ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-100-110

Выявление геохимических аномалий, связанных с Sn-W минерализацией в провинции Донг Ван, северо-восточный Вьетнам, с использованием статистических методов

Х. Т. Хунг
Ханойский университет горного дела и геологии, г. Ханой, Вьетнам
khuongthehung@humg.edu.vn

Аннотация
Изучение Sn-W комплексной (поликомпонентной) минерализации в провинции Донг Ван, северо-восточный Вьетнам, проводилось с использованием статистических и мультивариантных подходов на основе 890 проб донных отложений водных потоков, отобранных для анализа на 27 элементов. Результаты частотного анализа показали, что Sn, W, Pb, As, Bi, Li, Ta, Ce, Ag, Sb и Be имеют тесные связи с комплексными рудами, что означает, что эти элементы могут быть использованы в качестве поисковых индикаторов комплексной (поликомпонентной) минерализации. Кроме того, были проведены исследования с использованием корреляционных матриц и дендрограмм для разделения элементов в анализах проб донных отложений на две группы: связанные с комплексной минерализацией (подгруппы Be-Sn-W-Bi и, в меньшей степени, Li-Pb) и не связанные с минерализацией (подгруппы As-Cd-Sc-Cr-Ce-La, Co-Ni-V и Ga-Ge-Ba). Sn и W были признаны лучшими элементами-индикаторами минерализации, согласно результатам геохимического моделирования и расположению их аномалий в провинции. Более того, в провинции Донг Ван были выявлены обширные геохимические аномалии Sn и W (с использованием пороговых значений содержаний (среднее ± 3 STD)), что дает наиболее важные указания для поисков комплексной минерализации в провинции. Исследования также указывают на генетические связи между комплексной минерализацией провинции и системой разломов направления северо-запад – юго-восток и скрытыми гранитоидными блоками. В итоге проведенный статистический анализ содержаний (с использованием пороговых значений) в пробах донных отложений позволил выявить индикаторные элементы и их геохимические аномалии и использовать их в качестве эффективных инструментов при дальнейших поисках и разведке комплексной минерализации в провинции.

Ключевые слова
геохимические аномалии, Sn-W минерализация, статистические методы, Geostatistic, провинция Донг Ван, северо-восточный Вьетнам

Для цитирования
Hung K.T. Identification of geochemical anomalies associated with Sn-W mineralization in the Dong Van region, North-Eastern Vietnam, using statistical methods. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2022;7(2):100–110. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-100-110

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Research paper

Identification of geochemical anomalies associated with Sn-W mineralization in the Dong Van region, North-Eastern Vietnam, using statistical methods

K.T. Hung
Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam
khuongthehung@humg.edu.vn

Abstract
Sn-W multimetal mineralization in the Dong Van region, North-Eastern Vietnam was studied using statistical and multivariate approaches based on 890 samples of stream bottom sediments collected for assaying for 27 elements. The findings of frequency analysis demonstrated that Pb, As, Bi, Li, Sn, W, Ta, Ce, Ag, Sb, and Be have close ties with multimetal ores, implying that these elements can be used as prospecting indicators for multimetal mineralization. In addition, correlation matrix and dendrogram studies were also applied to subdivide the elements in the stream bottom sediment samples assays into two groups: associated with multimetal mineralization (Be-Sn-W-Bi, and, to a lesser extent, Li-Pb sub-groups) and not associated with the mineralization: (As-Cd-Sc-Cr-Ce-La, Co-Ni-V, and Ga-Ge-Ba sub-groups). Sn and W were found to be the best indicator elements for the mineralization, according to the findings of geochemical modeling

© Хунг Х. Т., 2022

and location of their anomalies in the region. Furthermore, extensive Sn and W anomalies were identified in the Dong Van region (using threshold values (mean ± 3 STD), providing the most important indications for multimetal mineralization prospecting in the region. The studies also suggest genetic ties between the region's multimetal mineralization and the northwest-southeast fault system and concealed granitoid blocks. Finally, the performed statistical analyses (with the use of threshold values) of stream bottom sediments assays allowed revealing indicator elements and their geochemical anomalies and using them as an effective tool in further prospecting and exploration for multimetal mineralization in the region.

Keywords
geochemical anomalies, Sn-W mineralization, statistical methods, Dong Van region, North-Eastern Vietnam

For citation
Hung K.T. Identification of geochemical anomalies associated with Sn-W mineralization in the Dong Van region, North-Eastern Vietnam, using statistical methods. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2022;7(2):100–110. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-100-110

Введение

Исследования минеральных ресурсов в значительной степени основаны на изучении донных отложений водных потоков, и многочисленные типы месторождений были выявлены этим способом в северо-восточном Вьетнаме [1, 2]. Однако обработка таких данных для поиска мультивариантных геохимических закономерностей и сигналов, связанных с минерализацией, является сложной задачей [3]. Анализ главных компонент является полезным методом анализа данных для сокращения числа переменных в наборе данных или выявления компонент, которые раскрывают скрытые закономерности в мультивариантных данных [4, 5]. Помимо базового анализа главных компонент, существует еще несколько видов анализа главных компонент [6, 7]. Эти методы могут использоваться с необработанными данными, логарифмически преобразованными данными, выбранными данными и другими типами данных [8].

Традиционные инструменты статистического анализа, такие как вероятностные графики, методы одномерного и мультивариантного анализа [8–10], фрактальные и мультифрактальные модели, были предложены для отделения геохимических аномалий от фона [11–14]. Рейманн с соавт. [15] сравнили различные статистические методы для определения пороговых значений содержаний элементов в аномалиях. Они обнаружили, что для оценки пороговых значений аномалий коробочные графики, медиана ± 2 медианных абсолютных отклонения и эмпирические кумулятивные функции распределения работают лучше, чем среднее ± 2 среднеквадратических отклонения. Фрактальные и мультифрактальные алгоритмы часто использовались для идентификации геохимических аномалий из-за пространственной автокорреляционной природы данных [16–18].

Провинция Донг Ван на северо-востоке Вьетнама считается весьма перспективным районом для обнаружения комплексных (многокомпонентных, т.е. Fe, Mn, Sn, W и Au) руд [1]. Более того, поскольку олово, вольфрам и золото обычно встречаются в ассоциации с мышьяковой минерализацией, такой как на As-Sn-W-Au месторождениях Nam Khi (Нам Хи), Lang Xum (Ланг Ксум), Lang Me (Ланг Меи) и Lang Lup (Ланг Луп), эта минерализация играет важную роль в качестве источника драгоценных металлов для промышленности[1] [19]. С 1965 г. по настоящее время эта провинция изучалась в масштабе 1:500 000–1:50 000 для целей геологического картирования и разведки полезных ископаемых [20–23]. Однако сбора геологических проб и обработки геохимических данных явно недостаточно для выявления перспективных на Sn-W минерализацию участков. Поэтому крайне важно провести дополнительные исследования в провинции Донг Ван на северо-востоке Вьетнама с целью выявления новых перспективных участков на комплексные руды.

