Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-138-145

Геоинформационная прогнозно-поисковая модель перспективного урановорудного участка Туюкан

С.А. Устинов[1]✉, В.А. Петров[1], Н.А. Гребенкин[2], И.А. Кочкин[1], А.М. Чепчугов[1, 2]

[1] *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация*

[2] *Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, г. Москва, Российская Федерация*

✉ stevesa@mail.ru

Резюме: На основе применения современных геоинформационных технологий для перспективного урановорудного участка Туюкан, расположенного в Мамско-Чуйском районе Иркутской области, создана локальная прогнозно-поисковая модель. Данная модель является итоговым результатом работ авторов по прогнозно-металлогеническому разномасштабному картированию в пределах рассматриваемого района новых, преимущественно урановых, рудных объектов. На предыдущих этапах исследования для площади государственной геологической карты O-49-XII масштабом 1:200000, включающей рассматриваемый участок, с применением ГИС технологий проводилась обработка разнородных данных дистанционного зондирования Земли в сочетании с авторскими методами структурно-геоморфологического и тектонофизического анализов. По результатам выделены критерии локализации уранового оруденения и создана региональная весовая прогнозно-поисковая модель территории. Анализ данной модели позволил однозначно выделить участок Туюкан в качестве перспективного. С учетом региональной прогнозно-поисковой модели и дополнительной информации, полученной по результатам разноплановых съёмок в ходе проведенных геологоразведочных работ, для перспективного участка Туюкан сформулированы и визуализированы в ГИС дополнительные прогнозные критерии, что позволило создать локальную весовую прогнозно-поисковую модель, ориентированную на поиски преимущественно урановых месторождений. В результате в пределах участка локализованы перспективные области и сформулированы рекомендации для дальнейших поисковых работ.

Ключевые слова: геоинформационные технологии, прогнозно-поисковая модель, металлогения, уран, структуры рудных полей и месторождений, Патомское нагорье, Тонодское поднятие, месторождение Туюкан

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-27-00218, https://rscf.ru/project/24-27-00218/.

Для цитирования: Устинов С.А., Петров В.А., Гребенкин Н.А., Кочкин И.А., Чепчугов А.М. Геоинформационная прогнозно-поисковая модель перспективного урановорудного участка Туюкан. *Горная промышленность.* 2025;(6):138–145. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-138-145

Geoinformation forecast and exploration model of the prospective Tuyukan uranium ore site

S.A. Ustinov[1] ✉, V.A. Petrov[1], N.A. Grebenkin[2], I.A. Kochkin[1], A.M. Chepchugov[1, 2]

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

[2] *All-Russian Research Institute of Mineral Raw Materials named after. N.M. Fedorovsky, Moscow, Russian Federation*

✉ stevesa@mail.ru

Abstract: A local forecast and exploration model has been created based on application of modern geoinformation technologies for the promising Tuyukan uranium ore site located in the Mamsko-Chuisky district of the Irkutsk region. This model is the final result of the authors' work on forecast and metallogenic multi-scale mapping of new, mainly uranium, ore objects within the considered area. Processing of heterogeneous Earth remote sensing data in combination with the author's methods of structuralgeomorphological and tectonophysical analysis was carried out using GIS technologies at the previous stages of the study, for the part of O-49-XII state geological map at the scale of 1:200 000 that includes the considered site. Criteria for localization of uranium mineralization were identified based on the results, and a regional weight-based forecast and exploration model of the territory was created. Analysis of this model made it possible to clearly identify the Tuyukan site as a promising asset. Based on the regional forecast and exploration model and additional information obtained as the results of various surveys during the geological exploration stage, additional forecast criteria were formulated and visualized in the GIS for the promising Tuyukan site, which made it possible to create a local weight-based forecast and exploration model mainly focused on searching for uranium deposits. As the result, promising areas were localized within the site and recommendations for further exploration work were formulated.

Keywords: geoinformation technologies, forecast and exploration model, metallogeny, uranium, structures of ore fields and deposits, Patom Highlands, Tonodskoye Upland, Tuyukan deposit

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 24-27-00218, https://rscf.ru/project/24-27-00218/.

For citation: Ustinov S.A., Petrov V.A., Grebenkin N.A., Kochkin I.A., Chepchugov A.M. Geoinformation forecast and exploration model of the prospective Tuyukan uranium ore site. *Russian Mining Industry.* 2025;(6):138–145. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-138-145

Введение

Учитывая современные геолого-экономические факторы развития минерально-сырьевой базы страны, возникает острая необходимость более четкой постановки и обоснования задач поисково-оценочных геологоразведочных работ с целью обнаружения новых месторождений, особенно стратегических металлов и дефицитных видов твердых полезных ископаемых, к которым в первую очередь относится уран [1]. Большинство потенциально перспективных на уран площадей располагаются в пределах труднодоступных и слабоизученных территорий. Проведение на данных крайне обширных площадях массовых поисковых работ с учетом отсутствия гарантий четкого результата часто с экономической точки зрения оказывается нерентабельно. При этом на основе результатов обработки и анализа разноплановых данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с учетом установленного геологического строения и истории развития территорий, результатов ранее проведенных геологоразведочных работ и наземных съемок с применением зарекомендовавших себя методик, а также использованием геоинформационных (ГИС) технологий создаются прогнозные карты и цифровые прогнозно-поисковые модели, позволяющие с помощью пространственной визуализации широкого ряда выявленных критериев, установления их корреляционных связей и представления итогового математически аппроксимированного результата в виде картографических схем, оперативно оценить и выбрать перспективные площади для постановки крупномасштабного геологического картирования, проведения поисково-оценочных работ.

