

*Н.А. Пуляев*

**ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕРРИТОРИЙ, СЛОЖЕННЫХ  
ГЛУБОКОМЕТАМОРФИЗОВАННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ,  
НА ОСНОВЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ  
(НА ПРИМЕРЕ СУТАМСКОГО БЛОКА АЛДАНО-СТАНОВОГО ЩИТА)**

Аннотация. Приводится краткая геологическая характеристика Алдано-Станового щита и актуальность выполненных геологических исследований. Дается обоснование выбора Сутамского блока как объекта исследования, степени его изученности и описание материалов, на основе которых проведены исследования на его территории. Изложены цель исследований выбранного объекта и задачи, последовательное решение которых позволило получить интересные результаты. Описаны исходные экспериментальные ретроспективные геохимические данные и приёмы формирования рабочих массивов, выборки и их оценка статистическими методами. Дается обоснование выбора программных средств, математических методов и технологической цепочки обработки массивов геохимических аналитических данных. Приведены результаты математической обработки геохимических данных и их интерпретации. Определены ведущие литолого-петрографические разности горных пород на территории Сутамского блока и их комплексы. Выявлены ведущие ассоциации химических элементов, отражающие геохимическую специализацию 11 опробованных литолого-петрохимических разностей горных пород. Предложена и обоснована схема расчленения метаморфических горных пород на формации и структурно-вещественные комплексы. На основе математических методов, реализованных в алгоритмах программ высокоэффективных автоматизированных систем, решающих задачи классификации геологических объектов по геохимическим данным, установлена принадлежность горных пород к формациям и структурно-вещественным комплексам. Установлена высокая сходимость выявленных математическими методами ассоциаций химических элементов с типоморфными, определенными для уже известных рудных объектов Сутамского блока. Выявлены высококонтрастные геохимические аномалии в литохимических потоках рассеяния химических элементов и их первичных ореолах. Установлена их геохимическая специализация, сопряженность со структурно-вещественными комплексами и связь с рудными объектами блока. Построены разными математическими методами цифровые модели прогнозно-геохимических карт. Результаты анализа построенных моделей геохимических полей позволили автору произвести переоценку территории Сутамского блока и определить новые перспективные участки на золото, полиметаллы, железо, медь, никель и целый ряд других полезных ископаемых.

*Ключевые слова:* Алдано-Становой щит, Сутамский блок, литолого-петрографические разности горных пород, химические элементы, литохимические потоки рассеяния, вторичные и первичные ореолы рассеяния, кларк концентрации, ассоциации, формации, структурно-вещественные комплексы, геохимическая специализация, металлогеническая специализация, геохимические поля, геохимические аномалии, перспективные участки, прогнозная оценка.

---

*ПУЛЯЕВ Николай Анатольевич* – к.г.-м.н., доцент ГРФ СВФУ им. М.К.Аммосова.

E-mail: pna-s-vfu@mail.ru

*PULIAEV Nikolay Anatolevich* – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Faculty of Geology and Survey, M.K. Ammosov North – Eastern Federal University.

E-mail: pna-s-vfu@mail.ru

*N.A. Pulyaev*

## **Forecast assessment of the areas presented by deep-metamorphic complexes basing on geochemical data: the case of Sutamskiy block, Aldan-Stanovoy shield**

Short geological description over of the Aldano-Stanovoi shield and actuality of the executed geological researches are brought. The ground of choice of Sutamskiy block is given as a research object, degrees of his studied and description of materials on the basis of that studies are undertaken on his territory. Expounded aim of researches of the chosen object and task, the successive decision of that allowed to get interesting results. Basic experimental retrospective geochemical data and receptions of forming of working arrays are described, selections and their estimation by statistical methods. The ground of choice of programmatic facilities, mathematical methods and technological chainlet of treatment of arrays of geochemical analytical data is given. Results over of the mathematical processing of geochemical data and their interpretation are brought. The leading lithologic-and-petrographic differences of mountain bre reflecting geochemical specialization 11 tested litologo-petrochemical differences of mountain breeds. The chart of dismemberment of metamorphizm mountain breeds is offered and reasonable on structures and structural-substational complexes. On the basis of the mathematical methods, realized in the algorithms of the programs of high-efficiency CASS, decision the tasks of classification of geological objects from geochemical data, belonging of mountain breeds is set to the structures and structural-substational complexes. High convergence of the associations of chemical elements educed by mathematical methods is set with typomorphic, certain for the already known ore objects of Sutamskiy block. High-contrast geochemical anomalies are educed in the litochimikal streams of dispersion of chemical ele digital models of prognosis-geochemical maps. Their geochemical specialization, attended with structural-substational complexes and connection, is set with the ore objects of block. Built by different mathematical methodseds are certain on territory of Sutamskiy block and their complexes. The leading associations of chemical elements are educed,

The results of analysis of the built models of the geochemical fields allowed to the author to produce the overvalue of territory of Sutamskiy of block and define new perspective areas on gold, polimetalliks, iron, copper, nickel and a number of other minerals.

*Keywords:* the Aldano-Stanovoy shield, Sutamaky block, lithologic-and-petrographic differences of mountain breeds, chemical elements, litochimikal streams of dispersion, secondary and primary halos of dispersion, clarke of concentration, association, structure, structural-substational complexes, geochemical specialization, metallogenik specialization, geochemical fields, geochemical anomalies, perspective areas, prognosis ments and their primary halos.

### **Введение**

Объектом исследования является часть территории Алдано-Станового щита (АСЩ), расположенная на юго-востоке Якутии площадью в 11402 км<sup>2</sup>. Эта площадь характеризуется значительным количеством мелких месторождений, рудопроявлений и геохимических аномалий на золото, никель, медь, железо, платину и другие полезные ископаемые. Крупных же рудных месторождений здесь до сих пор не открыто, несмотря на имеющиеся положительные предпосылки их обнаружения.