Для обработки 890 геохимических проб были использованы статистические методы и мультивариантный анализ, позволяющие выявить проявления комплексной минерализации в провинции Донг Ван.

1. Геологическое строение

В пределах северо-восточного блока Вьетнамского сегмента расположена зона Сонг Хиен – 200-километровая тектоническая зона, простирающаяся с северо-запада на юго-восток и вмещающая пермско-триасовые и триасовые вулканогенно-осадочные толщи формации Сонг Хиен с подчиненными средне-позднепалеозойскими терригенно-карбонатными породами (рис. 1). Считается, что зона Сонг Хиен является внутриконтинентальным рифтовым бассейном возраста до позднего палеозоя – раннего мезозоя, связанным с Эмейшаньским плюмом [24–27] или внутридуговым бассейном возраста до позднего палеозоя – раннего мезозоя, образовавшимся в результате рифтообразования в пределах объединенной Индокитайской-Южнокитайской плиты [28].

Исследуемый участок относится к зоне Сонг Хиен на северо-востоке Вьетнама (рис. 1, *A*). Литологические разновидности пород, выделенные в провинции Донг Ван, представлены в основном триасовыми осадочными породами (мергелистый сланец, оолитовый известняк, алевролит, туфопесчаник, сланец, песчаник), девонскими, меловыми и пермскими осадочными отложениями (т.е. конгломерат, глинистый сланец, карбонатные породы и мергелистый песчаник). Кембрийские и ордовикские осадочные породы также присутствуют на периферии зоны Сонг Хиен; триа-

[1] USGS. Minerals Yearbook. United States Geological Survey: Reston, VA, USA (Геологическая служба Соединенных Штатов: Рестон, штат Вирджиния, США); 2014. https://doi.org/10.3133/mybvI

совые габбро и гранитоидные породы неизвестного возраста встречаются в центральной и западной части зоны [21–23, рис. 1, *B*]. Четвертичные отложения в основном встречаются вдоль долин (т.е. песчаник и гравелит). Провинция Донг Ван расположена в северной части зоны Сонг Хиен, простирающейся с северо-запада на юго-восток (рис. 1, *B*). Зона сбросо-сдвигов Као Банг-Ланг Сон-Тьен Йен в северной части и взброс Дуонг Тхуонг-Ду Гиа в южной части играют важную роль в контроле структурной зоны Сонг Хиен [20]. Интрузивные магматические породы на этом участке в значительной степени контролировались этими разломами и другими небольшими системами разломов, что способствовало формированию более сложной структуры участка [22].

На исследуемом участке обнаружена основная зона комплексной минерализации, а именно Донг Ван, которая простирается с северо-запада на юго-восток и занимает площадь 1 190 квадратных километров. Вмещающими для зоны I в основном являются триасовые осадочные породы [21–23, рис. 1, *B*]. Согласно Труену с соавт. [22] в этой минерализованной зоне были обнаружены неравномерные содержания Sn, W и As, как показано Тхангом с соавт. [29].

2. Материалы и методы исследований

2.1. Отбор и подготовка проб донных отложений

Геохимические методы разведки месторождений полезных ископаемых традиционно включают исследования проб донных отложений. Для данного исследования было отобрано 890 геохимических проб современных донных отложений по рекам и ручьям с интервалом 25–50 м. Поверхностные отложения (с глубины 0–3 см) отбирались ручным ковшом со всех точек (по обеим сторонам реки) с низкой скоростью течения, чтобы отобрать тонкий и современный

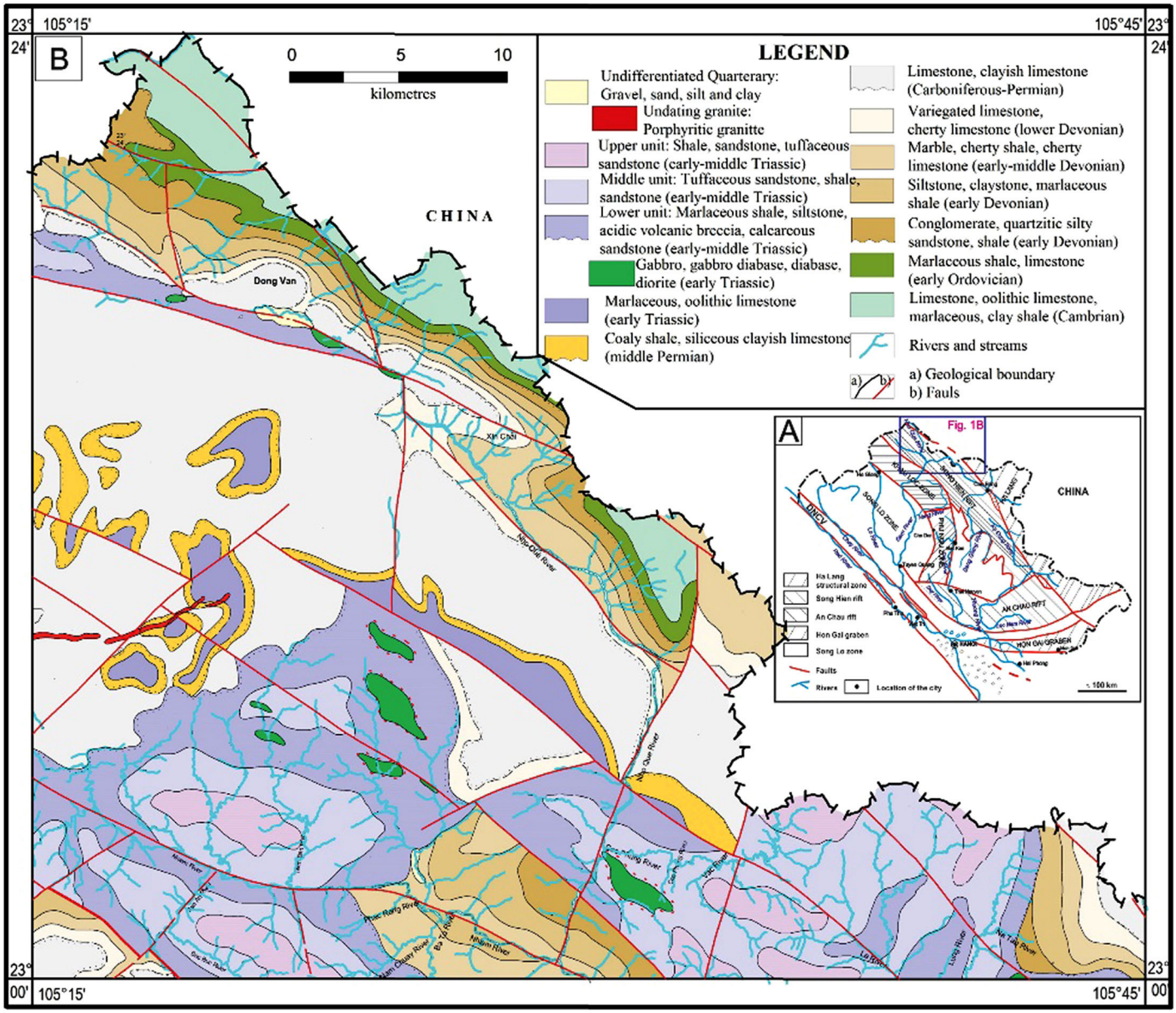

Рис. 1. Обзорная тектоническая карта северо-восточного Вьетнама, представляющая исследуемый участок (*A*) [20]; Упрощенная геологическая карта провинции Донг Ван (*B*) (изменено на основании [22])

материал. Каждая проба содержала около 25–130 г современных донных отложений, в зависимости от размера частиц пробы осадка (рис. 2).