Одной из подобных труднодоступных территорий, перспективных в первую очередь на урановорудные, а также на железо- и золоторудные объекты, является район Туюканского рудного узла, расположенный в Мамско-Чуйском районе Иркутской области [1–4]. Ранее авторами данной статьи для рассматриваемого района (площадь листа государственной геологической карты O-49-XII) на основе использования данных ДЗЗ с учетом локализации известных рудных объектов применены структурно-геоморфологические, пространственно-плотностные и тектонофизические методы для выявления специфических особенностей каркаса разрывных нарушений, развитых в пределах территории, что позволило сформулировать и визуализировать набор прогнозно-поисковых критериев на самые распространенные в регионе типы твердых полезных ископаемых. Представленные результаты позволили создать прогнозно-поисковую модель, на основе которой удалось выявить и ранжировать области по степени прогнозной перспективности обнаружения новых рудных объектов [5]. Представляемые в данной статье результаты исследования являются логичным продолжением предыдущих работ и нацелены на создание локальной прогнозно-поисковой модели для перспективного участка Туюкан с использованием созданной прогнозно-поисковой модели и результатов проведённых съёмок, полученных в ходе проведения комплексных геологоразведочных работ.

Объект исследования

С геологической позиции рассматриваемый район локализован вблизи юго-восточной границы Сибирской платформы и относится к Байкало-Вилюйской окраинной плитно-коллизионной области [4]. Считается, что данная область является значительно переработанной частью фундамента плитного комплекса Сибирской платформы и включает в себя Байкало-Патомскую композитную перикратонную взбросо-надвиговую систему, которая состоит из тектонически совмещенных коллизионными процессами линейных блоков дорифейского фундамента и реликтов Прибайкало-Патомского перикратонного прогиба с рифейским параплитным комплексом [6]. К крупным геологическим образованиям относятся Тонодское, Чуйское, Нечерское поднятия, являющиеся выступами карельского гранитоидно-метаморфического фундамента [1].

С точки зрения металлогении территория входит в Саяно-Забайкальскую провинцию и Байкало-Патомскую

1 Распоряжение Правительства Российской Федерации № 939-р от 16 апреля 2024 г. об утверждении дефицитных видов твердых полезных ископаемых и перечня продукции с высокой долей добавленной стоимости, производимой с использованием добытых дефицитных видов твердых полезных ископаемых. Режим доступа: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408813251/ (дата обращения: 15.05.2025).

минерагеническую субпровинцию. Известные рудные объекты входят в Чуйско-Тонодскую золото-редкометалльно-урано-железорудную минерагеническую зону, включающую два рудных района – Тонодский в границах Тонодского поднятия и Витимский в зоне перехода от Чуйского к Тонодскому поднятию [4]. Важнейшие полезные ископаемые Тонодского рудного района – золото и уран.

Одним из важнейших объектов района является Туюканское урановое месторождение, залегающее среди дезинтегрированных и интенсивно измененных гранитов Кевактинского массива с ксенолитами пород албазинской и михайловской свит. Считается, что рудоконтролирующее значение имеют субширотные тектонические нарушения, субпараллельные границе выходов отложений нижнерифейского чехла (пурпольской свиты) [3].

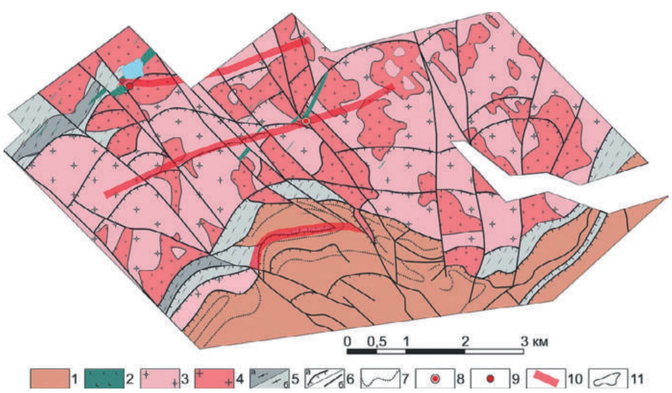

Рис. 1
Геологическая схема перспективного участка Туюкан (по материалам ФГБУ «ВИМС»):
1 – Медвежевская свита ($RF_{2\text{-}3}$?md), конгломераты, кварциты, сланцы;
2 – силлы и дайки метадолеритов, метагаббро-долеритов (βKR_2-RF_1?t);
3 – Чуйско-нечерский комплекс, вторая фаза ($\gamma_2 KR_2$cn), гранит-порфиры и порфировидные граниты биотитовые;
4 – Чуйско-нечерский комплекс, первая фаза ($\gamma_1 KR_2$cn), граниты биотитовые средне- крупнозернистые;
5 – Михайловская свита (KR_1mh), кварциты, сланцы: углеродистые (а), кварц-полевошпат-слюдистые (б);
6 – разрывные нарушения: а – надвиги, б – прочие нарушения по данным дешифрирования космоснимков;
7 – осевые линии выходов на дневную поверхность горизонтов пород с высокой магнитной восприимчивостью;
8 – месторождение урана Туюкан;
9 – рудопроявления урана Натали;
10 – предполагаемые рудоносные зоны;
11 – геологические границы