По результатам геохимического районирования, проведенного на ландшафтно-геохимической основе, территория относится к категории с весьма благоприятными условиями для изучения металлогении и проведения поисков рудных полезных ископаемых всеми геохимическими методами [1]. Несмотря на это, геохимическая изученность Сутамского блока и прилегающих площадей соответствует только масштабу 1:500 000 и мельче [2]. В связи с этим, прогнозная оценка их требует значительных уточнений. Наиболее эффективными геохимическими методами на таких территориях являются литохимические поиски по потокам и вторичным ореолам рассеяния химических элементов (ХЭ). Это подтверждено специализированными работами [3], в результате которых установлено, что потоки рассеяния большинства рудных ХЭ обладают достаточной интенсивностью и довольно четкой пространственной приуроченностью к рудным

объектам, за счет которых они образованы. Геохимические методы поисков сравнительно недороги, позволяют получить значительный объем достоверной и сопоставимой информации и, в комплексе с математическими методами, обеспечивают с достаточно высокой вероятностью прогнозную оценку изучаемых площадей.

Анализ выполненных геохимических исследований на юге АСЦ показал, что на этой территории был отобран большой объем геохимических проб. Результаты анализов этих проб обрабатывались на ЭВМ в 80-х годах прошлого века с применением ограниченного числа математических методов, реализованных в алгоритмах программ, имевших много ограничений и которые морально устарели. Выяснилось, что проведено мало работ по изучению геохимических особенностей конкретных рудоносных площадей (провинций, районов, зон и т.п.), посвященных вопросам закономерности распределения во времени и в пространстве определенных парагенетических ассоциаций ХЭ и отдельных элементов в геологических формациях и структурно-вещественных комплексах (СВК).

Учитывая изложенные факты, автор выбрал территорию Сутамского блока с целью апробирования новых приемов комплексного геохимического изучения с применением высокопроизводительных компьютерных технологий и ретроспективных аналитических геохимических данных (РАГД).

Предполагалось на основе современных методов обработки РАГД выполнить прогнозную оценку территории блока на рудные полезные ископаемые (золото и ряд других), определить эффективность геохимических методов при поисках рудных месторождений на площадях со сложным геологическим строением и попытку создания альтернативной модели геохимической основы для ГСР-200 (Госгеолкарты-200). Для достижения цели решался следующий комплекс задач:

1. На примере Сутамского блока, апробировать методику формирования базы РАГД массовых площадных видов геохимического опробования, полученных в течение нескольких лет в разных лабораториях.
2. Изучить и выбрать программные средства для комплексного анализа созданной базы РАГД. Определить круг математических методов для конструирования цифровых моделей прогнозных геохимических карт.
3. По результатам математической обработки РАГД, определить геохимическую специализацию магматических, метаморфических и терригенных разностей горных пород, развитых на исследуемой территории, их формаций и структурно-вещественных комплексов.
4. Выявить локализацию новых перспективных геохимических аномалий на территории Сутамского блока, путем применения современных методов математического моделирования геохимических полей и определить их геохимическую специализацию.
5. Сделать анализ пространственного расположения аномальных геохимических полей и провести новое геохимическое районирование территории с выделением локальных геохимических подразделений, выявить рудоконтролирующие факторы, закономерности распределения и геохимические критерии для поисков таких полезных ископаемых как золото и никель.
6. Выявить перспективные объекты и сделать новую прогнозную оценку исследуемой территории на золото и ряд других металлов.

В основу исследований положены полевые наблюдения автора, результаты комплексной автоматизированной обработки РАГД 3644 проб коренных пород и 12968 литохимических проб из потоков рассеяния ХЭ.

#### **Геологическая характеристика объекта**

Сутамский блок находится в зоне сочленения Алданского и Станового мегаблоков, являющийся составной частью Алдано-Становой щита. Площадь блока около 8 тысяч км<sup>2</sup>. Изучение геологического строения Сутамский блока, геохимических и металлогенических особенностей слагающих его горных пород, способствуют решению многих задач, имеющих практическое значение для экономики региона и Республики Саха (Якутия). Географически блок расположен между реками Гонам и Сутам, берущими начало в северных отрогах Станового хребта.

В геологическом строении территории блока принимают участие архейские и нижнепротерозойские метаморфические, ранне- и позднеархейские, раннепротерозойские, раннерифейские,

позднеюрские и раннемеловые интрузивные и юрские терригенные горные породы. Блок сложен преимущественно парапородами, гнейсами и кристаллическими сланцами, являющимися, в большинстве случаев, мигматитами, с анатектоидным, жильным материалом. Тектоническое строение блока довольно сложное и понимается геологами неоднозначно. Но большинством геологов признается тектоническая схема, в которой структуры блока понимаются как сочетание ряда антиклинальных и синклинальных структур северо-западного простирания [4].

Сутамский блок и примыкающая к нему с запада территория являются частью Алдано-Становой полихронной металлогенической провинции и охватывают Сутамский и восточную часть Верхне-Тимптонского золотоносных районов, Гувилгринский золотоносный узел, Верхне-Сутамскую и Верхне-Гонамскую золотоносные площади, Сутамский железорудный район. В пределах блока в разное время выявлены месторождения железа, а также рудопроявления золота, полиметаллов, платины, молибдена, титана, железа, редких земель и радиоактивных элементов, каменного угля, флогопита, графита и промышленные россыпи золота.

#### **Последовательность и методика исследования**

РАГД разных лет и лабораторий собраны, структурированы и объединены в единую базу фактографических геохимических данных [2]. Формирование выборок анализов проб, для геохимической характеристики литолого-петрографических разновидностей пород и их формаций, выполнено с применением специально созданного программного комплекса, включенного в блок сервисных программ АС GEORUN, что обеспечило функционирование созданной БД и существенно улучшило сервисное обслуживание в системе.