Наборы проб были обработаны на основе учета различных характеристик донных отложений зоны. Кроме того, содержания 27 химических компонентов (элементов) были определены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) (Ag, As, Be, Ba, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Ga, Ge, La, Li, Mo, Nb, Ni, Pb, Sb, Sc, Sn, Sr, Ta, V, W, Y и Zn).

2.2. Преобразование данных

В данном исследовании было обработано 27 элементов (переменных) (Ag, As, Be, Ba, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Ga, Ge, La, Li, Mo, Nb, Ni, Pb, Sb, Sc, Sn, Sr, Ta, V, W, Y и Zn) в пробах донных отложений. Если переменные не демонстрировали асимметричного распределения, то для оценки нормального распределения каждой переменной использовали асимметрию (тест на статистическое распределение) и преобразованные переменные [30]. Кроме того, были разработаны десять моделей распределения (геометрическое, специальное дискретное, равномерное, треугольное, Парето, биномиальное, экспоненциальное, логнормальное, нормальное и гамма-преобразованное) для достижения нормального распределения и преобразования для асимметричных переменных [8, 31–33].

2.3. Мультивариантный анализ

Методы мультивариантного анализа используются для уточнения и объяснения корреляций между многочисленными факторами, связанными со статистическими данными в ходе оценки и сбора этих данных.

Программа Geostatistic 9.0 используется для изучения полученных коэффициентов корреляции и результатов кластерных исследований, которые помогают анализировать связи между элементами и группирование элементов.

Кластерный анализ направлен на уменьшение количества значимых подгрупп людей или вещей в обширной коллекции данных. Подразделение (группирование) данных осуществляется на основе сходства элементов по заранее определенным характеристикам.

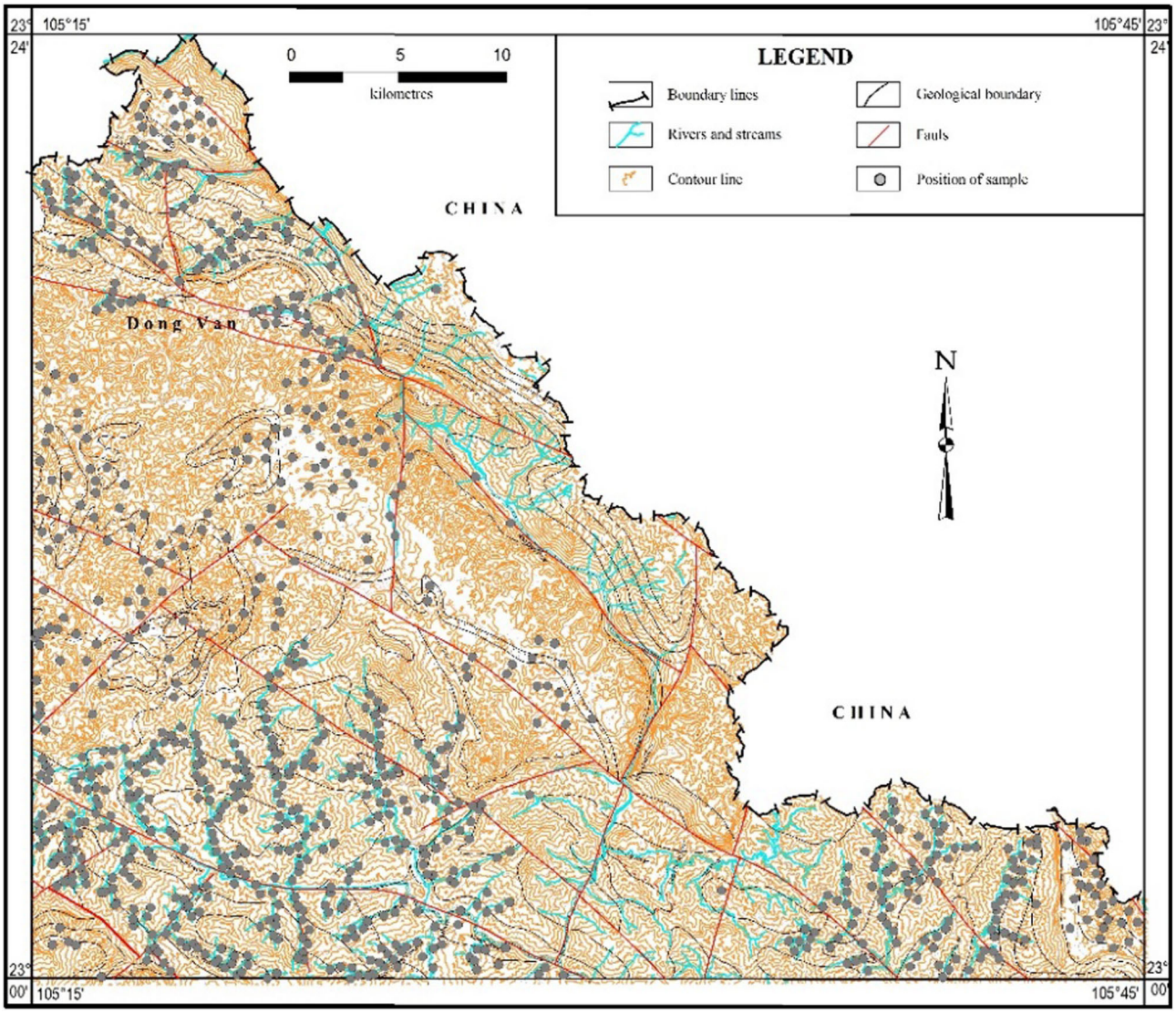

Рис. 2. Обзорная карта провинции Донг Ван, северо-восточный Вьетнам, с указанием точек отбора проб донных отложений (показаны черными точками)

Уорд [34] представил универсальный агломеративный иерархический метод кластеризации, в котором критерии выбора пары кластеров, объединяемых на каждом уровне, основаны на оптимальном значении целевой функции.

Собственные значения и собственные векторы используются для общего построения матриц ковариации и коэффициентов корреляции.