Fig. 1
A geologic map of the prospective Tuyukan area (based on materials of the VIMS All-Russian Research Institute of Mineral Resources):
1 – the Medvezhevskaya series ($RF_{2\text{-}3}$?md), conglomerates, quartzites, shales;
2 – sills and dykes of metadolerites, meta-gabbro-dolerites (βKR_2-RF_1?t);
3 – the Chuisko-Nechersky complex, second phase ($\gamma_2 KR_2$cn), granite porphyries and biotite porphyritic granites;
4 – the Chuisko-Nechersky complex, first phase ($\gamma_1 KR_2$cn), medium-to-coarse-grained biotite granites;
5 – the Mikhailovskaya series (KR_1mh), quartzites, schists: carbonaceous (a), quartz-feldspar-mica (б);
6 – discontinuous faults: a – thrusts б – other faults based on interpretation of satellite images;
7 – axial lines of outcrops of rock formations with high magnetic response;
8 – the Tuyukan uranium deposit;
9 – the Natali uranium ore occurrences;
10 – presumed ore-bearing zones;
11 – geological boundaries

В период 2021–2023 гг. ФГБУ «ВИМС» проводились ревизионные и поисковые работы на уран в пределах выделенного перспективного участка Туюкан. По результатам проведенных работ уточнено геологическое строение рассматриваемой площади, закартированы новые урановорудные тела жильно-штокверкового типа, проведена дополнительная оценка прогнозных ресурсов урана (рис. 1). Установлено, что строение участка Туюкан определяется многочисленными листрическими взбросами-надвигами в парагенезе со сдвигами. Доказано, что контакты горных пород, в том числе граница фундамента и рифейского чехла, являются преимущественно тектоническими (надвиго-во-сдвиговыми).

Методика

Анализ пространственных данных составляет один из наиболее важных разделов ГИС моделирования. Задача пространственного геоинформационного прогноза в науках о Земле состоит в том, чтобы по комплексу геолого-геофизических данных построить пространственное распределение числового или номинального свойства геологической среды, представить это свойство в виде прогнозной карты и найти формальное правило прогноза (прогнозирующую функцию). При решении предполагается, что в пределах изучаемой области прогнозирующая функция однозначно определяется характеристиками геологической среды. Это означает, что исследуемый регион должен представлять собой однородную в определенном смысле геологическую зону [7].

Обычно прогнозирующая функция заранее неизвестна. Для ее нахождения используется выборка прецедентов: объектов, для которых результаты прогноза известны. Иногда эта выборка дополняется экспертными оценками результатов прогноза.

В задачах геологического прогноза обычно применяются две стратегии решений: экспертные и компьютерные. Обе стратегии могут использовать при решении методы аналогий с прецедентами или правила, чаще всего формулируемые в виде логических высказываний. В первом случае прогноз дается на основе сходства геолого-геофизических свойств объектов прогноза и прецедентов. Во втором случае прогноз дается на основании правил, которые устанавливают связь между значениями геолого-геофизических признаков объекта и прогноза. Также, как и в данной работе, может быть применён наиболее современный метод – создание весовой прогнозно-поисковой модели.

Весовые прогнозно-поисковые модели (Weight of Evidence Models) – это один из наиболее широко используемых методов в металлогеническом картировании, прогнозе и поиске месторождений полезных ископаемых [8–12]. Данные модели основаны на статистических алгоритмах, которые позволяют определить вероятность наличия месторождения в конкретном участке земной поверхности на основе геологических данных и их корреляции с уже известными месторождениями.

Основным принципом создания весовых прогнозно-поисковых моделей является выделение геологических факторов, которые имеют наибольшую значимость для концентрации полезных ископаемых и их дальнейшей интерпретации в контексте проявлений месторождений на рассматриваемой территории.

Для построения модели используются данные о геологических структурах и формациях, химическом составе горных пород, физических свойствах окружающей среды и других параметрах, которые могут влиять на распределение и концентрацию полезных ископаемых.

После выделения значимых геологических факторов проводится их статистический анализ и оценка влияния каждого из них на вероятность наличия месторождения. Эти данные затем объединяются в единую модель, которая позволяет определить вероятность наличия месторождения в конкретном участке земной поверхности на основе имеющихся данных и уже известных месторождений. В качестве тестовых (эталонных) объектов рассматривались месторождение Туюкан и рудопроявление Натали (см. рис. 1).