Осуществлен пересчет условных координат точек отбора геохимических проб в координаты трех систем (Декартовую, Гаусса-Крюгера, географическую), что дало возможность произвести полистную обработку данных и корректно осуществить моделирование карт геохимических полей.

Комплексный статистический анализ содержаний ХЭ в коренных и рыхлых образованиях, с определением их геохимической специализации и апробирование технологий конструирования цифровых моделей карт геохимических полей, осуществлены с применением автоматизированных систем GEORUN, GEOSCAN, АСОИ-МП, Surfer, CorelDraw.

Территория Сутамского блока рассматривалась нами как участок геохимического поля некоторого сложного геологического образования, в котором наряду с фоновыми ассоциациями ХЭ могут быть зафиксированы и аномальные, рассматриваемые в качестве сигнала о вероятном наличии оруденения на глубине (рудных тел, перекрытых рыхлыми отложениями или не вскрытых эрозионными процессами). Под вероятностью наличия оруденения на глубине подразумевается степень возможности этого события. Привлечение теоретико-вероятностного математического аппарата для прогнозной оценки такой вероятности, оправдывается выборочным методом опробования территории (с заданным шагом отбора проб из потоков рассеяния либо сети при опробовании вторичных ореолов, в обоих случаях с обязательной привязкой места отбора проб). Прогноз типа, масштаба и местоположения возможного оруденения предполагается сделать лишь после изучения зависимости распределения ХЭ от пространственных координат (интерпретация результатов моделирования геохимических полей методами: сеток, скользящего окна, локальной аппроксимации различными формами статистических окон или ячеек, тренд-анализ), когда будет выявлена однозначная связь между какой-то характеристикой (вычисленной по наблюдаемым геохимическим данным) и типом оруденения, его масштабом, а также уровнем эрозионного среза (по заданным геохимическим показателям и их отношениям).

Таким образом, наличие нового оруденения на выбранном объекте предполагалось установить путем апробирования ряда приемов комплексного геохимического изучения с применением компьютерных технологий и РАГД.

В качестве исходного экспериментального материала применены измеренные значения содержаний ХЭ РАГД в пробах, которые отбирались в разные годы в фиксированных точках исследуемой территории, при проведении геохимических поисков с применением литохимического опробования вторичных ореолов и потоков рассеяния ХЭ. В геологических исследованиях обычной графической формой представления исходных точек отбора проб является проекция их на некоторую ограниченную плоскость (план или разрез). Таким образом, выбранный

экспериментальный материал является выборочной характеристикой, своеобразным каркасом скалярного поля изменчивости исследуемого набора (генеральной или выборочной совокупности) содержаний ХЭ в декартовых (или других) координатах геометрического пространства (например, в виде карт-разносок, моноэлементных или комплексных моделей геохимических карт, карт перспективных аномальных геохимических полей и др.).

В качестве априорной информации послужила геолого-геохимическая характеристика исследуемой территории, которая была взята из геологических отчетов и информационных записок, опубликованных материалов [5,6,7,8,9]. Методика проведенных исследований включала несколько этапов. В рамках каждого этапа выполнялись необходимые процедуры и методические приемы для решения следующих конкретных задач.

1. Сбор материалов по Сутамскому блоку: просмотр геологических отчетов, анализ геохимической изученности и графических материалов, определение объемов ретроспективных геохимических аналитических данных по видам геохимического опробования. Определялась доступность, возможность и целесообразность их математической обработки.

2. Определение качества собранных аналитических данных математическими методами, путем количественной оценки аналитических данных (определение случайных и систематических погрешностей в анализах геохимических проб, оценка воспроизводимости спектрального полуколичественного анализа (СПА) и др.). Выбор базовой системы координат и привязка к ней пунктов отбора всех проб, результаты анализов, которых вовлечены в процесс математической обработки. Объединение ретроспективных аналитических данных в рабочие массивы, с учетом лабораторных и других факторов, аналитических данных разных лет и лабораторий по литохимическому и бриогеохимическому опробованию потоков рассеяния ХЭ.

3. Структурирование аналитических данных и формирование универсальной базы данных (БД).

4. С применением программ сервисного обслуживания автоматизированной системы GEORUN производилось кодирование геохимических проб и формирование выборок для расчета статистических характеристик распределения ХЭ в литолого-петрографических разностях горных пород, развитых на территории Сутамского блока, их формаций и структурно-вещественных комплексах (СВК). Оценка корректности полученных статистических характеристик распределения химических элементов (ХЭ) производилась с применением статистических критериев Стьюдента, Фишера, Родинона. По совокупности геохимических характеристик определены математические законы распределения и сделан выбор априорной их модели для дальнейшей математической обработки РАГД. Определение минимально аномальных и фоновых значений содержаний ХЭ выполнено по методике А.П. Соловова [10].

5. С применением высокоэффективных математических методов выявлены ведущие рудные ассоциации в литолого-петрографических разностях горных пород, их формациях и СВК. Анализ внутренних структур ассоциаций в этих образованиях и определение их геохимической специализации сделаны по методике предложенной А.А. Смысловым [11] с учетом значений кларков концентрации (КлК) ХЭ.

6. Определение характера распределения содержаний ХЭ на исследуемой территории выполнено с применением алгоритмов моделирования геохимических полей, реализованных в программах автоматизированных систем (АС) GEORUN, GEOSCAN, АСОГИ-МП, путем построения и анализа многовариантных моделей геохимических карт: моноэлементных, ассоциаций (мультипликативных, аддитивных геохимических показателей, классов-ассоциаций, карт факторов, поверхности тренда разных порядков с картированием остатков тренда и др.). Сделан сравнительный анализ моделей геохимических карт, построенных с применением разных алгоритмов моделирования и выбрана априорная модель, наилучшим образом отвечающая геологической ситуации на исследуемой территории.

### **Полученные результаты**

При большом многообразии минеральных парагенезисов горных пород, развитых на территории Сутамского блока, нами выделено 11 петрографических их разновидностей [2,9].

