НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-550.8

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Садыкова Айгерим Нурлановна
Преподаватель кафедры геологии и разведки полезных ископаемых,
Satbayev University
г. Алматы, Республика Казахстан

Аннотация

В статье рассматриваются современные подходы к прогнозированию и поиску месторождений полезных ископаемых в условиях усложнения геологического строения перспективных территорий и постепенного истощения наиболее доступных минеральных ресурсов. Особое внимание уделяется комплексному применению геологического картирования, геохимических и геофизических исследований, дистанционного зондирования Земли, геоинформационных систем и методов цифрового анализа. Раскрывается значение генетических моделей рудообразования для определения перспективных участков, рассматриваются возможности беспилотных летательных аппаратов, гиперспектральной съёмки и машинного обучения. Отдельно анализируются роль бурения и опробования при проверке прогнозных предположений, а также факторы, влияющие на достоверность результатов поисковых работ. Обосновывается необходимость перехода от разрозненного использования отдельных методов к единой системе геологической интерпретации, в которой полевые наблюдения, лабораторные исследования и цифровые данные дополняют друг друга. Подчёркивается, что эффективность поисков определяется не количеством собранной информации, а качеством её проверки и геологического осмысления.

Ключевые слова: полезные ископаемые, геологическая разведка, прогнозирование месторождений, геохимические исследования, геофизика, дистанционное зондирование, геоинформационные системы, гиперспектральная съёмка, машинное обучение, минеральные ресурсы.

Изменение подходов к поиску минеральных ресурсов

Поиск месторождений полезных ископаемых традиционно относится к наиболее сложным направлениям прикладной геологии. Его специфика заключается в необходимости обнаружить природное скопление минерального сырья, которое может не иметь отчётливых признаков на земной поверхности. Даже значительные по запасам рудные тела нередко располагаются на глубине, перекрываются рыхлыми отложениями или находятся в районах со сложной

геологической историей. В подобных условиях визуального обследования территории и изучения отдельных обнажений недостаточно для получения надёжного прогноза.

На ранних этапах развития геологоразведки основное значение имели маршрутные наблюдения, описание горных пород, изучение рельефа и поиск естественных проявлений минерализации. Эти методы сохраняют актуальность, однако современная практика предполагает использование значительно более широкого комплекса исследований. Геолог располагает результатами аэрогеофизических съёмок, спутниковыми изображениями, данными лабораторных анализов, цифровыми моделями рельефа и архивными материалами предыдущих экспедиций. Информация, полученная из различных источников, позволяет выявлять закономерности, которые трудно установить при рассмотрении каждого набора данных отдельно.

Существенное изменение связано и с характером самих объектов поиска. Если ранее значительная часть поисковых работ была ориентирована на хорошо выраженные поверхностные проявления руд, то сегодня возрастает значение скрытых, глубинных и перекрытых месторождений. Их обнаружение требует понимания процессов формирования рудных систем, закономерностей миграции минерализующих растворов и особенностей геологической структуры территории.

Поэтому современное прогнозирование нельзя сводить к механическому поиску отдельных аномалий. Его основой становится построение обоснованной геологической модели, которая объясняет, почему определённый участок может быть перспективным. Такой подход позволяет рациональнее распределять средства, сокращать количество малоэффективных полевых работ и выбирать участки для последующего детального изучения.

Геологическое строение территории как основа прогнозирования

Любое месторождение формируется в результате определённой последовательности геологических процессов. Для магматических объектов существенное значение имеют состав и эволюция магматических расплавов, для гидротермальных месторождений — движение горячих растворов, взаимодействие флюидов с вмещающими породами и условия отложения рудных минералов. В осадочных бассейнах концентрация полезных компонентов может быть связана с переносом вещества водными потоками, изменением химической среды и длительным накоплением осадочного материала.

Первоначальная задача геолога состоит в установлении того, какие процессы происходили на изучаемой территории и могли ли они создать условия для формирования промышленного скопления минерального вещества. Для этого исследуются стратиграфическое положение пород, их петрографические особенности, возраст, характер контактов и взаимное расположение

геологических комплексов. Отдельное внимание уделяется разломам, зонам дробления, складчатым структурам и другим нарушениям сплошности горных пород.

Структурные элементы нередко определяют пути движения минерализующих растворов. Например, системы пересекающихся разломов могут создавать благоприятные условия для циркуляции флюидов и образования рудных тел. Однако наличие разлома само по себе не доказывает присутствие месторождения. Необходимо установить его возраст, характер перемещений, связь с магматическими или гидротермальными событиями и возможные признаки рудообразования.