Весовые прогнозно-поисковые модели являются крайне эффективным инструментом для прогноза месторождений полезных ископаемых, так как они позволяют объединять различные типы данных и выявлять скрытые связи между ними.

Результаты

На начальных этапах исследования авторами для территории листа государственной геологической карты (ГГК) О-49-XII масштабом 1:200 000, на площади которого расположен рассматриваемый перспективный участок Туюкан, на основе использования ДЗЗ для реконструкции каркаса разрывных нарушений, определения кинематического типа каждой структуры и восстановления последовательности их активизации проводились структурно-тектонофизические реконструкции с применением линеаментоного анализа [13]. Линеаменты выделялись на основе авторского подхода с использованием цифровой модели рельефа и нейросетевых технологий [14].

В рамках данных работ доказана возможность использования морфологических особенностей рельефа территории для достоверной реконструкции каркаса как неотектонических, так и древних разрывных нарушений. Показано, что решающее значение в локализации уранового оруденения играют зоны динамического влияния северо-восточных и северо-западных разломов. На основе тектонофизического подхода реконструированы ориентировки главных осей сжатия и растяжения регионального поля напряжений-деформаций, а также кинематика основных типов формируемых разрывов на предполагаемый период рудообразования. Учет установленной ориентировки главных осей регионального поля напряжений-деформаций при расчете тенденции к сдвигу позволил выявить наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур. В пределах зон динамического влияния установленных разломов реконструированы параметры локальных полей напряжений-деформаций, а также стадийность формирования данных структур.

В дальнейшем на основе полученных результатов сформулированы структурные критерии (32 шт.), напрямую или косвенно влияющие на размещение рудной минерализации. Данные критерии разделены на группы, которые включали зоны динамического влияния линейных структур различных типов и рангов; их относительную удельную плотность; области структурных узлов, сформированных на пересечении данных структур; относительную удельную плотность узлов; области вероятной локализации рудной минерализации относительно элементов структур центрального (кольцевого) типа; относительную удельную плотность гидравлически активных (на период рудообразования) сегментов разломов. Затем выделенные критерии визуализировались в ГИС среде в виде пространственных схем.

Сформулированные структурные критерии представляли собой разнородные данные, включая положение и ориентировку разрывных структур различных типов и рангов, их пространственно-геометрические и пространственно-плотностные параметры, области влияния данных структур на вмещающий массив горных пород и тектонофизические параметры, непосредственно влияющие на формирование наиболее деформированных (тектонически проницаемых) зон на предполагаемый период рудообразования. Каждый критерий был теоретически обоснован и в ГИС проекте представлен в виде растра, отражающего цветовой маркировкой пикселей области проявления количественных значений критерия в пределах территории от наименее до наиболее значимых. Для каждого растра (критерия) проводилось определение функции принадлежности, которая описывает степень принадлежности каждого значения переменной к данной категории. Функция принадлежности определялась в ГИС на основе нечеткой логики (линейная принадлежность) и характеризовала интервалы значений параметров каждого критерия от 0 до 1. Изначально количественные значения критериев находятся в различных интервалах, отличающихся друг от друга иногда на порядки. Соответственно, функция принадлежности позволила провести «нормирование» полученных значений и осуществить их корректное сравнение друг с другом. На основе статистического анализа и сравнения с положением эталонных рудных объектов, выявления корреляционных связей, с привлечением экспертного мнения и литературных данных, для каждого критерия определены весовые коэффициенты. Весовые коэффициенты использовались для учета «важности» каждого критерия при оценке вероятности наличия рудного объекта в пределах площади.

Итогом обозначенных работ стало создание региональной цифровой количественной прогнозно-поисковой модели для района Туюканского рудного узла (площадь ГГК О-49-XII), оценённая точность которой составила 85% (рис. 2) [5].

Созданная весовая прогнозно-поисковая модель однозначно позволила бы (при отсутствии информации об известных рудных объектах) рекомендовать участок Туюкан для постановки поисковых работ первой очереди. Также выделяется ряд участков, которые в дальнейшем могут быть рассмотрены в качестве перспективных с точки зрения благоприятных структурных условий. Данная модель может быть легко дополнена за счет интеграции в неё любой значимой дополнительной пространственной информации, а также использована при создании локальных прогнозно-поисковых моделей перспективных металлогенических таксонов.

Учитывая результаты проведённых силами ФГБУ «ВИМС» ревизионных и поисковых работ в пределах перспективного участка Туюкан с применением разноплановых наземных и воздушных съёмок, включая геологическое, геофизическое и геохимическое картирование, съемку различными датчиками с использованием беспилотных летательных аппаратов, логичным продолжением рассмотренных работ является создание локальной прогнозно-поисковой модели данного участка. На локальном уровне необходимо обосновать и выделить дополнительные критерии, соответствующие масштабности исследуемого объекта, но при этом учесть выявленные ранее региональные структурные критерии локализации оруденения.

