от низов зеленосланцевой до высокой амфиболитовой фации. В зонах высокотемпературных фаций формировались гранитогнейсовые купола. В процессе позднепалеозойской тектономагматической активизации рифей-вендские отложения были прорваны позднепалеозойскими гранитоидами.

Накопление золотоносных углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных пород в провинции завершилось во второй половине венд-кембрийского времени, когда активная континентальная окраина восточно-азиатского типа прекратила свое существование. В северном Прибайкалье, в том числе и на территории Олоkitского прогиба, в межгорных прогибах накапливались мощные молласоидные терригенные и карбонатные толщи, а в

Бодайбинском прогибе — платформенные терригенно-карбонатные и карбонатные осадки.

В пределах золотоносной провинции известно уникальное по масштабам золото-рудное месторождение Сухой Лог, а также несколько крупных месторождений — Чертово Корято, Невское, Голец Высочайший и др. Они относятся к золото-сульфидной мышьяковистой, золото-сульфидно-кварцевой жильно-прожилковой и золото-кварцево-рудной формациям.

Золоторудная минерализация в промышленных масштабах наиболее широко развита в пределах Бодайбинского синклинория, где она охватывает средне-верхнерифейские и вендские отложения разреза синклинория. За его пределами на Чуйско-Нечерском поднятии рудные проявления золота известны в нижнепротерозойских черносланцевых толщах (месторождения Чертово Корято и Юбилейное в михайловской свите), а также в нижнерифейской терригенной конгломерат-песчаниковой с фациями андезито-базальтов, их туфов и железистых кварцитов формации (жильное золото-кварцевое проявление Водораздельное).

Структурно-формационное районирование Ленской провинции базируется на анализе размещения и структурной позиции различных формационных комплексов, среди которых выделяются архейско-раннепротерозойский метаморфический комплекс основания и геологические формации верхней части архейско-раннепротерозойского фундамента. Они участвуют в строении двух мегазон, различающихся по геодинамическим режимам формирования и вещественному выполнению. Первая из них, развивавшаяся в режиме пассивной континентальной окраины и захватившая почти всю территорию провинции, характеризуется накоплением преимущественно флишеидных углеродсодержащих осадочных пород. Плутоногенные комплексы включают гранитоидные, базитовые, ультрабазит-базитовые и перидотит-долеритовую формации. Вторая мегазона, расположенная на юго-западном фланге провинции, представляет краевой вулканоплутонический пояс (Акитканский ВПП), в строении которого, наряду с осадочными породами, значительную роль играют эффузивные и пирокластические образования. Ареалы распространения вмещающих стратифицированных и интрузивных комплексов, слагающих Чуйско-Тонодский, Нечерский и Акитканский выступы, Байкало-Патомский, Мамско-Бодайбинский и Олоkitский синклинории, определяют контуры структурно-формационных зон и подзон.

По пространственным сочетаниям ареалов размещения вертикально-латеральных рядов геологи-

ческих формаций в современном структурно-тектоническом плане строения Ленской провинции выделены типовые структурно-формационные комплексы [2]: сочетание цокольных комплексов архея – раннего протерозоя и обрамляющих их выходы рудовмещающих формаций, а также их остаточных покровов на цоколе и в провесах кровли в условиях интенсивного проявления гранитоидного магматизма; преобладание рифейских углеродосодержащих флишоидных туфогенно-карбонатно-сланцевых, углеродсодержащих карбонатно-песчано-сланцевых и вулканогенно-карбонатно-сланцевых формаций с отдельными выступами метаморфического цоколя, сопровождаемых широким проявлением гранитоидного магматизма; существенное преобладание терригенных углеродсодержащих формаций при редуцированном проявлении гранитоидного магматизма.

При совмещении выделенных ареальных областей выявляются их типовые сочетания (рис. 1*): 1) архей-раннепротерозойское основание; 2) нижнепротерозойские стратифицированные и вулканогенные формации; 3) гранитоидные комплексы; на архей-раннепротерозойском основании — 4) редуцированные комплексы рудовмещающих формаций, 5) совмещенные гранитоидные комплексы и редуцированные стратифицированные формации, 6) совмещенные стратифицированные формации и отдельные интрузивные ареалы, 7) гранитоидные комплексы. При этом учитываются степень развития и направления складчато-разрывных нарушений, а также строение гравитационного и магнитного полей. Методом последовательной генерализации структурно-формационных сочетаний выделяются площади, отвечающие рангу структурно-формационных подзон, а при дальнейшем обобщении подзоны с преобладанием комплекса того или иного типа объединяются в крупные области, отвечающих рангу структурно-формационных зон.