Важную роль играют модели месторождений. Они объединяют сведения о геологической обстановке, составе руд, минералогии, геохимических ассоциациях и физических свойствах пород. Такие модели помогают определить признаки, по которым можно распознавать объекты определённого генетического типа. В материалах Геологической службы США представлены различные модели минеральных месторождений, используемые в исследованиях ресурсов и при планировании поисковых работ.

Геологическое прогнозирование приобретает наибольшую достоверность тогда, когда предполагаемый объект соответствует нескольким независимым признакам одновременно. Благоприятная структура, подходящий состав вмещающих пород, признаки гидротермального изменения и характерная геохимическая ассоциация в совокупности представляют более весомое основание для продолжения исследований, чем любой из этих факторов по отдельности.

Геохимические исследования и выявление признаков минерализации

Геохимические методы основаны на изучении распределения химических элементов в горных породах, почвах, рыхлых отложениях, природных водах и других компонентах окружающей среды. Их практическая ценность заключается в возможности обнаруживать следы рудообразующих процессов даже в тех случаях, когда само месторождение скрыто под толщей более молодых отложений.

В процессе формирования рудных тел отдельные химические элементы могут перемещаться из глубинных частей геологической системы к поверхности. В результате возникают геохимические ореолы — участки, в которых содержание определённых элементов отличается от характерного фонового уровня. Состав таких ореолов зависит от типа месторождения, состава руд, свойств вмещающих пород, интенсивности выветривания и условий переноса вещества.

Выбор материала для опробования определяется геологическими и ландшафтными особенностями района. В одних условиях наиболее информативными оказываются пробы почвенного горизонта, в других — речные наносы, обломочный материал или выходы коренных пород. При поисках в

районах с развитой речной сетью применяются исследования донных и аллювиальных отложений. Они позволяют получать обобщённую информацию о химическом составе пород, расположенных выше по водосбору.

Современные лаборатории используют атомно-эмиссионную спектрометрию, масс-спектрометрию с индуктивно связанной плазмой, рентгенофлуоресцентный анализ и другие методы определения элементного состава. Их применение обеспечивает получение данных о широком спектре химических компонентов, включая элементы, присутствующие в небольших концентрациях. При этом точность лабораторного измерения не гарантирует правильности геологической интерпретации.

Особенно важен вопрос фоновых значений. Повышенное содержание элемента может быть обусловлено не рудным процессом, а природной неоднородностью пород, особенностями почвообразования или техногенным загрязнением. Поэтому геохимические аномалии необходимо сопоставлять с геологической картой, результатами минералогических наблюдений и данными других видов исследований.

Дополнительные возможности открывает гидрогеохимический подход, при котором изучается химический состав подземных и поверхностных вод. Вода способна переносить растворённые компоненты на значительные расстояния, отражая особенности взаимодействия с породами. Однако направление и интенсивность переноса зависят от гидрогеологических условий, поэтому интерпретация результатов требует учёта водообмена, сезонности и химической среды.

Геофизические методы изучения скрытых геологических объектов

Геофизическая разведка позволяет исследовать строение земной коры по физическим свойствам горных пород. В отличие от непосредственного геологического наблюдения, она даёт возможность получать информацию о подповерхностных структурах на участках, где отсутствуют естественные обнажения или доступ к коренным породам ограничен.

Магниторазведка применяется для изучения распределения магнитных свойств пород. Она особенно полезна при картировании магматических комплексов, разломов и некоторых типов рудных объектов. Магнитные аномалии могут указывать на присутствие пород с повышенной магнитной восприимчивостью либо отражать изменения, связанные с гидротермальными процессами. Однако интерпретация магнитных данных требует осторожности, поскольку одинаковые аномалии могут возникать по различным геологическим причинам.

Гравиразведка основана на регистрации небольших изменений гравитационного поля, обусловленных неоднородностью плотности пород. Этот метод используется для изучения крупных геологических структур, выявления интрузивных тел, осадочных бассейнов и зон, в которых плотность пород заметно

отличается от окружающей среды. Результаты гравиметрических наблюдений приобретают особую ценность при совместной обработке с геологическими и магнитными материалами.

Электроразведка и методы вызванной поляризации позволяют оценивать электрические характеристики горных пород. Они применяются, в частности, при поисках объектов, содержащих вкрапленную сульфидную минерализацию. В таких случаях определённые электрические свойства могут свидетельствовать о наличии минерализованных зон, хотя аналогичные отклики способны создавать и некоторые безрудные геологические образования.

Сейсмические исследования имеют большое значение при изучении глубинного строения, разрывных нарушений и границ между различными геологическими комплексами. В зависимости от поставленной задачи применяются различные схемы наблюдений и способы обработки сигналов. Для рудной геологии сейсмические методы часто используются не изолированно, а как дополнительный источник сведений о структуре района.