При этом для повышения факторных нагрузок был применен метод варимакс-вращения. Подход Уорда использовался для выполнения кластерного анализа коэффициентов корреляции Пирсона (или иерархического кластерного анализа), а результаты были представлены в виде дендрограммы.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Характеристики статистического распределения элементов

Модели статистического распределения элементов комплексных (поликомпонентных) руд и сопутствующих элементов могут быть использованы для выявления закономерностей их статистического распределения. Результаты статистического анализа геохимических данных по территории всей провинции были представлены отдельно. Полученная иерархия содержаний элементов была следующей: Pb > As > Bi > Li > Sn > W > Ta > Ce > Ag > Sb > Be > Mo > La > Nb > Cr > Ni > Cd > Y > Cu > Ba > Co > Sc > Zn > Sr > V (табл. 1). Более того, на Pb, As, Bi, Li, Sn, W, Ta, Ce, Ag, Sb и Be пришлось более 90 % от общего количества, что указывает на их очевидную связь с комплексными рудами. Наконец, эти элементы могут быть использованы в качестве индикаторов при поисках комплексной минерализации.

В данном исследовании геохимические пробы были статистически обработаны с использованием метода предела, соответствующего трем среднеквадратическим отклонениям (табл. 2). В качестве основных статистических показателей мы использовали среднее значение, дисперсию и коэффициент вариации. Кроме того, для проверки моделей распределения элементов и содержаний большинства элементов на основе критериев геометрического распределения были использованы методы асимметрии и эксцесса (табл. 3). Оценка моделей распределения и статистический анализ выполнялись с использованием программы Geostatistic 9.0 [35].

Таблица 1

Частотный анализ содержании элементов (г/т) в пробах донных осадков

Элемент	Количество информации (AI)	Объединение информации (IC)	Вероятность (%)	Элемент	Количество информации (AI)	Объединение информации (IC)	Вероятность (%)
Pb	0,573	0,573	**30,02**	Nb	0,337	1,842	96,49
As	0,572	0,810	**42,41**	Cr	0,313	1,868	97,87
Bi	0,564	0,987	**51,69**	Ni	0,235	1,883	98,64
Li	0,561	1,135	**59,46**	Cd	0,197	1,893	99,18
Sn	0,546	1,260	**65,98**	Y	0,190	1,903	99,68
W	0,527	1,365	**71,52**	Cu	0,095	1,905	99,80
Ta	0,512	1,458	**76,39**	Ba	0,082	1,907	99,89
Ce	0,492	1,539	**80,62**	Co	0,069	1,908	99,96
Ag	0,471	1,609	**84,31**	Sc	0,046	1,909	99,99
Sb	0,439	1,668	**87,39**	Zn	0,029	1,909	100
Be	0,435	1,724	**90,31**	Sr	0,000	1,909	100
Mo	0,413	1,773	92,87	V	0,000	1,909	100
La	0,369	1,811	94,86				

Примечание: AI и IC описаны в работе Хунга с соавт. (2020) [2].

Таблица 2

Статистические характеристики индикаторных элементов (г/т) в провинции Донг Ван

Параметры	Ag	As	Be	Pb	Bi	Sb	Ce	Sn	Ta	W	Ge	Li
Среднее	1,27	49,39	5,67	27,9858	0,98	19,2444	87,55	14,6279	23,0603	19,7104	5,5618	46,403
Медианное	0,33	27,63	1,90	23,31	0,47	3,2	78,15	8,805	5,255	5,87	5	33,715
Мода	18,54	49,00	31,60	10,77	4,03	37,24	64,05	49,07	20,63	48,02	0	40,19
Среднеквадратическое отклонение	13,10	75,83	29,49	21,7042	3,62	60,9511	40,018	45,4845	46,9017	61,1201	1,579	47,3386
Дисперсия	171,60	5750,53	869,61	471,0731	13,09	3715,039	1601,45	2068,839	2199,772	3735,672	2,4934	2240,944
Коэффициент дисперсии	1029,03	153,55	520,29	77,55	371,94	316,72	45,71	310,94	203,39	310,09	28,39	102,02
Асимметрия распределения	25,87	6,32	14,85	2,252	18,13	6,19	2,35	14,913	4,109	9,053	2,463	7,51
Эксцесс распределения	717,33	52,41	270,95	9,444	384,99	47,879	7,91	273,92	22,217	106,11	4,073	83,746
Минимальное	0,04	2,00	0,10	0,77	0,03	0,24	16,05	0,07	0,13	0,02	5	5,69
Максимальное	370,70	945,65	636,31	209,29	85,61	743,58	337,75	986,44	415,76	967,95	10	703,89
Итог	1132,97	43954	5044,38	24907,39	865,90	17127,49	77916,67	13018,85	20523,7	17542,25	4950	41298,7

Правила распределения индикаторных элементов не соответствовали нормальному стандартному распределению, но соответствовали геометрическому распределению согласно характеристикам статистического распределения Sn и W во вторичных геохимических ореолах (рассеяния (табл. 3). Общие содержания Sn и W выше кларковых (Sn* = 2,5 г/т, W* = 1,3 г/т [36]), а распределения содержаний Sn и W варьируют от неравномерных до крайне неравномерных. Исходя из этого можно выделить различные геохимические аномалии на локальном уровне. Это указывает на то, что Sn и W могут образовывать небольшие первичные геохимические аномалии. Эти данные могут позволить выявить первичные геохимические ореолы рассеяния, которые, в свою очередь, могут быть использованы для определения перспективных на Sn-W объектов минерализации в провинции Донг Ван.

3.2. Применение корреляционного анализа и кластерного анализа

Результаты корреляционного анализа позволяют составить матрицу парной корреляции элементов, являющихся наилучшими индикаторными элементами всего геохимического ландшафта (схемы рассеяния элементов) провинции. В табл. 4 представлена матрица парной корреляции элементов. Среди индикаторных элементов Be, Sn, W и Bi демонстрируют очевидную корреляцию, особенно Sn и W, что определяет данную ассоциацию элементов как индикаторный признак для поисков комплексных руд. Li также продемонстрировал заметную корреляцию с Be и Bi, что указывает на участие Li в рудообразующих процессах.

Таким образом, расчеты показали тесные корреляционные связи между Be, Sn, W и Bi, что свидетельствует о формировании ими устойчивой ассоциации.