В процессе многолетнего изучения геологического строения АСЦ было установлено, что Сутамский блок сложен преимущественно парапородами, гнейсами и кристаллическими

сланцами, являющимися, в большинстве случаев, мигматитами, с анатектоидным, жильным материалом. При большом многообразии минеральных парагенезисов горных пород, выделяется небольшое число петрографических их разновидностей. К таковым относятся:

1. биотит-гранатовые гнейсы, плагиогнейсы и гранатовые гранулиты;
2. гиперстен-гранатовые и гранат-гиперстеновые гнейсы и плагиогнейсы;
3. гиперстеновые гнейсы и плагиогнейсы;
4. амфибол-гиперстеновые гнейсы с гранатом и без него;
5. амфиболовые гнейсы и плагиогнейсы с гранатом и без него;
6. амфибол-диопсидовые гнейсы, кристаллические сланцы, в том числе и гранатосодержащие;
7. диопсидовые гнейсы и кристаллические сланцы, нередко скаполит-содержащие;
8. кварциты мономинеральные и полевошпатовые, в том числе графит- или магнетитсодержащие;
9. двупироксеновые и амфибол-двупироксеновые плагиогнейсы и кристаллические сланцы;
10. мраморы, кальцифиры и известково-силикатные породы;
11. высокоглиноземистые, главным образом, силлиманит- и кордиеритсодержащие гнейсы и кристаллические сланцы.

По сонахождению этих 11 петрографических разновидностей горных пород на Сутамском блоке выявлены геологические тела (образования) разного возраста и химического состава. Геохимическая характеристика петрографических разновидностей горных пород и мера сходства между ними определены по ретроспективным анализам (химическому и спектральному) 3644 проб коренных пород с применением комплекса математических методов, включая: статистический анализ (расчет и анализ статистических характеристик, корреляционный, регрессионный и факторный анализы) и методы иерархической классификации (парагрупповой метод кластерного анализа, метод динамических групп, метод классов-ассоциаций). В результате выделено пять устойчивых ассоциаций горных пород (табл. 1).

Таблица 1

**Ведущие ассоциации горных пород**

Ассоциация	Литолого-петрографические разности пород
Первая	Кварциты, высокоглиноземистые гнейсы и кристаллические сланцы, биотит-гранатовые гнейсы, плагиогнейсы и гранулиты и гиперстенсодержащие их разности.
Вторая	Гиперстеновые гнейсы и плагиогнейсы.
Третья	Амфибол-гиперстеновые и двупироксеновые, амфибол-двупироксеновые гнейсы и плагиогнейсы.
Четвертая	Породы повышенной известковистости – амфиболовые, амфибол-диопсидовые и диопсидовые гнейсы и кристаллические сланцы.
Пятая	Мраморы и кальцифиры. По характеру связей эти породы также тяготеют к породам повышенной известковистости устойчивой ассоциации.

В геологических телах горные породы находятся в сонахождении как представители устойчивых ассоциаций пород, одна из которых часто является преобладающей, определяющей генетический тип каждого геологического тела. Подчиненные же представители устойчивых ассоциаций пород относятся к транзитивным, определяющим переходное состояние геологического тела. По однотипным и устойчивым ассоциациям геологические тела объединяются в формации, которые представляют собой сочетания тоже устойчивых ассоциаций пород и выделяются в структурно-вещественные комплексы (СВК). Таким образом, СВК это геологические образования, сложенные определенными комплексами минеральных масс с обособленным составом и строением парагенетических комплексов горных пород (формаций), обязанных своим образованием в определенном режиме и климатической обстановке, длительно проявляющимся в процессе эволюции земной коры. Эти геологические образования отличаются от смежных с ними значениями вещественных, структурных и петрофизических характеристик слагающих их пород и часто представляют практический интерес в металлогеническом плане.

При изучении материалов по Сутамскому блоку была принята модель расчленения его геологических образований на формационные типы, которые, на основе сходства ряда характеристик, объединены в СВК: Курультино-Гонамский, Иенгрский, Тимптоно-Джелтулинский, Олекмо-Становой [2,9].

По результатам анализов 3644 литохимических проб коренных пород, рассчитаны геохимические характеристики распределения содержаний 18 ХЭ. Интерпретация полученных результатов показала, что для территории Сутамского блока, учитывая статистические критерии оценки распределения содержаний ХЭ [12,13], в коренных породах и рыхлых образованиях отмечаются повышенные содержания 15 рудообразующих ХЭ. Рассчитанные для них коэффициенты концентрации варьируют в пределах 1,2-1,7. Этот факт свидетельствует о высоком металлогеническом потенциале исследуемой территории. Низкие значения коэффициентов концентрации характерны только для бора, иттрия и цинка. Анализ построенных гистограмм показал, что рассчитанные средние содержания для меди, кобальта, никеля, ванадия марганца, хрома и титана значительно превышают их кларки (по А.П. Виноградову). С применением корреляционного и факторного анализов выявлены рудные ассоциации ХЭ, определяющие геохимическую специализацию формаций горных пород, СВК и их металлоносность. Определение геохимической специализации комплексов проводилось по методике, предложенной А.А. Смысловым (1979) по значениям кларка концентрации (КлК) ХЭ. Под КлК понимается отношение средних содержаний ХЭ в пробах из геологических образований к их региональному кларку (в данном случае к средним содержаниям ХЭ, рассчитанным для АСЦ [1,14]). При значениях КлК 0,5-1,5 геохимическая специализация комплекса определена как кларковая. При КлК в пределах >1,5 – 2,5 геохимическая специализация комплекса определена как слабо специализированная, а при КлК >2,5 – как специализированная.