В соответствии с особенностями геологического строения и размещения геологических формаций выделены структурно-формационные зоны (подзоны): Прибайкало-Патомская (Западно-Прибайкальская, Патомская); Аkitканская; Чуйско-Тонодско-Нечерская (Абчада-Даванская, или Кутимская, Чуйская, Тонодская, Бугарихтинская, Малопатомская, Жуинская, Нечерская); Мамско-Бодайбинская (Неручандинская, Олокито-Мамская, Большечуйская, Мариинская, Хайвергинская, Бодайбинская, Анангская, Маракано-Тунгусская, Хомолхинская, Витимская).

Пространственное совмещение структурно-формационной основы и ареалов проявлений золоторудной минерализации позволяет установить общую металлогеническую специализацию формационных таксонов и выделить среди них собственно золотоносные (рис. 2), что составляет основу металлогенического районирования. В пределах последних определяются пространственные закономерности размещения месторождений и рудопроявлений золота и их приуроченность к тем или иным структурно-формационным элементам с учетом минералого-геохимических типов руд и преобладающей морфологии рудных тел. В итоге структурно-формационные таксоны получают комплексную характеристику наблюдаемого рудоносного признакового пространства, те или иные элементы которого должны выделяться на новых (оцениваемых) площадях.

В качестве эталонов для определения продуктивности металлогенических подзон рассматриваются таксоны с выявленными месторождениями. Продуктивность эталонных таксонов рассчитывалась на площадь распространения рудовмещающих и потенциально перспективных формаций, на которых проведены детальные поисковые работы и выявлены прямые признаки золотого оруденения. Оценка в пределах остальных подзон проводилась с учетом сходства с эталоном по площадям продуктивных формаций. Сходство оцениваемых металлогенических подзон и районов с эталонным таксоном, выраженное в величине понижающих коэффициентов, определялось в сравнении с эталонными признаками.

Золотоносный потенциал металлогенических таксонов Ленской провинции в значительной мере определяется их формационным сходством с толщами, вмещающими крупные золоторудные месторождения — Сухой Лог, Вернинское, Чертово Корыто (рис. 3, а). Большое значение имеют признаки, широко распространенные на площади, — флишоидность, углеродистость, чередование карбонатно-глинистых слоев и песчаных разностей, а также наличие органических остатков. Немаловажным признаком служит и морфологическое сходство с рудовмещающими складчатными и разрывными формами.

Для оценки перспектив золотоносности важна полнота комплекса признаков коренной и экзогенной золотоносности терригенных комплексов. Золоторудная минерализация в Ленской провинции, вскрытая на эрозионной поверхности, посто-

* Рис. 1–4 см. цветную вкладку.

янно сопровождается шлиховыми и вторичными геохимическими ореолами, а при относительно пологом рельефе и наличии кор выветривания — богатыми золотоносными россыпями. Наиболее насыщены аномалиями Прибайкало-Патомская и Мамско-Бодайбинская зоны. В Прибайкало-Патомской зоне сосредоточены преимущественно аномалии золота, которые к флангам зоны приобретают золото-полиметаллический (золото-серебро-полиметаллический) состав. Мамско-Бодайбинская зона включает золото-мышьяковые аномалии, которые с севера окаймляются преимущественно золотыми. На юго-западе зоны развиты медно-никелевые, никель-кобальтовые и медно-молибденовые аномалии.

По степени полноты комплекса выявленных признаков коренной и экзогенной золотоносности ареалы черносланцевых комплексов можно объединить в четыре группы (см. рис. 3, б):

с промышленными объектами, рудопроявлениями, точками минерализации и проявлениями экзогенной золотоносности (наиболее полный комплекс);

с рудопроявлениями, точками минерализации и проявлениями экзогенной золотоносности;

потенциально перспективные с точками минерализации и проявлениями экзогенной золотоносности;

потенциально перспективные с проявлениями экзогенной золотоносности.

При изучении региональной золотоносности и оценке ее потенциала важно на основе составления общей прогнозной модели учитывать роль совокупности рудоконтролирующих факторов, обусловивших длительность и стабильность накопления рудного вещества в терригенных толщах. К числу важных элементов-признаков прогнозно-поисковых моделей относятся те, которые вытекают из анализа условий формирования рудовмещающих терригенных и черносланцевых формаций, длительности их накопления и преобразования на стадиях диагенеза и катагенеза, а также наложенных процессов. К числу элементов-признаков также относятся геофизические поля, парагенные ассоциации складчато-разрывных структур, геохимические аномалии, геохимические свойства пород, продуктивные минеральные ассоциации, россыпная золотоносность.