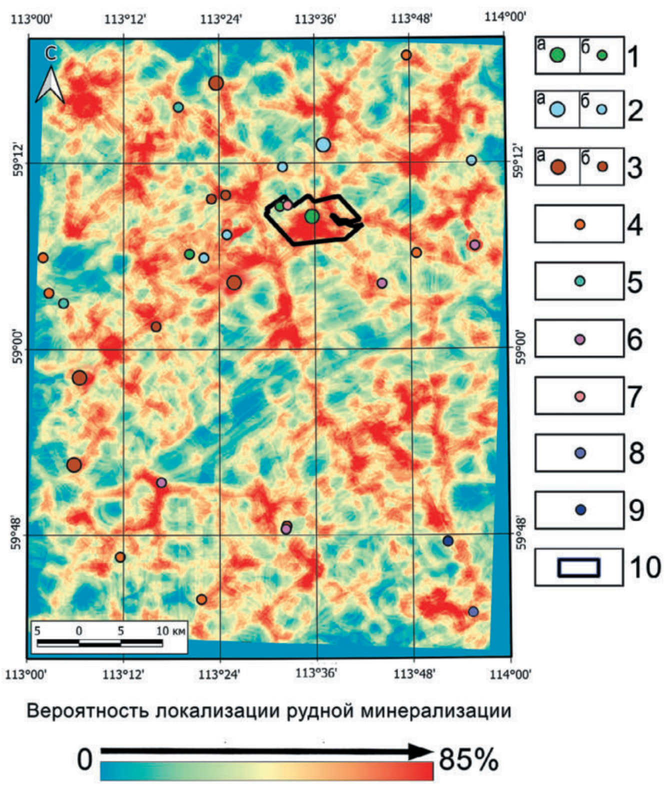

Рис. 2
Весовая структурная прогнозно-поисковая модель района Туюканского рудного узла (площадь государственной геологической карты O-49-XII масштабом 1:200 000):
1–3 – месторождения (а) и рудопроявления (б):
1 – U,
2 – Sn,
3 – Fe;
4–9 – рудопроявления:
4 – Au, 5 – Cu,
6 – Ti,
7 – W;
8 – Li,
9 – Ta и Nb,
10 – границы перспективного участка Туюкан
Источник: [5]

Fig. 2
Weight-based structural forecast and exploration model of the Tuyukan ore cluster area (part of O-49-XII state geological map, 1:200,000 scale):
1–3 – deposits (a) and ore occurrences (б):
1 – U,
2 – Sn,
3 – Fe;
4–9 – ore occurrences:
4 – Au, 5 – Cu,
6 – Ti,
7 – W;
8 – Li,
9 – Ta and Nb,
10 – boundaries of the promising Tuyukan area
Source: [5]

Для этого визуализированная общая региональная весовая структурная прогнозно-поисковая модель рассматривается в качестве отдельного критерия (рис. *3, д*). Также известно, что площадь участка перспективна преимущественно на урановое оруденение, в её пределах локализованы месторождение Туюкан и рудопроявление Натали (см. рис. 1, 2). Соответственно, учитывая небольшую площадь участка (45 км^2), в зависимости от проведенных ранее работ, появляется возможность рассмотрения не только структурных, но и других, имеющихся в распоряжении авторов, данных для формулирования дополнительных критериев, ориентированных преимущественно на прогноз урановорудных тел. В качестве подобного дополнительного критерия использованы максимумы урановых

Таблица 1
Локальные прогнозно-поисковые критерии уранового оруденения для перспективного участка Туюкан

Table 1
Local forecast and exploration criteria for uranium mineralization in the promising Tuyukan area

N°	Критерий	Обоснование	Коэффициент веса
1	Максимумы урановых аэрогамма-спектрометрических аномалий (см. рис. 3, а)	Аномалии подчеркивают радиоактивные ореолы урановорудных скоплений, их первичные и вторичные ореолы в коренных породах и рыхлых отложениях, а также ореолы радиоактивных эманаций в рыхлых отложениях и почвах	1
2	Максимумы относительной удельной плотности линейных разломов (см. рис. 3, б)	Указывают на места скопления линейных разломных структур, их сближений, сочленений и могут маркировать структурные рудные узлы, представляющие собой участки пересечения (сочленения) нескольких различно ориентированных тектонических нарушений	0,8
3	Области зон динамического влияния линейных разломов (см. рис. 3, в)	Разломы окружены зонами поврежденного материала, которые обычно ассоциируются с зоной с повышенной, по сравнению с вмещающим массивом, плотностью трещин, которая снижается по экспоненциальному закону по мере удаления от магистрального разрыва. Подобные зоны названы зонами «динамического влияния разломов». Вероятность локализации рудной минерализации вне данной области стремится к нулю	0,5
4	Области зон динамического влияния гидравлически активных сегментов линейных разломов на период рудообразования (см. рис. 3, г)	На основе реконструкций ориентировки оси главных сжимающих усилий в регионе на предполагаемый период рудообразования для каждой из выявленных и заверенных зон динамического влияния разрывных нарушений визуализированы их сегменты с зонами динамического влияния, в различной степени предрасположенные к сдвигу (наиболее деформированные и проницаемые области)	0,7
5	Региональная структурная прогнозно-поисковая модель района [6] (см. рис. 3, д)	Используется для заверки и учета выявленных региональных структурных критериев на локальном масштабном уровне	0,9