Таблица 2

**Геохимические комплексы и ведущие рудные ассоциации в коренных породах**

Название геохимического комплекса	Ведущая ассоциация ХЭ (специализация)	Принадлежность к формации
Специализированный литофильный	P, B, Ga, V, Cu, Pb, Co	Биотит-амфибол-гнейсовая, амфиболитовая фация
Специализированный сидеро-литофильный	P, B, V, Ti, Pb, Ga, Mn, Co	Метаморфизованная габбро-диабазовая
	P, Pb, Cr, Ni, Ga, B, Mn, Cu, V, Ti	Андезит-дацит риолитовая
	P, Cr, V, Ga, Ni, Cu, Pb, Mn, Ti	Песчано-конгломератовая
	V, B, Ga, Cr, Co, Ni	Базит-сланцево гранулитовая
Специализированный халько-литофильный	Ga, Ag, Pb, Mo, V	Песчаниковая молассоидная угленосная
	Pb, P, Ga, Ni, Sn, Ti, Cr, Mo	Алевролит-песчаниковая молассоидная, угленосная
Слабо специализированный сидеро-литофильный	P, V, B, Cr, Ti, Mn, Ni, Ga	Диорит-гранодиоритовая
	P, Ti	Песчаниковая молассоидная
Слабо специализированный литофильный	Ga, P	Мигматит-гранитовая
Слабо специализированный сидеро-халькофильный	Pb, Ge, Zn, Mn	Сланцево-гнейсовая, гранулитовая
	Pb, Ge, Zn, Ga, Ti, Mn, Ni, Cu	Сланцево-эндербитовая
Слабо специализированный халько-сидерофильный	V, Mn, Ti, Ga	Диафориты

Всего по коренным породам определено семь специализированных комплексов (табл. 2). Специализация комплексов выявлена по ведущим устойчивым ассоциациям ХЭ. В каждой ассоциации значения коэффициентов корреляции между ХЭ значимы и варьируют в пределах

0,4-0,9. Ранжирование ХЭ сделано по уменьшению коэффициентов корреляции и с учетом структуры взаимосвязи ХЭ в ассоциации, по графикам, отражающим графы корреляционной связи (круговым диаграммам, дендрограммам). Принадлежность комплексов к той или иной геологической формации определена с учетом главных статистических характеристик распределения ХЭ, в каждой опробованной литолого-петрографической разности пород.

Сопоставление выявленных ассоциаций с типоморфными, для известных на Сутамском блоке рудных образований, позволило, с достаточной высокой вероятностью, сделать прогноз на обнаружение новых проявлений золота, меди, никеля, железа.

По данным, приведенным в табл. 2 видно, что элементный состав геохимических ассоциаций позволяет сделать предположение о наличии на изученной территории новых рудных образований, специализированных на сидерофильную (ХЭ группы железа: Cr, Mn, Ti, V, Co, Ni) и халькофильную (Cu, Mo, Pb, Ag с Au) группы химических элементов.

В результате статистической обработки 12968 проб из литохимических потоков рассеяния ХЭ выделено 5 геохимических комплексов (табл. 3). Для всех геохимических комплексов установлена пространственная приуроченность к формациям и СВК. Отнесение их к тем или иным геологическим формациям выполнено с учетом сопряженности потоков рассеяния с коренными породами и по близости элементных составов ведущих ассоциаций [15].

Таблица 3

**Геохимические комплексы, выявленные по данным литохимического опробования потоков рассеяния ХЭ, их специализация и принадлежность к формациям**

№ п/п	Название геохимического комплекса	Ведущая ассоциация ХЭ (специализация)	Принадлежность к формации
1	Специализированный халько-сидерофильный	V, Mo, Ti, Cr, Co	Гнейсово-карбонатная, гранулитовая
		Mo, Co, Mn, Ni, Ti, V, Cr, Sn, Ga	Глиноземисто-гнейсово-кварцитовая, гранулитовая
2	Слабо специализированный сидеро-халькофильный	Mo, Cr, Ti, V, Cu	Андезит-дацит-риолитовая
3	Слабо специализированный халько-сидерофильный	Mo, V, Ti, Cr	Песчано-конгломератовая молассовая, гнейсово-гранулитовая, кварцито-гранат-гнейсовая гранулитовая
		Mo, Ti, V	Песчаниковая молассоидная угленосная, алевролитопесчаниковая молассоидная угленосная, биотит-амфибол-гнейсовая амфиболитовая
		Cr, Mo, V, Sn	Биотит-амфиболовая, амфиболитовая
		Mo, V, Ti, Cr, Ni	Сланцево-гнейсовая гранулитовая
		Cr, Mo	Гнейсово-гранулитовая
4	Слабо специализированный сидеро-литофильный	Mo, Ti	Диорит-гранодиоритовая
5	Слабо специализированный лито-сидерофильный	Ti, Mn, Ga	Метаморфизованная песчано-глинистая флишондная

Полученные результаты сопоставимы с данными таблицы 2. Элементный состав геохимических ассоциаций в литохимических потоках рассеяния близок с таковыми в первичных ореолах и подтверждает с большой вероятностью прогноз на изученной территории новых рудных образований, специализированных на сидерофильную (ХЭ группы железа: Cr, Mn, Ti, V, Co, Ni) и халькофильную (Cu, Mo, Pb, Ag с Au) группы химических элементов.

По сходству ведущих ХЭ установленные геологические формации можно объединить в три группы.

Первая группа объединяет гнейсово-гранулитовую и глиноземисто-гнейсово-кварцитовую гранулитовую формации Иенгрского СВК. Для коренных пород этой группы формаций

отмечаются ведущие ассоциации марганец, титан, никель, галлий с  $K_{лк} > 1,5$  и медь, бор, свинец с  $K_{лк} < 0,5$ . Для литохимических потоков рассеяния характерны ассоциации: молибден, титан, хром, ванадий с  $K_{лк} > 1,5$  и фосфор, свинец, цинк с  $K_{лк} < 1,0$ . В бриогеохимических потоках рассеяния: лантан, никель, хром, ванадий, кобальт с  $K_{лк} > 1,5$  и фосфор, марганец с  $K_{лк} < 1,0$ .