Таблица 3

Испытания моделей статистического распределения Sn и W

Распределение (модель)	Sn, г/т							W, г/т						
	Отклонение	Фактическое отклонение	Критерий хи-квадрат (18,307)	Соответствие критерию хи-квадрат	λ (1,358)	Соответствие критерию Колмогорова-Смирнова	Синтезатор	Отклонение	Фактическое отклонение	Критерий хи-квадрат (18,307)	Соответствие критерию хи-квадрат	λ (1,358)	Соответствие критерию Колмогорова-Смирнова	Синтезатор
Геометрическое	2,486	1	3,267	1-Да	0,160	**1-Да**	0,300	5,045	1	31,429	1-Нет	0,345	**1-Да**	1,973
Гамма	24,441	2	61,592	2-Нет	1,562	2-Нет	4,515	22,369	2	51,685	2-Нет	1,470	2-Нет	3,906
Логнормальное	61,402	3	164,788	3-Нет	3,412	3-Нет	11,514	32,496	3	88,052	3-Нет	1,889	3-Нет	6,201
Специальное дискретное	104,029	5	459,352	4-Нет	7,294	5-Нет	30,463	58,635	4	147,230	4-Нет	3,282	4-Нет	10,459
Парето	115,827	6	487,814	5-Нет	7,537	6-Нет	32,196	98,299	5	412,558	5-Нет	6,929	5-Нет	27,638
Экспоненциальное	94,306	4	606,050	6-Нет	6,356	4-Нет	37,7853	111,040	6	449,417	6-Нет	7,227	6-Нет	29,871
Биномиальное	287,065	10	926,397	7-Нет	20,737	10-Нет	65,874	281,168	10	1223,811	7-Нет	20,239	10-Нет	81,753
Нормальное	266,722	9	2150,286	8-Нет	14,912	7-Нет	128,438	260,992	9	2059,889	8-Нет	14,689	7-Нет	123,336
Треугольное	234,503	7	4426,587	9-Нет	17,320	8-Нет	254,552	231,131	7	4598,079	9-Нет	17,081	8-Нет	263,743
Равномерное	251,125	8	8564,185	10-Нет	18,822	9-Нет	481,669	244,535	8	8120,654	10-Нет	18,324	9-Нет	457,075

Примечание: Тест Колмогорова-Смирнова был выполнен в работе Чакраварти с соавт. [31]

Таблица 4

Коэффициент корреляции индикаторных элементов (г/т) в пробах донных осадков

	Ag	As	Be	Bi	Ce	Li	Pb	Sb	Sn	Ta	W
Ag	1										
As	0,032	1									
Be	0,062	0,445	1								
Bi	0,051	0,205	**0,711**	1							
Ce	0,026	0,262	0,082	0,142	1						
Li	0,044	0,425	**0,569**	**0,542**	0,386	1					
Pb	–0,009	0,310	0,173	0,057	0,331	0,333	1				
Sb	0,071	0,407	0,392	0,499	0,437	0,465	–0,027	1			
Sn	0,006	**0,623**	**0,645**	0,213	–0,027	0,377	0,325	0,106	1		
Ta	–0,021	–0,019	–0,045	–0,036	–0,000	–0,078	0,110	–0,073	0,041	1	
W	0,018	0,438	**0,588**	0,412	–0,048	0,400	0,264	0,176	**0,666**	0,138	1

Для определения корреляционных связей между изучаемыми элементами во вторичных геохимических ореолах рассеяния в провинции Донг Ван на основе результатов парно-корреляционного анализа была построена дендрограмма (рис. 3). Для статистической оценки этих связей использовались коэффициенты корреляции Пирсона.

Дендрограмма отображает ассоциации между изученными элементами и позволяет объединять их в группы/подгруппы. Элементы, связанные с комплексной минерализацией, представлены двумя подгруппами – Be-Sn-W-Bi и, в меньшей степени, Li-Pb. В то же время можно выделить три другие подгруппы — As-Cd-Sc-Cr-Ce-La, Co-Ni-V и Ga-Ge-Ba, не связанные с минерализацией. Например, на дендрограмме также видна локальная ветвь Co-Ni-V, указывающая на то, что Co, Ni и V не являются сингенетичными компонентами комплексных руд в данной провинции.

Для определения значимости ассоциации сингенетичных элементов для поисков комплексных руд в исследуемой провинции использовалась комбинация мультивариантной корреляции и анализа дендрограмм. В результате Be, Sn, W и Bi были признаны членами сингенетической ассоциации. Несмотря на высокие содержания некоторых других элементов в пробах, их нельзя рассматривать как индикаторы комплексной минерализации (или какой-то другой минерализации) в этой провинции.

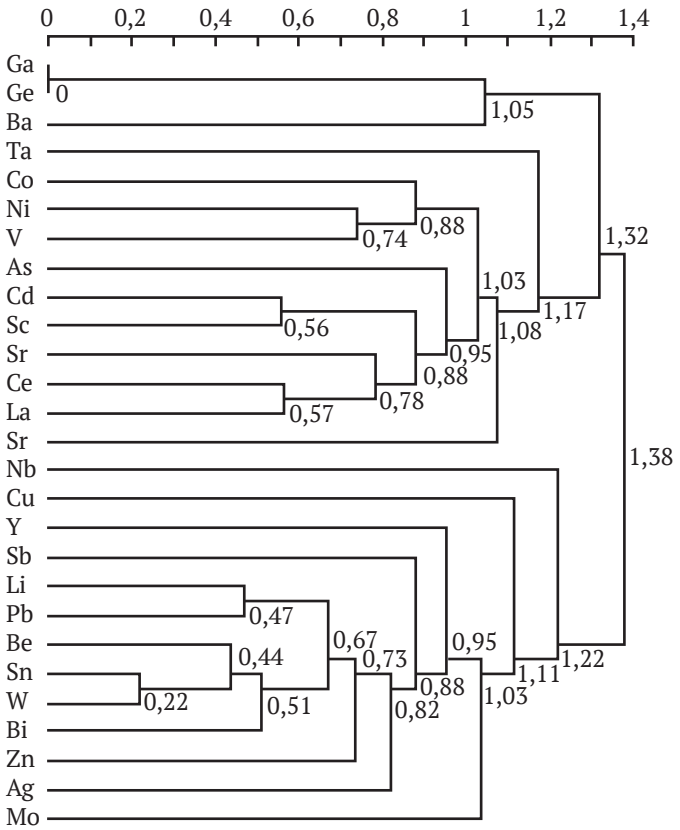

Рис. 3. Дендрограмма содержаний элементов в геохимическом ландшафте провинции Донг Ван (г/т). Цифры указывают расстояния между кластерами в кластерном анализе, полученные на основе алгоритма агломеративной кластеризации Уорда

3.3. Моделирование геохимических аномалий

Вторичное геохимическое рассеяние – это перемещение элементов на поверхности Земли или непосредственно под ней, которое происходит в результате выветривания, эрозии и осаждения. Внешние обстоятельства могут разрушать и изменять рудные тела, зоны минерализации и изменять геохимический ландшафт региона. Некоторые минералы могут растворяться, вымываться, и некоторые элементы могут мигрировать прочь, в то время как другие могут накапливаться с увеличением их содержания. Значимые элементы вторичных геохимических ореолов перераспределяются в условиях выветривания. Ореолы рассеяния могут быть значительно больше, чем первичные рудные тела. Вторичные геохимические ореолы рассеяния и выявленные геохимические аномалии имеют решающее значение при поисках скрытых месторождений полезных ископаемых в регионе. Диаграммы геохимических аномалий были использованы для представления пространственных вариаций содержаний элементов в регионе (провинции) и прогнозирования перспективных участков комплексной минерализации.