Рудовмещающие терригенные черносланцевые толщи относятся к двум группам геологических формаций — терригенным и карбонатно-терригенным углеродсодержащим флишоидным (черносланцевым), вулканогенно(туфогенно)-карбонатно-терригенным углеродсодержащим. В региональном плане литологический контроль проявлен в локали-

зации золоторудной минерализации преимущественно в карбонатно-терригенных и терригенных формациях с неоднородным строением разреза и широким развитием бурошпатовой минерализации. Определены основные стратиграфические уровни развития геологических формаций, в которых локализована большая часть обнаруженных в провинции месторождений и проявлений коренного золота:

терригенная сланцево-алевролитопесчаниковая догалдынской свиты венда, вмещающая месторождения Догалдынская жила, Ожерелье, Копыловское золото-кварцевой и золото-сульфидно-кварцевой жильно-прожилковой рудных формаций; аунакитская свита верхнего рифея с Ыканским месторождением золото-сульфидно-кварцевой жильно-прожилковой рудной формации, Вернинским и Невским месторождениями золото-сульфидной мышьяковистой рудной формации;

терригенно-известняковая алевролитосланцевая имнянской свиты верхнего рифея с Мараканским золото-кварцевым месторождением, Светловским золото-сульфидным мышьяковистым рудопроявлением в угаханской свите и Петровским золото-сульфидно-кварцевым рудопроявлением в баракунской свите среднего рифея в Патомской структурно-формационной зоне;

флишоидная терригенная песчано-алевролитосланцевая хомолхинской и перекрывающей ее имнянской свит среднего-верхнего рифея, вмещающая месторождения Сухой Лог и Голец Высочайший золото-сульфидной мышьяковистой рудной формации;

флишоидная терригенная сланцево-песчаниковая бугарихтинской и хайвергинской свит среднего рифея с Хорлухтаским и Петровским золото-кварцевыми рудопроявлениями;

флишоидная терригенная песчано-алевролитосланцевая, вмещающая золото-сульфидно-кварцевое месторождение Чертово Корыто, выделяется также на нижнепротерозойском уровне в Чуйско-Нечерской структурно-формационной зоне.

Золоторудная минерализация контролируется зонами повышенного рассланцевания и напряженной складчатости сжатия. Наиболее благоприятны те узлы напряженной складчатости, нагнетания и флексуобразных изгибов, которые находятся в местах пересечений и сопряжений глубинных зон повышенной проницаемости. Эти зоны не всегда четко фиксируются, тем не менее при детальном наблюдении их можно установить. Весьма благоприятны места изгибов и кручений осевых поверхностей складок.

Связь размещения золоторудной минерализации и проявлений гранитоидного магматизма

неотчетлива. На площади золоторудных проявлений Мамско-Бодайбинской структурно-формационной зоны известны отдельные выходы гранитоидов (Константиновский шток, Джегдокарский массив), а также предполагаются скрытые на глубине интрузивные тела [9].

Золотая минерализация по-разному проявлена в породах, метаморфизованных в различной степени. В зонах зеленосланцевого метаморфизма золото присутствует в виде тонкорассеянных пленочных и древовидных выделений в породах, первичная структура которых большей частью сохранена (Сухой Лог). В зонах амфиболитовой фации, где в породах первичная структура практически не сохранилась, наряду с тонкорассеянным золотом чаще встречаются крупные включения золота в жильном кварце (Ожерелье, Ыканское). Близость к кровле метаморфизованных и гранитизированных комплексов архей-раннепротерозойского фундамента также влияет на локализацию золоторудных объектов.

Важное значение имеет анализ геохимической специализации породных комплексов [1] в различных структурно-формационных зонах. Для провинции отмечается смена с севера на юг геохимического облика формаций от лито-сидеро-халькофильного через лито-халькофильный к преимущественно литофильному (С.Д.Шер, Е.А.Зверева и др., 1984). Породные комплексы Прибайкало-Патомской зоны характеризуются повышенными кларками Ti, Fe, Mn, Cr, а также Pb, Zn, Cu. Мамско-Бодайбинская зона характеризуется редкометалльно-полиметаллической специализацией (Sn, W, Pb, Zn, Cu, Mo). При этом золоторудные проявления преобладают в породах с повышенным фоном сидерофильных элементов.