Вторая группа включает гранат-гнейсовую амфиболитовую, биотит-амфибол-гнейсовую амфиболитовую формации Тимптоно-Джелтулинского СВК и метаморфизованную габбро-диабазовую формацию Олекмо-Станового СВК с  $K_{лк} > 1,5$ . Для коренных пород этой группы формаций отмечается ведущая ассоциация бор, галлий, титан и свинец. Для литохимических потоков рассеяния характерна ассоциация хром, молибден, ванадий, титан. В бриогеохимических потоках рассеяния – серебро и свинец.

В третью группу включены алевролитово-песчаниковая молассоидная угленосная, песчаниковая молассоидная угленосная, песчано-конгломератовая молассовая и андезит-дацит-риолитовая формации Южно-Якутского СВК с  $K_{лк} > 1,5$ . Для коренных пород этой группы формаций отмечается ведущая ассоциация свинец, галлий, ванадий. Для литохимических потоков рассеяния характерна ассоциация титан, молибден, ванадий.

### **Моделирование геохимических полей и выявление аномалий.**

Для решения задач прогнозирования месторождений полезных ископаемых, по геохимическим данным, широко используются специализированные автоматизированные системы [3, 11]. Они сочетают в себе элементы прогнозирующих, обучающих и экспертных систем и решают широкий спектр геолого-геохимических задач. Количественное описание исследуемого пространства в этих системах рассматривается как задача выделения и построения моделей геохимических полей, различающихся некоторыми ассоциациями ХЭ, отображающих распределение минеральных парагенезисов. Эта задача решается путем конструирования некоторого множества моделей геохимических полей, таких как мультипликативные, аддитивные, ассоциаций и другие. Выделение ассоциаций на картах, соответствует отдельным геохимическим подразделениям (зонам, полосам, узлам, полям) и отражает генетическую сущность явлений. Представление геохимических полей в виде естественных ассоциаций – совокупностей, встречающихся в разнообразных средах земной коры, является одной из основных задач построения эмпирических моделей.

При выполнении геологических исследований на территории Сутамского блока нами рассмотрено несколько способов создания моделей прогнозных геохимических карт на основе созданной фактографической БД. С применением АС GEOSCAN построена модель прогнозной карты масштаба 1:200 000. Анализ карты показал, что фоновые области, в большинстве своем, приурочены к зонам развития гранитоидных образований, либо к древним геологическим телам, удаленным от молодых (мезозойских) интрузивных образований. Аномальные области, в основном, приурочены к местам взаимодействия метаморфических пород фундамента и мезозойских магматических образований. Переходные области расположены в зонах, где проявился диафорез или наложенный регионально-контактовый метаморфизм.

Наиболее контрастные аномалии золота, фиксирующие известные рудные объекты, тяготеют к областям развития незавершенных сдвиговых деформаций, в которых, вероятно, складывались наиболее благоприятные структурные условия образования рудных тел. Учитывая факт, что ряд вновь выявленных аномалий золота и никеля пространственно сопряжены с уже известными рудными образованиями, то, с точки зрения прогноза, представляют определенный интерес и другие аномалии. Места их локализации следует относить к перспективным и на них целесообразно проводить детальные поисковые работы.

Определение ассоциаций ХЭ с применением АСОИ-МП [7, 14] дало возможность решить задачу формализованного количественного описания природной системы, ее разграничение, выделение однородных участков, сравнение их между собой. Пространственное распределение ассоциаций ХЭ проведено на основе решения задачи автоматической классификации (метод гиперсфер) и построения карты распределения этих ассоциаций (карты классов-ассоциаций). Анализ исходных данных показал, что процентные содержания ХЭ в пробах являются величинами несоизмеримыми, так как наблюдается разница содержаний элементов в три и более порядка. Поэтому при классификации использованы не абсолютные концентрации ХЭ, а их отношение

к фоновым значениям. Такие величины носят название коэффициентов контрастности (КК). КК удобны для решения задач классификации, поскольку они являются величинами безразмерными, следовательно, сравнимыми для многих ХЭ с различными уровнями абсолютных содержаний.

На построенной модели карты классов-ассоциаций отобразился общий характер распределения ХЭ халькофильной группы на территории Сутамского блока и выявилось некоторое количество интересных объектов. Так, например, в северной, северо-восточной и юго-восточной частях площади наблюдаются повышенные концентрации золота и серебра, а свинец, цинк, медь и галлий находятся в подчиненном положении. Это хорошо согласуется с известными в этой части территории рудопоявлениями золото-малосульфидного типа. В результате тщательного анализа построенной модели карты многомерного геохимического поля установлено, что она несет большую смысловую нагрузку, где находят отражение признаки геологического строения природной системы, типы минерализации и зональность.

Сопоставление, построенных с применением программ системы GEORUN, других моделей геохимических карт показало, что практически на всех картах одинаково отображена структура геохимического поля и ни одна заслуживающая внимания аномалия не пропущена.

В северной и северо-восточной частях Сутамского блока выявлены две достаточно крупные высококонтрастные аномалии золота и ряд более мелких, вытянутых в цепочку, в западной части площади. Некоторые контрастные аномалии золота сопряжены с известными рудными объектами. В центральной части площади сконцентрированы аномалии свинца, меди, галлия, молибдена, цинка. Часть из этих аномалий имеет непосредственную связь с рудными телами с медно-молибденовой и золото-сульфидной минерализациями. Другая часть такой явной пространственной сопряженности не имеет, но по аналогии можно предположить их рудогенное происхождение.

Интерпретация построенных моделей карт факторов (факторный анализ) и трех мультипликативных геохимических показателей ( $Au \times Pb \times Cu$ ;  $Au \times Ag \times Co \times Ni$ ;  $Cu \times Ni$ ), показала, что комплексные литохимические аномалии пространственно связаны с известными (Подъячев и др., 1984г.) рудными объектами с золото-малосульфидной, железорудной, и медно-никелевой минерализацией, этот факт подтверждает высокую эффективность применения ретроспективных геохимических данных.