Результативность геофизических работ определяется соответствием выбранной методики предполагаемому типу месторождения. Не существует универсального геофизического метода, одинаково эффективного для всех минеральных объектов. Поэтому до начала съёмки необходимо сформулировать геологическую задачу и определить, какие физические свойства могут отличать предполагаемый объект от вмещающих пород.

Дистанционное зондирование и беспилотные технологии

Дистанционное зондирование Земли существенно расширило возможности регионального геологического изучения. Спутниковые системы позволяют получать изображения больших территорий, выделять особенности геологического строения, прослеживать линейные структуры и обнаруживать зоны изменения пород. Особенно полезны такие материалы в труднодоступных горных, пустынных и слабо освоенных районах.

Для геологической интерпретации применяются мультиспектральные и гиперспектральные данные. Первые позволяют сопоставлять отражательные характеристики земной поверхности в нескольких спектральных диапазонах. Гиперспектральные системы регистрируют значительно большее количество узких спектральных каналов, благодаря чему появляется возможность различать некоторые минералы и группы пород по характерным особенностям отражения.

Особый интерес представляют минералы, связанные с процессами гидротермального изменения. Например, зоны распространения глинистых минералов, железосодержащих соединений и некоторых других продуктов изменения пород могут служить косвенными признаками геологических процессов, сопровождающих рудообразование. При этом дистанционная съёмка

фиксирует преимущественно поверхностные проявления. Она не позволяет непосредственно определить глубину и промышленное содержание рудного тела.

Беспилотные летательные аппараты применяются для получения детальных аэрофотоснимков, построения цифровых моделей рельефа и обследования отдельных участков. Их использование особенно оправданно при крупномасштабном картировании, изучении обнажений и документировании геологических разрезов. При установке специализированных сенсоров беспилотники могут выполнять магнитную или спектральную съёмку на небольших высотах.

Важным преимуществом беспилотных систем является возможность повторного обследования одной территории с одинаковыми параметрами съёмки. Это позволяет отслеживать изменения поверхности, уточнять границы геологических объектов и формировать подробные пространственные материалы. Однако полученные изображения должны проходить геологическую проверку. Тени, растительность, влажность поверхности, особенности освещения и техногенные объекты способны создавать визуальные признаки, которые ошибочно принимаются за проявления минерализации.

В обзоре, опубликованном в журнале *Remote Sensing Applications: Society and Environment* в 2023 году, отмечается перспективность объединения беспилотных технологий, спутниковой съёмки и геоинформационных систем для решения задач минеральных поисков. Такой подход особенно полезен в районах, где традиционные наземные исследования требуют значительных временных и материальных затрат.

Заключение

Современные методы прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых представляют собой взаимосвязанную систему геологических, геохимических, геофизических и дистанционных исследований. Каждый из перечисленных методов раскрывает отдельную сторону строения территории, однако наибольшую достоверность обеспечивает их комплексное применение. Геоинформационные системы и машинное обучение расширяют возможности обработки материалов, но не заменяют полевые наблюдения, бурение и лабораторную проверку. Перспективность участка должна подтверждаться совокупностью независимых признаков и соответствовать геологической модели предполагаемого месторождения. Дальнейшее совершенствование поисковых технологий будет способствовать более рациональному использованию финансовых ресурсов, повышению качества геологической информации и снижению экологической нагрузки при проведении разведочных работ.

Список литературы

1. Moon C. J., Whateley M. K. G., Evans A. M. *Introduction to Mineral Exploration*. 2nd ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2006.

2. Marjoribanks R. *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2010.
3. Evans A. M. *Ore Geology and Industrial Minerals: An Introduction*. 3rd ed. Oxford: Blackwell Science, 1993.
4. Rose A. W., Hawkes H. E., Webb J. S. *Geochemistry in Mineral Exploration*. 2nd ed. London: Academic Press, 1979.
5. Bonham-Carter G. F. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Oxford: Pergamon, 1994.
6. Carranza E. J. M. *Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS*. Amsterdam: Elsevier, 2009.
7. Dentith M., Mudge S. T. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
8. Pour A. B., Parsa M., Eldosouky A. M. (eds.). *Geospatial Analysis Applied to Mineral Exploration: Remote Sensing, GIS, Geochemical, and Geophysical Applications to Mineral Resources*. Elsevier, 2023. Издание и содержание книги.
9. Heran W. D. *USGS Mineral Deposit Models (Version 1.0)*. U.S. Geological Survey, Data Series 64, 2000. Материалы Геологической службы США.
10. *Mineral exploration employing drones, contemporary geological satellite remote sensing and geographical information system (GIS) procedures: A review*. Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2023. Vol. 31. Article 100988. Научная публикация.