Территория Ленской провинции в региональном плане характеризуется гетерогенным гравитационным и магнитным полями. Пространственная зависимость распространения золоторудной минерализации от геофизических аномалий не выявлена. При этом в структуре полей отчетливо отражается общее блоковое строение провинции. Глубинное строение Мамско-Бодайбинской зоны по геофизическим свойствам характеризуется преимущественно умеренной ролью гранитоидов в строении земной коры. Выделяются крупные неоднородности в земной коре — глубинные магматические породы (габброидов и гипербазитов), сгруппированные в зоне северо-восточного простирания, прослеживающейся до долины р. Лена [10].

Линеаментные признаки на территории Ленской провинции, проявленные на космоснимках, в основном повторяют направления тектониче-

ских швов, отделяющих области архей-раннепротерозойского основания от перекрывающего рифей-вендского складчатого чехла. Фиксируются также поперечные линеаменты. Большинство линеаментов, выделенных на дистанционной основе, отражены на геологической карте.

Для выявления перспективных на золото площадей, наиболее сходных с эталонными по совокупности геологических, геохимических и геофизических признаков, кроме общепринятых, использовался логико-статистический метод определения сходства с эталонной площадью [15]. В качестве признаков рассматривается совокупность геологических данных, а основная гипотеза содержит предположение, что участок с обнаруженным рудным объектом благоприятен для формирования объектов этого типа. Признаки оцениваются исходя из ассоциативной пространственной связи известных рудопроявлений и конкретных характеристик вмещающей среды. Будучи сходным с методом множественной регрессии в статистике, метод включает оценку соответствия потенциальной рудоносности и набор поисковых данных.

Из всего комплекса геологических, геохимических и геофизических признаков выделены три группы, с которыми пространственно связаны золоторудные проявления (рис. 4, а): формационные, геохимические, метаморфические; структурные; магматические. В первую группу входят ареалы рудовмещающих формаций и основания, их состав, углеродистость, геохимические ореолы, сидерофильность, халькофильность, ареалы фаций регионального метаморфизма. Во вторую — расстояние от зон главных разрывов, осей основных антиклиналей и синклиналей, в третью — ареалы распространения интрузивных тел, расстояние от выходов гранитоидных тел и областей скрытых массивов. При этом признаки коренной и экзогенной золотоносности играют важную роль при выделении новых и уточнении имеющихся потенциально перспективных площадей.

При совмещении групп признаков выделяются площади, ранжированные по значимости пространственной связи признаков с золоторудной минерализацией (см. рис. 4, б). В Мамско-Бодайбинской зоне располагаются наиболее перспективные Маракано-Тунгусская, Бодайбинская и Хомолхино-Патомская подзоны, в которых сосредоточены крупные золоторудные месторождения Сухой Лог, Вернинское и Голец Высочайший, сопровождающиеся мелкими месторождениями, множеством рудопроявлений и точек минерализации. Значительными перспективами по выявлению месторождений золота по формационному подобию и комп-

лексу признаков коренной и россыпной золотоносности с эталонной площадью месторождения Сухой Лог обладают фланги Маракано-Тунгусской, Бодайбинской подзон. В Тонодской подзоне Чуйско-Тонодско-Нечерской зоны в ареале рудопроявлений и точек минерализации залегает крупное золоторудное месторождение Чертово Корыто. Металлогенические подзоны Бодайбинская, Маракано-Тунгусская, Хомолхино-Патомская и Малопатомская рассматриваются в качестве рудных районов.

На остальных площадях в настоящее время вскрыты мелкие месторождения, рудопроявления, россыпи и другие признаки золотоносности, что позволило выделить около десятка перспективных площадей в ранге рудного узла. Общим для них является формационный состав — флишеидные углеродсодержащие карбонатно-сланцевые и песчано-карбонатно-сланцевые формации, а также полный комплекс установленных признаков коренной и экзогенной золотоносности. Ведущим прогнозируемым геолого-промышленным типом месторождений золота служит золото-сульфидный в черносланцевых толщах (эталон — рудные залежи месторождений Сухой Лог, Вернинско-Невского рудного поля и Чертово Корыто). Наиболее перспективными из них по формационному подобию и комплексу признаков коренной и россыпной золотоносности являются фланги Маракано-Тунгусской, Бодайбинской и Тонодской подзон, а также отдельные площади в Малопатомской, Жуинской, Олокиито-Мамской и восточной части Патомской подзон.