Были построены вторичные геохимические аномалии Sn и W, представляющие пространственное распределение этих эффективных индикаторных элементов, для поисков комплексных руд в провинции Донг Ван. Построение диаграмм геохимических аномалий этих элементов направлено на выявление распределения и накопления индикаторных элементов в определенных местах (рис. 4, 5). Это позволяет интерпретировать и выделить аномалии, связанные с минерализацией, и исключить аномалии, не свидетельствующие о какой-либо минерализации.

Для выявления перспективных аномалий были построены изолинии содержаний Sn и W (индикаторных элементов) на основе трех заданных порогов (содержаний) аномалий и нанесены на карту с учетом значений геохимического фона. Пороги аномалий первого порядка (среднее ± 1 среднеквадратическое отклонение), второго порядка (среднее ± 2 среднеквадратических отклонения) и третьего порядка (среднее ± 3 среднеквадратических отклонения) были выбраны с использованием результатов статистической обработки для оценки значений геохимического фона на основе локальных средних значений (табл. 5, рис. 4, 5). Для этого на основе геометрического распределения были рассчитаны значения средних и среднеквадратических отклонений. Геохимические аномалии, связанные с комплексной минерализацией, могут быть выбраны, а геохимические аномалии, не связанные с минерализацией, могут быть отвергнуты на основе диаграмм геохимических аномалий для индикаторных элементов в сочетании с данными поисковых работ для проверки геохимических аномалий.

Геохимические аномалии Sn и W отражают рудопроявления олова в минерализованной зоне. Геохимические аномалии индикаторных элементов были выявлены на трех отдельных участках, как показано на рис. 5. Эти аномалии часто имеют эллиптическую форму, вытянутую в направлении северо-запад – юго-восток в соответствии с установленной ориентацией

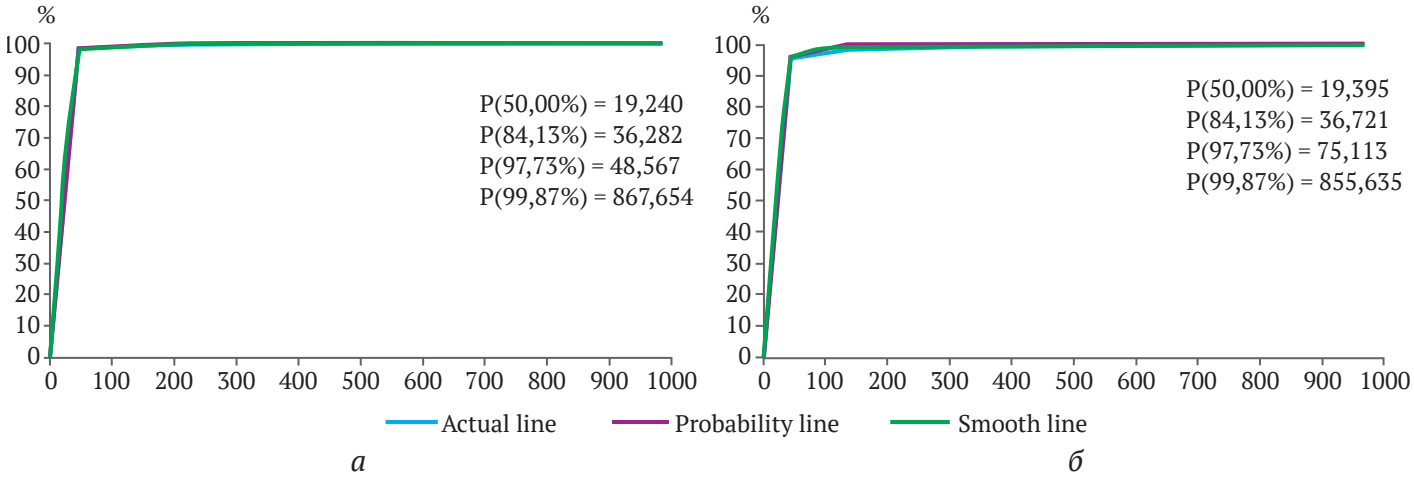

Рис. 4. Графики нахождения (содержаний) Sn (*а*) и W (*б*) на основе их распределения в провинции Донг Ван, показывающие вероятность при трех порогах аномалии и фоне