На прогнозно-геохимической карте выявлено 610 высококонтрастных моноэлементных геохимических аномалий, объединенных, на основе пространственного положения, в 254 геохимических поля. Из них 114 геохимически специализированных, по мнению автора, дают возможность проведения обоснованного прогноза оруденения на изученной территории [16], т.к. 53 поля фиксируют уже известные проявления железа, золота, свинца, цинка, молибдена, никеля, ванадия, титана. Для 61 поля установлена геохимическая специализация, локализация и формационная принадлежность: 12 полей имеют литофильную специализацию, 14 – сидерофильную и 35 – халькофильную. 20 полей с халькофильной специализацией явно указывают на наличие проявлений золото-сульфидного типа. Составлена схема расположения перспективных геохимических аномальных полей золота, для которых установлена связь с рудопоявлениями золота.

### **Выводы**

Исследованная территория характеризуется развитием следующих главенствующих устойчивых геохимических ассоциаций: ассоциация рассеянных элементов (ниобий, скандий, иттрий); ассоциация редкоземельных элементов (лантан, церий, иттербий, бериллий); ассоциации элементов группы железа (никель, кобальт, хром, ванадий; кобальт, ванадий, титан; хром, марганец, титан); ассоциации металлических элементов (медь, серебро, свинец; цинк, серебро, германий, галлий; серебро, германий, кадмий; молибден, серебро; цинк, молибден). Золото, проявляя, хотя и положительные, но сравнительно низкие корреляционные связи с другими ХЭ, как бы обособляется от них.

Сравнение элементных составов установленных ассоциаций с типоморфными ассоциациями ХЭ уже известных рудных образований на Сутамском блоке и смежных с ним территориях показало их значительное сходство. Этот факт подтверждает эффективность применения геохимических данных на данной территории для поисков рудных полезных ископаемых и позволяет прогнозировать обнаружение новых рудных объектов с аналогичными типами оруденения [17].

Определена локализация контрастных моноэлементных аномалий. На этой основе выявлены комплексные геохимические аномалии и по их элементному составу – геохимические поля, их геохимическая специализация и металлогенический потенциал. Сделан анализ пространственного расположения на территории специализированных геохимических полей и, на его основе, произведено геохимическое районирование с выделением соподчиненных подразделений: геохимических полос и узлов.

Проведена корреляция элементных составов высококонтрастных геохимических аномалий и полей с элементным составом ранжированных рядов (элементов-индикаторов) рудных образований, известных на территории Сутамского блока. Сделана попытка установления связи (возможной рудной природы) аномальных геохимических полей с выявленными ранее и изученными рудными телами. В результате установлена рудогенная природа ряда высококонтрастных комплексных геохимических аномалий.

На основе обобщения имеющегося материала и результатов, полученных в процессе исследования территории Сутамского блока, установлены перспективные на золото и медно-никелевую минерализацию участки, для которых рекомендован комплекс поисково-разведочных работ и их объемы.

### Литература

1. Макаров В.Н. Оценка рудоносности площадей в горно-складчатых областях Якутии геохимическими методами // Геология и полезные ископаемые Верхояно-Колымской складчатой системы – Якутск: 1984. – С. 43-50.
2. Пуляев Н.А. Геохимическая специализация и перспективы рудоносности структурно-вещественных комплексов Сутамского блока Алдано-Станового щита: автореф. к.геол.-мин.н.: 25.00.11 – Якутск: Изд-во ЯГУ, 2005. – 21 с.
3. Каждан А.Б., Мессерман И.З., Лаврова Т.Ю. Методические рекомендации по сбору и компьютерной обработке геологической, геохимической и геофизической информации с целью выявления рудных зон, полей и месторождений при многоцелевом геохимическом картировании различных масштабов. – М.: ИмГРЭ, 1995. – 192 с.
4. Дук В.Л., Балаганский В.В. и др. Последовательность деформаций в архейских образованиях Сутамского блока // Структурная и метаморфическая петрология раннего докембрия Алданского щита. – Якутск: 1975. – С. 19-42
5. Андрианов Н.Г. Метаморфические факторы локализации эндогенного оруденения // Методы геологических исследований при поисках твердых полезных ископаемых в Якутии. – Якутск: ЯПГО, 1983. – С. 12-14.
6. Билибин Т.В. и др. Геологические формации и металлогения Алданского щита. – Л.: Недра, 1976. – Т. 27. – 339 с.
7. Годзевич Б.Л. Опыт расчленения раннего докембрия на структурно-вещественные комплексы (на примере Становой складчатой области) // Методика картирования метаморфических комплексов. – Новосибирск: 1980. – С. 107-113.
8. Жижин В.И., Никитин В.М. Некоторые черты строения и петрографического состава ультрамафитовых тел Сутамского блока (Южная Якутия) // Новые данные по критериям, методике и технологии поисков и разведки полезных ископаемых Якутии. – Якутск: ЯГУ, 1988. – С. 99-107.
9. Пуляев Н.А., Лапаев Г.П. Результаты геохимических поисков по потокам рассеяния в Южной Якутии // Геохимические методы поисков рудных месторождений в северных районах Сибири. – Якутск: 1979. – С. 51-54.
10. Бугаец А.Н., Дуденко Л.Н.. Математические методы при прогнозировании месторождений полезных ископаемых. – Л.: Недра, 1976. – 176 с.
11. Принципы и методика геохимических исследований при прогнозировании и поисках рудных месторождений / под ред. А.А. Смылова – Л.: Недра, 1979. – 248 с.
12. Вострокнутов Г.А. Новые комплексные критерии прогнозно-поисковой интерпретации литохимических данных // Геохимические методы поисков рудных месторождений. – Новосибирск: Недра, 1982. – Ч. 2. – С. 67-82.
13. Математическая обработка данных поисковой геохимии / под ред. Дубова Р.И. – Новосибирск: Наука, 1976. – 208 с.
14. Грехнев Н.И. Особенности геохимических поисков в областях докембрийской складчатости (зона

Станового хребта) // Геохимические поиски в областях докембрийской консолидации. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 25-29.