Для оценки потенциальной золотоносности целесообразно осуществить анализ сопредельных с провинцией территорий Байкало-Муйской провинции, в частности для «переходной зоны» от бассейнов с преимущественно терригенным осадконакоплением к терригенно-вулканогенным. В пределах этого региона вместе с потенциально рудовмещающими черносланцевыми комплексами, в которых залегают проявления золото-сульфидного и золото-кварцевого типа, широко развиты карбонатные и вулканогенные формации, вулканоплутонические ассоциации. Помимо известных жильных золото-кварцевых месторождений (эталон — месторождения Ирокиндо-Кедровского рудного узла) здесь могут быть выявлены золоторудные месторождения других рудно-формационных и геолого-промышленных типов, в том числе золото-(сульфидно)-кварцевого и золото-ртутного в карбонатных толщах (карлинский тип), золото-скарнового, золото-сульфидно-кварцевого и золото-кварцевого в породах вулканоплутонических ассоциаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Варгунина Н.П.* Региональные геохимические факторы золотоносности Енисейского края // Руды и металлы. 2008. № 1. С. 51–66.
2. *Галямов А.Л.* Золотоносные осадочные комплексы складчатого обрамления Сибирской платформы // Руды и металлы. 2010. № 1. С. 28–37.
3. *Геодинамические условия формирования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба / М.И.Кузьмин, В.В.Ярмолук, А.И.Спиридонов и др. // ДАН. 2006. Т. 407. № 6. С. 793–797.*
4. *Докембрий Патомского нагорья / А.И.Иванов, В.И.Лившиц, О.В.Перевалов и др. — М.: Недра, 1995.*
5. *Иванов А.И.* Золотоносность Байкало-Патомской металлогенической провинции: Автореф. дис... д-ра геол.-минер.наук. — М., 2010.
6. *Изотопный состав свинца и генезис Pb-Zn оруденения Олокиитской зоны Северного Прибайкалья / Л.А.Неймарк, Е.Ю.Рыцк, Б.М.Гороховский и др. // Геология рудных месторождений. 1991. № 6. С. 34–49.*
7. *Кривцов А.И.* Методические основы прогнозно-металлогенических построений // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2010. № 1. С. 45–48.
8. *Кулиш Е.А., Парада С.Г.* Гидротермально-осадочные образования в золотоносных черносланцевых комплексах // Доповіді Національної академії наук України. 2007. № 11. С. 112–118.
9. *Линшевский Э.Н., Дистлер В.В.* Глубинное строение земной коры района золото-платинового месторождения Сухой Лог по геолого-геофизическим данным (Восточная Сибирь, Россия) // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46. № 1. С. 88–104.
10. *Митрофанов Г.Л.* Тектонические закономерности размещения и формирования месторождений благородных металлов южного обрамления Сибирской платформы: Автореф. дис... д-ра геол.-минер.наук. — Новосибирск, 2006.
11. *Ручкин Г.В., Конкин В.Д.* Ряды рудных формаций терригенно-сланцевых складчатых поясов // Руды и металлы. 2002. № 1. С. 15–19.
12. *Северный сегмент палеоазиатского океана в неопротерозое: история седиментогенеза и геодинамическая интерпретация / А.М.Станевич, А.М.Мазукабзов, А.А.Постников и др. // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 1. С. 60–79.*
13. *Станевич А.М., Немеров В.К.* Условия накопления и корреляция толщ позднего рифея Байкальской горной области // Мат-лы 4-го регионального Уральского литологического совещания «Осадочные бассейны: закономерности строения и эволюции, минерагения». Екатеринбург, 2000.
14. *Agterberg F.P.* Systematic approach to dealing with uncertainty of geoscience information in mineral exploration // Proc. 21st APCOM Symposium (Application of Computers in the Mineral Industry) held in Las Vegas, March 1989. Soc. Mining Engineers, New York.

15. *Bonham-Carter G.F., Agterberg F.P., Wright D.F.* Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential; in *Statistical Applications in the Earth Sciences* / Ed. F.P. Agterberg, G.F. Bonham-Carter // Geological Survey of Canada. 1989. Paper 89-9. P. 171-183.
16. *Hammerbeck Erik, Veselinovic-Williams Milica.* Status of metallogenic mapping in the world today — With special reference to the Digital Metallogenic Map of Africa // *Proceedings for a workshop on deposit modeling, mineral resource assessment, and their role in sustainable development.* U.S. Geological Survey Circular 1294. 2007.
17. *Singer D.A., Koda R.* Integrating spatial and frequency information in the search for Kuroko deposits of the Hokuroku District, Japan // *Econ. Geol.* 1988. Vol. 83. № 1. P. 18-29.
18. *Spiegelhalter D.J., Knill-Jones R.P.* Statistical and knowledge-based approaches to clinical decision-support systems, with an application in gastroenterology // *Jour. Royal Statist. Soc.* 1984. Vol. 147. Part. 1. P. 35-77.