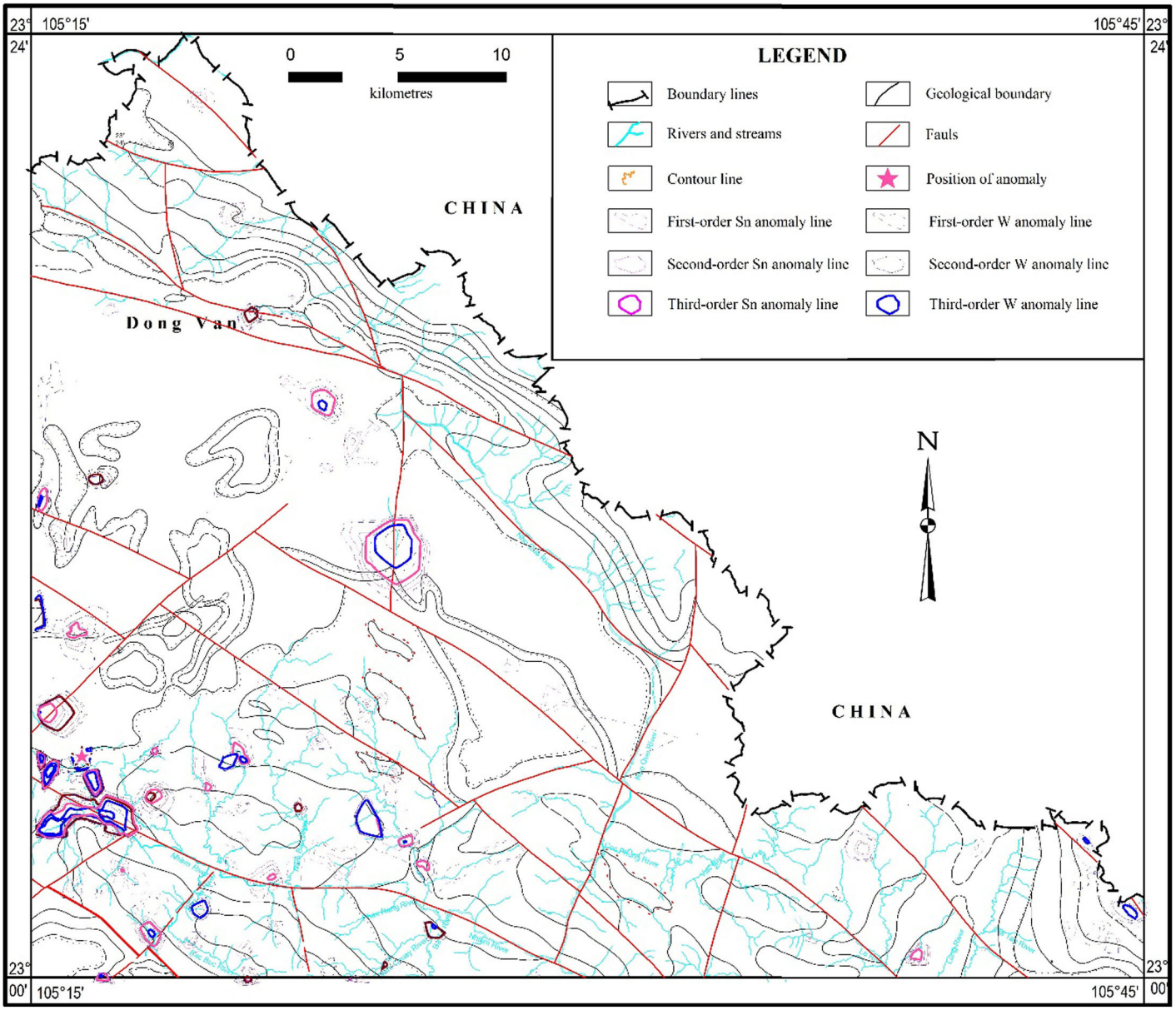

Рис. 5. Обзорная карта провинции Донг Ван, на которой показана Sn-W аномалия, указывающая на перспективный участок

Таблица 5

Содержание Sn и W в провинции Донг Ван на основе пороговых значений аномалий с использованием расчетного, теоретического и вероятностного среднеквадратического отклонения

Элемент г/т	Метод	Кларк	Фоновое содержание	Аномалия с порогом первого порядка	Аномалия с порогом второго порядка	Аномалия с порогом третьего порядка	Аномалия
Sn	Расчетное среднеквадратическое отклонение (CSD)	2,5	19	65	110	156	156
	Теоретическое среднеквадратическое отклонение (TSD)	2,5	19	19	20	20	20
	Среднеквадратическое отклонение вероятности (PSD)	2,5	19	38	57	76	76
	Распределение вероятности (PPD)	2,5	19	36	49	868	868
W	Расчетное среднеквадратическое отклонение (CSD)	1,3	19	81	142	203	203
	Теоретическое среднеквадратическое отклонение (TSD)	1,3	19	20	20	20	20
	Среднеквадратическое отклонение вероятности (PSD)	1,3	19	38	56	75	75
	Распределение вероятности (PPD)	1,3	19	37	75	856	856

Примечание: Кларковые значения для индикаторных элементов (Sn* = 2,5 г/т, W* = 1,3 г/т) были взяты из Фортескью [32].

зоны минерализации. Большинство геохимических аномалий приурочено к зоне распространения формации Сонг Хиен. Выявленные геохимические аномалии, особенно олова и вольфрама, прилегающие к минерализованной зоне, относительно крупные и имеют сложную форму, что может указывать на присутствие скрытых рудных тел, связанных с гранитоидным массивом. Геохимические аномалии, не имеющие связи с минерализацией, часто представлены ограниченными вторичными скоплениями, расположенными на локальных склонах и подобных формах рельефа.

Выводы

Комплексная минерализация в провинции Донг Ван, северо-восточный Вьетнам, была изучена с использованием статистических и мультивариантных аналитических подходов на основе 890 геохимических проб донных отложений водных потоков. Результаты частотного анализа показали, что Sn, W, Pb, As, Bi, Li, Ta, Ce, Ag, Sb и Be имеют тесные связи с комплексными рудами, что означает, что эти элементы могут быть использованы в качестве поисковых индикаторов комплексной (поликомпонентной) минерализации. Кроме того, в провинции Донг Ван были выявлены обширные геохимические аномалии Sn и W, которые являются наиболее важными индикаторными указаниями для поисков комплексной минерализации в этой провинции. В изученном регионе исследования корреляционных матриц и дендрограмм также были использованы для разделения элементов в анализах проб донных отложений на две группы: связанные с комплексной (поликомпонентной) минерализацией (подгруппы Be-Sn-W-Bi и, в меньшей степени, Li-Pb) и не связанные с минерализацией (подгруппы As-Cd-Sc-Cr-Ce-La, Co-Ni-V и Ga-Ge-Ba).

Затем было применено пороговое значение (среднее ±3 среднеквадратических отклонения) для определения местоположений аномалий индикаторных элементов (и фоновых уровней), связанных с известной комплексной минерализацией в провинции. Таким образом, такие аномалии могут стать перспективным инструментом для дальнейших поисков и разведки комплексной минерализации.

В этом отношении Sn и W являются лучшими элементами-индикаторами данной минерализации, согласно результатам геохимического моделирования и с учетом расположения их аномалий в провинции. Исследования также указывают на генетические связи между комплексной минерализацией провинции и системой разломов направления северо-запад – юго-восток и скрытыми гранитоидными блоками.

Общее заключение

В итоге проведенный статистический анализ содержаний (с использованием пороговых значений) в пробах донных отложений позволил выявить индикаторные элементы и их геохимические аномалии и использовать их в качестве эффективных инструментов при дальнейших поисках и разведке комплексной минерализации в провинции.

Список литературы / References

1. Tri T.V., Khuc V. (eds.). *Geology and Earth Resources of Vietnam*. General Department of Geology and Minerals of Vietnam: Publishing House for Science and Technology. 2011. 645 p.

2. Hung K.T., Sang P.N., Phuong N. et al. Statistical evaluation of the geochemical data for prospecting complex mineralization in the Suoi Thau-Sang Than region, Northeast Vietnam. *Geology, Geophysics and Environment*. 2020;46(4):285–299. https://doi.org/10.7494/geol.2020.46.4.285

3. Carranza E. J. M. Usefulness of stream order to detect stream sediment geochemical anomalies. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2005;4(4):341–352. https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-040

4. Cheng Q., Jing L., Panahi A. Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement. *International Journal of Remote Sensing*. 2006;27(16):3387–3401. https://doi.org/10.1080/01431160600606882

5. Reimann C., Filzmoser P., Garrett R. G., Dutter R. *Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R*. Wiley, Chichester, UK; 2008. 362 p. https://doi.org/10.1002/9780470987605

6. Cheng Q., Bonham-Carter G., Wang W., Zhang S., Li W., Qinglin X. A spatially weighted principal component analysis for multi-element geochemical data for mapping locations of felsic intrusions in the Gejiu mineral district of Yunnan, China. *Computers and Geosciences*. 2011;37(5):662–669. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.11.001

7. Zuo R. Identification of geochemical anomalies associated with mineralization in the Fanshan district, Fujian, China. *Journal of Geochemical Exploration*. 214;139:170–176. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.08.013