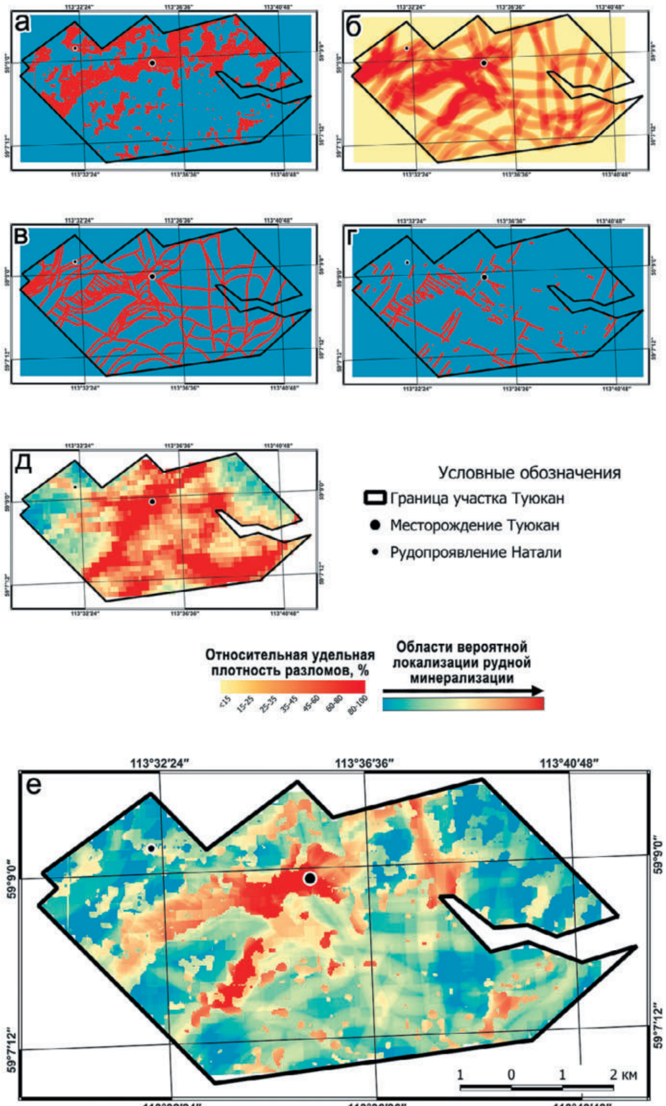

Рис. 3
Визуализация в ГИС прогнозных критериев (а–д) и локальной прогнозно-поисковой модели участка Туюкан (е):
а – максимумы локальных аэрогамма-спектрометрических аномалий (красный);
б – относительная удельная плотность закартированных разломов;
в – области зон динамического влияния разломов (красный);
г – области зон динамического влияния гидравлически активных разломов на период рудообразования (красный);
д – региональная прогнозно-поисковая модель района в пределах участка;
е – локальная прогнозно-поисковая модель участка Туюкан

Fig. 3
GIS visualization of the forecast criteria (а–д) and the local forecast and exploration model for the Tuyukan site (e):
а – maxima of local aerogam-spectrometric anomalies (red);
б – relative specific density of the mapped faults;
в – areas of dynamic impact of faults (red);
г – areas of dynamic impact of hydraulically active faults during the ore formation period (red);
д – regional forecast and exploration model of the area within the site;
е – local forecast and exploration model of the Tuyukan site

локальных аэрогамма-спектрометрических аномалий (рис. 3, *а*). Разрывные структуры, выявленные в пределах территории в результате наземного геологического картирования и интерпретации геофизических данных по размеру соответствуют выделенным на региональном масштабе разрывам, но характеризуются большей детальностью. В связи с этим схемы относительной удельной плотности на рассматриваемом масштабном уровне строятся не для выделенных ранее разломов, а только для заверенных разрывных структур, и их максимумы пространственной плотности рассматриваются в качестве одного из критериев (рис. 3, *б, в*). Для заверенных структур, учитывая ориентировку их сегментов, также проведены тектонофизические реконструкции и выявлены наиболее гидравлически активные сегменты в зависимости от реконструированных параметров поля напряжений-деформаций на период рудообразования (рис. 3, *г*). Подобно региональной весовой структурной прогнозно-поисковой модели, для каждого критерия локальной модели определены весовые коэффициенты (табл. 1).

Комплексирование выявленных дополнительных критериев с учетом определенных коэффициентов веса позволило создать локальную прогнозно-поисковую модель участка Туюкан (рис. 3, *е*). Анализ геологических данных и созданной прогнозно-поисковой модели позволяет заключить, что урановые руды локализуются преимущественно на пересечениях крупных региональных разрывных структур северо-восточного простирания с разрывными структурами более низких порядков преимущественно северо-западной ориентировки. Созданная модель участка Туюкан предполагает два основных перспективных для постановки поисковых работ участка (красные области) – на западных флангах месторождения Туюкан и в юго-западной части территории, на контакте Медвежевской и Михайловской свит с гранитоидами фундамента (Чуйско-нечерский комплекс). Данный контакт, наиболее вероятно, маркирует границу структурно-стратиграфического несогласия.