15. Добрецов Н.Л. и др. Структурные и вещественные критерии при картировании метаморфических толщ // Методика картирования метаморфических комплексов. – Новосибирск: 1980. – С. 18-34.

16. Пуляев Н.А. Прогнозирование золоторудных объектов на территории со сложным геологическим строением с применением геохимических данных и математических методов моделирования // «Благородные и редкие металлы Сибири и Дальнего Востока: рудообразующие системы месторождений комплексных и нетрадиционных типов руд – Иркутск: ИГХ СО РАН, 2005. – С. 64-67.

17. Геологическая съемка сложно дислоцированных комплексов // Методическое пособие по геологической съемке масштаба 1:50000. – Л.: Недра, 1980. – 240 с.

### References

1. Makarov V.N. Ocenka rudonosnosti ploschadej v gorno-skladchatyh oblastjah Jakutii geohimicheskimi metodami // Geologija i poleznye iskopaemye Verhojano-Kolymskoj skladchatoj sistemy – Jakutsk: 1984. – S. 43-50.

2. Puljaev N.A. Geohimicheskaja specializacija i perspektivy rudonosnosti strukturno-veshhestvennyh kompleksov Sutamskogo bloka Aldano-Stanovogo shhita: avtoref. k.geol-min.n.: 25.00.11 – Jakutsk: JaGU, 2005. – 21 s.

3. Kazhdan A.B., Messerman I.Z., Lavrova T.Ju. Metodicheskie rekomendacii po sboru i komp'juternoj obrabotke geologicheskoy, geohimicheskoy i geofizicheskoy informacii s cel'ju vyjavlenija rudnyh zon, polej i mestorozhdenij pri mnogocelevom geohimicheskom kartirovanii razlichnyh masshtabov. – M.: ImGRJe, 1995. – 192 с.

4. Duk V.L., Balaganskij V.V. i dr. Posledovatel'nost' deformacij v arhejskih obrazovaniyah Sutamskogo bloka // Strukturnaja i metamorficheskaja petrologija rannego dokembrija Aldanskogo shhita. – Jakutsk: 1975. – S. 19-42

5. Andrianov N.G. Metamorficheskie faktory lokalizacii jendogennogo orudnenija // Metody geologicheskikh issledovanij pri poiskah tverdyh poleznyh iskopaemyh v Jakutii. – Jakutsk: JaPGO, 1983. – С. 12-14.

6. Bilibin T.V. i dr. Geologicheskie formacii i metallogenija Aldanskogo shhita. – L.:Nedra, 1976. – T. 27. – 339 s.

7. Godzevich B.L. Opyt raschlenenija rannego dokembrija na strukturno-veshhestvennyye komplekсы (na primere Stanovoj skladchatoj oblasti) // Metodika kartirovanija metamorficheskikh kompleksov. – Novosibirsk: 1980. – С. 107-113.

8. Zhizhin V.I., Nikitin V.M. Nekotorye cherty stroenija i petrograficheskogo sostava ul'tramafitovyh tel Sutamskogo bloka (Juzhnaja Jakutija) // Novye dannye po kriterijam, metodike i tehnologii poiskov i razvedki poleznyh iskopaemyh Jakutii. – Jakutsk: JaGU, 1988. – S. 99-107.

9. Puljaev N.A., Lapaev G.P. Rezul'taty geohimicheskikh poiskov po potokam rassejanija v Juzhnoj Jakutii // Geohimicheskie metody poiskov rudnyh mestorozhdenij v severnyh rajonah Sibiri. – Jakutsk: 1979. – S. 51-54.

10. Bugaev A.N., Dudenko L.N.. Matematicheskie metody pri prognozirovanii mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. – L.: Nedra, 1976. – 176 s.

11. Principy i metodika geohimicheskikh issledovanij pri prognozirovanii i poiskah rudnyh mestorozhdenij / pod. red. A.A. Smyslova – L.: Nedra, 1979. – 248 s.

12. Vostroknutov G.A. Novye kompleksnye kriterii prognozno-poiskovoj interpretacii lithimicheskikh dannyh // Geohimicheskie metody poiskov rudnyh mestorozhdenij. – Novosibirsk: Nedra, 1982. – Ch. 2. – S. 67-82.

13. Matematicheskaja obrabotka dannyh poiskovoj geohimii / pod. red. Dubova R.I. – Novosibirsk: Nauka, 1976. – 208 s.

14. Grehnev N.I. Osobennosti geohimicheskikh poiskov v oblastjah dokembrijskoj skladchatosti (zona Stanovogo hrebta) // Geohimicheskie poiski v oblastjah dokembrijskoj konsolidacii. – Novosibirsk: Nauka, 1985. – S. 25-29.

15. Dobrecov N.L. i dr. Strukturnye i veshhestvennyye kriterii pri kartirovanii metamorficheskikh tolsh // Metodika kartirovanija metamorficheskikh kompleksov. – Novosibirsk: 1980. – С. 18-34.

16. Puljaev N.A. Prognozirovanie zolotorudnyh ob#ektov na territorii so slozhnym geologicheskim stroeniem s primeneniem geohimicheskikh dannyh i matematicheskikh metodov modelirovanija // «Blagorodnye i redkie metally Sibiri i Dal'nego Vostoka: rudoobrazujushhie sistemy mestorozhdenij kompleksnyh i netradicionnyh tipov rud – Irkutsk: IGH SO RAN, 2005. – S. 64-67.

17. Geologicheskaja s#emka slozhno dislocirovannyh kompleksov // Metodicheskoe posobie po geologicheskoy s#emke masshtaba 1:50000. – L.: Nedra, 1980. – 240 s.