8. Aitchison J. *The Statistical Analysis of Compositional Data*. Chapman & Hall, London; 1986. 416 p. https://doi.org/10.1002/bimj.4710300705

9. Tukey J. W. *Exploratory data analysis*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company; 1977. 688 p. https://doi.org/10.1177/014662167800200115

10. Sun X., Deng J., Gong Q. et al. Kohonen neural network and factor analysis based approach to geochemical data pattern recognition. *Journal of Geochemical Exploration*. 2009;103(1):6–16. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2009.04.002

11. Mandelbrot B.B. *The fractal geometry of nature*. Freeman, San Francisco; 1983. 468 p.

12. Agterberg F. P. Multifractal modeling of the sizes and grades of giant and supergiant deposits. *International Geology Review*. 1995;37(1):1–8. https://doi.org/10.1080/00206819509465388

13. Wang Q. F., Deng J., Zhao J. et al. Tonnage-cutoff model and average grade-cutoff model for a single ore deposit. *Ore Geology Reviews*. 2010;38(1–2):113–120. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.07.003

14. Yang L. Q., Wang Q. F., Liu X. F. Correlation between mineralization intensity and fluid-rock reaction in the Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: constraints from petrographic and statistical approaches. *Ore Geology Reviews*. 2015;71:29–39. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.04.005

15. Reimann C., Filzmoser P., Garrett R. G. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*. 2005;346(1–3):1–16. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.023

16. Cheng Q. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*. 2007;32(1–2):314–324. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.10.002

17. Sun X., Gong Q., Wang Q. et al. Application of local singularity model to delineate geochemical anomalies in Xiong'ershan gold and molybdenum ore district,Western Henan province, China. *Journal of Geochemical Exploration*. 2010;107(1):21–29. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.06.001

18. Zuo R., Xia Q., Zhang D. A comparison study of the C–A and S–A models with singularity analysis to identify geochemical anomalies in covered areas. *Applied Geochemistry*. 2013;33:165–172. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.02.009

19. Graedel T. E., Harper E. M., Nassar N. T., Reck B. K. On the materials basis of modern society. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013;112(20):6295–6300. https://doi.org/10.1073/pnas.1312752110

20. Dovzhikov A. E., My B. P., Vasilevskaya E. D. et al. *Geology of North Vietnam*. Hanoi: Science and Technology Publishing House; 1965. 650 p. (In Russ.)

21. Tinh H. X. (ed.). *Report on results of geological mapping and mineral investigation of Bao Lac sheet at 1:200.000 scale*. Geological Department of Vietnam, Ha Noi; 1976. (In Vietnamese)

22. Truyen M. T. (ed.). *Report on results of geological mapping and mineral investigation of Bao Lac sheet at 1:50.000 scale*. Geological Department of Vietnam, Ha Noi; 1977. (In Vietnamese)

23. Tri T. V. (ed.). *Report on results of geological and mineral potential mapping of Bao Lac-Bac Quang-Ma Quang at 1:200.000 scale*. Geological Department of Vietnam, Ha Noi; 2000 (In Vietnamese)

24. Izokh A. E., Polyakov G. V., Hoa T. T., Balykin P. A., Phuong N. T. Permian–Triassic ultramafic–mafic magmatism of Northern Vietnam and Southern China as expression of plume magmatism. In: *32nd International Geological Congress*. 2005;46:942–951. (In Russ.)

25. Hoa T. T., Anh T. T., Phuong N. T. et al. Permo-Triassic intermediate–felsic magmatism of the Truong Son belt, eastern margin of Indochina. *ComptesRendus Geoscience*. 2008;340(1–2):112–126. https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.12.002

26. Polyakov G. V., Shelepaev R. A., Hoa T. T. et al. The Nui Chua layered peridotitegabbro complex asmanifestation of Permo-Triassic mantle plume in northern Vietnam. *Russian Geology and Geophysics*. 2009;50(6):501–516. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.10.002

27. Vladimirov A.G., Balykin P.A., Anh P.L. et al. The Khao Que-Tam Tao gabbro-granite massif, Northern Vietnam: a petrological indicator of the Emeishan plume. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2012;6:395–411. https://doi.org/10.1134/S1819714012050065

28. Hai T.T., Thanh N.X., Halpin J.A., Zaw K. The occurrence of ophiolite-style assemblages along Sino-Vietnam border, Northeastern Vietnam and its implication to the tectonic evolution of Northeastern Indochina. In: *Proceedings of the International Conference on Geology. Geotechnology and Mineral Resources of Indochina (GEOINDO 2011), KhonKaen*. 2011. Pp. 479–488.

29. Thang P.V. (ed.). *Report on the results of prospecting Sn-W mineralization and accompaning minerals in the northwestern Ha Giang area*. Geological Department of Vietnam, Ha Noi; 1988. (In Vietnamese)

30. Reimann C., Filzmoser P. Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology*. 2000;39:1001–1014. https://doi.org/10.1007/s002549900081

31. Chakravarti R., Laha G., Roy J. *Handbook of Methods of Applied Statistics. Volume I*. John Wiley and Sons; 1967. 160 p.

32. Egozcue J.J., Pawlowsky-Glahn V., Mateu-Figueras G., Barceló-Vidal C. Isometric logratio transformations for compositional data analysis. *Mathematical Geology*. 2003;35:279–300. https://doi.org/10.1023/A:1023818214614

33. Carranza E.J.M. Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratiotransformed stream sediment data with censored values. *Journal of Geochemical Exploration*. 2011;110(2):167–185. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.05.007

34. Ward J.H.Jr. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 1963;58:236–244. https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845

35. Robertson G.P. *GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences*. Gamma Design Software, Plainwell: Michigan USA; 2008. URL: https://softbooks.pl/gammadesign/files/download/gsplususerguide.pdf

36. Fortescue J.A.C. Landscape geochemistry-retrospect and prospect–1990. *Applied Geochemistry*. 1992;7(1):1–53. https://doi.org/10.1016/0883-2927(92)90012-R

Информация об авторе

Хуонг Те Хунг – доктор наук (науки о Земле), преподаватель, кафедра поисково-разведочной геологии, Ханойский университет горного дела и геологии, г. Ханой, Вьетнам; ORCID 0000-0003-1544-6470, Scopus ID 36716173500; e-mail khuongthehung@humg.edu.vn

Information about the author

Khuong The Hung – Dr. Sci. (Earth Sci.), Lecturer, Department of Prospecting and Exploration Geology, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam; ORCID 0000-0003-1544-6470, Scopus ID 36716173500; e-mail khuongthehung@humg.edu.vn

Поступила в редакцию	21.01.2022	**Received**	21.01.2022
Поступила после рецензирования	17.05.2022	**Revised**	17.05.2022
Принята к публикации	18.05.2022	**Accepted**	18.05.2022