Заключение

Представленная локальная прогнозно-поисковая модель перспективного урановорудного участка Туюкан является итоговым результатом последовательных комплексных работ авторов по прогнозному картированию в пределах рассматриваемого района новых рудных объектов, преимущественно урановых, относящихся к различным металлогеническим таксонам – от регионального до локального масштабного уровня.

В рамках данных работ проведены выявление особенностей тектонического строения рассматриваемого района, геодинамические реконструкции, оценка напряженного состояния массивов пород и кинематики перемещений в зонах основных разломов. Для регионального масштабного уровня исследований проводилась обработка разнородных данных ДЗЗ в сочетании с методами структурно-геоморфологического, пространственно-геометрического и тектонофизического анализов, с применением ГИС технологий. Это позволило создать региональную весовую прогнозно-поисковую модель для площади листа ГГК О-49-XII. Подобные модели для рассматриваемого района в настоящее время отсутствуют, при этом их наличие позволило бы значительно облегчить и ускорить процесс проектирования поисковых геологоразведочных работ.

Анализ региональной модели позволил однозначно выделить участок Туюкан в качестве перспективного. Кроме того, определен ряд других участков, которые в будущем могут быть рассмотрены как перспективные с точки зрения благоприятных структурных условий.

С учетом региональной прогнозно-поисковой модели и дополнительной информации, полученной по результатам разноплановых съёмок в ходе проведенных геологоразведочных работ, для перспективного участка Туюкан сформулированы и визуализированы в ГИС дополнительные прогнозные критерии, что позволило для данной территории создать локальную весовую прогнозно-поисковую модель, ориентированную на поиски преимущественно урановых месторождений. В результате локализованы две наиболее перспективные области и сформулированы рекомендации для дальнейших поисковых работ в пределах рассматриваемого участка.

Список литературы / References

1. Макарьев Л.Б., Миронов Ю.Б. Особенности металлогении и перспективы промышленной ураноносности Чуйско-Тонодской минерагенической зоны Северного Забайкалья (по материалам ГК-1000/3 и ГДП-200/2). *Региональная геология и металлогения*. 2014;(57):87–94. Режим доступа: https://karpinskyinstitute.ru/ru/public/reggeology_met/content/2014/57/57_10.pdf (дата обращения: 15.05.2025).
Makarev L.B., Mironov Yu.B. Features of metallogeny and prospects for industrial uranium content of the Chuya-Tonod mineragenic zone of northern Transbaikalia (based on the materials of GK-1000/3 and GDP-200/2). *Regional Geology and Metallogeny*. 2014;(57):87–94. (In Russ.) Available at: https://karpinskyinstitute.ru/ru/public/reggeology_met/content/2014/57/57_10.pdf (accessed: 15.05.2025).

2. Макарьев Л.Б., Ефремова У.С., Крымский Р.Ш., Сергеев С.А. Возраст и стадийность уранового оруденения Туюканского рудного узла (Тонодский район, Северное Забайкалье). *Региональная геология и металлогения*. 2019;(77):67–74. Режим доступа: https://karpinskyinstitute.ru/ru/public/reggeology_met/content/2019/77/77_08.pdf (дата обращения: 15.05.2025).
Makarev L.B., Efremova U.S., Krymsky R.Sh., Sergeev S.A. Age and stages of uranium mineralization in the tuyukan ore cluster (Tonod district, Northern Transbaikalia). *Regional Geology and Metallogeny*. 2019;(77):67–74. (In Russ.) Available at: https://karpinskyinstitute.ru/ru/public/reggeology_met/content/2019/77/77_08.pdf (accessed: 15.05.2025).

3. Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н. *Уран российских недр*. М.: ВИМС; 2010. 850 с. Режим доступа: https://www.geokniga.org/books/10630 (дата обращения: 15.05.2025).

4. Митрофанова Н.Н., Болдырев В.И., Коробейников Н.К., Митрофанов Г.Л., Кнутова С.В., Семейкина Л.К., и др. *Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-49 – Киренск. Объяснительная записка*. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ; 2012. 607 с.

5. Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А., Чепчугов А.М., Свечеревский А.Д., Кочкин И.А. Прогнозно-поисковая модель района Туюканского урановорудного узла на основе данных дистанционного зондирования Земли и структурно-тектонофизического подхода. *Разведка и охрана недр*. 2024;(4):52–65. https://doi.org/10.53085/0034-026X_2024_4_52
Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A., Chepchugov A.M., Svecherevskiy A.D., Kochkin I.A. Forecast and prospecting model of the Tuyukan uranium ore cluster area based on the earth remote sensing data and structural-tectonophysical approach. *Prospect and protection of Mineral Resources*. 2024;(4):52–65. (In Russ.) https://doi.org/10.53085/0034-026X_2024_4_52

6. Сизых В.И. Шарьяжно-надвиговая тектоника окраин древних платформ. Новосибирск: Изд-во СО РАН; ГЕО; 2001. 152 с. Режим доступа: https://www.geokniga.org/books/29690 (дата обращения: 15.05.2025).

7. Гитис В.Г., Щукин Ю.К., Старостин В.И. ГИС технология прогноза рудных месторождений. *Информационные процессы*. 2013;13(2):48–63. Режим доступа: http://www.jip.ru/2013/48-62-2013.pdf (дата обращения: 15.05.2025).
Gitis V.G., Shchukin Yu.K., Starostin V.I. GIS technology for ore deposit forecasting. *Information Processes*. 2013;13(2):48–63. (In Russ.) Available at: http://www.jip.ru/2013/48-62-2013.pdf (accessed: 15.05.2025).

8. Bonham-Carter G.F., Agterberg F.P., Wright D.F. Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. In: Agterberg F.P., Bonham-Carter G.F. (eds.) *Statistical applications in the earth sciences*. Geological Survey of Canada; 1990, pp. 171–183. https://doi.org/10.4095/128059

9. Xiao K., Xiang J., Fan M., Xu Y. 3D mineral prospectivity mapping based on deep metallogenic prediction theory: A case study of the Lala Copper Mine, Sichuan, China. *Journal of Earth Science*. 2021;32(2):348–357. https://doi.org/10.1007/s12583-021-1437-8

10. Baddeley A., Brown W., Milne R.K., Nair G., Rakshit S., Lawrence T. et al. Optimal thresholding of predictors in mineral prospectivity analysis. *Natural Resources Research*. 2021;30:923–969. https://doi.org/10.1007/s11053-020-09769-2

11. Liu Y., Carranza E.J.M., Xia Q. Developments in quantitative assessment and modeling of mineral resource potential: An overview. *Natural Resources Research*. 2022;31(4):1825–1840. https://doi.org/10.1007/s11053-022-10075-2

12. Xi W., Ping Y.Y., Tao J.T., Liu C., Shen J., Zhang Y.W. Predicting copper-polymetallic deposits in Kalatag using the weight of evidence model and novel data sources. *Open Geosciences*. 2023;15(1):20220588. https://doi.org/10.1515/geo-2022-0588

13. Устинов С.А., Чепчугов А.М., Томаровская М.А., Петров В.А., Свечеревский А.Д., Яровая Е.В. Структурно-тектонофизический подход к интерпретации результатов линеаментного анализа для прогноза рудообразующих минеральных систем на примере района Туюканского рудного узла. *Исследование Земли из космоса*. 2024;(5):35–57. Режим доступа: https://journals.rcsi.science/0205-9614/article/view/281362 (дата обращения: 15.05.2025).
Ustinov S.A., Chepchugov A.M., Tomarovskaya M.A., Petrov V.A., Svecherevskiy A.D., Yarovaya E.V. Structural–tectonophysical approach to interpreting lineament analysis results for the prediction of ore-forming mineral systems using the example of the Tuyukan ore cluster area. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024. Т. 60. № 12. С. 1547-1565. DOI: 10.1134/S0001433825700215. https://doi.org/10.1134/S0001433825700215"

14. Гришков Г.А., Нафигин И.О., Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А. Разработка методики автоматического выделения линеаментов на основе нейросетевого подхода. *Исследование Земли из космоса*. 2023;(6):86–97. https://doi.org/10.31857/S0205961423060040
Grishkov G.A., Nafigin I.O., Ustinov S.A., Petrov V.A., Minaev V.A. Developing a technique for automatic lineament identification based on the neural network approach. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023;59(10):1271–1280. https://doi.org/10.1134/s0001433823120101

Информация об авторах
Устинов Степан Андреевич – кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-6679-9607; e-mail: stevesa@mail.ru
Петров Владислав Александрович – член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: vlad243@igem.ru
Гребенкин Николай Анатольевич – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделом урана и редких металлов, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: grebenkin@vims-geo.ru
Кочкин Игорь Алексеевич – аспирант, младший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: iakochkin@yandex.ru
Чепчугов Артур Михайлович – аспирант, лаборант-исследователь, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук; инженер, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: chepchugov@vims-geo.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 02.09.2025
Поступила после рецензирования: 27.10.2025
Принята к публикации: 17.11.2025

Information about the authors
Stepan A. Ustinov – Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Deputy Director for Research, Leading Researcher, Institute of Ore Deposit Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-6679-9607; e-mail: stevesa@mail.ru
Vladislav A. Petrov – Corresponding Member of RAS, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.) Director, Institute of Ore Deposit Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: vlad243@igem.ru
Nikolay A. Grebenkin – Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Head of the Department of Uranium and Rare Metals, All-Russian Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, Moscow, Russian Federation; e-mail: grebenkin@vims-geo.ru
Igor A. Kochkin – Postgraduate Student, Junior Researcher, Institute of Ore Deposit Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: iakochkin@yandex.ru
Artur M. Chepchugov – Postgraduate Student, Laboratory Assistant-Researcher, Institute of Ore Deposit Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences; Engineer, All-Russian Scientific Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, Moscow, Russian Federation; e-mail: chepchugov@vims-geo.ru

Article info
Поступила в редакцию: 02.09.2025
Поступила после рецензирования: 27.10.2025
Принята к публикации: 17.11.2025