

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ И АССОЦИАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛУМБИНСКОГО ПЕРСПЕКТИВНОГО УЧАСТКА (КЕМСКИЙ ТЕРРЕЙН, СИХОТЭ-АЛИНЬСКИЙ СКЛАДЧАТЫЙ ПОЯС)

С. Л. Шевырев<sup>1</sup> , Н. Г. Борискина<sup>\*,1</sup> , и В. В. Ивин<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

\* **Контакт:** Наталья Георгиевна Борискина, boriskina2000@mail.ru

Объекты коренного благороднометалльного оруденения складчатых поясов периферии Северо-Азиатского и Сино-Корейского кратонов характеризуются небольшими ресурсами и площадями, что требует для их обнаружения наращивания научно-технического потенциала. В пределах Сихотэ-Алиньского надсубдукционного горно-складчатого сооружения (типичного примера упомянутых складчатых поясов) установлены террейны различного возраста, представляющие собой дислоцированный фундамент аккреционного, островодужного или турбидитового генезиса, прорванный интрузиями и перекрытый вулканогенно-осадочным чехлом. Проведенные исследования охватывают территорию островодужного Кемского террейна, который занимает протяженные площади континентального побережья Татарского пролива. Золотосеребряные месторождения здесь связаны с формированием и развитием активной вулканической окраины. Генезис рудных объектов – эпitherмальный, связанный с интрузивно-эффузивными сериями верхнего мела-палеогена. Детальные полевые литогеохимические исследования проводились на перспективном Колумбинском участке, где развиты верхнеюрско-нижнемеловые кремнисто-терригенные породы, прорванные меловыми интрузиями гранитоидов татибинского и ольгинского комплексов. Изучение геохимических особенностей выполнялось с помощью метода главных компонентов, эффективного способа уменьшения размерности и фильтрации данных. Имплементация этого метода при обработке результатов спектрального анализа поисковых геохимических проб позволяет выявить ассоциации элементов, объединяемых в главные компоненты, и установить их пространственное распределение, которое обусловлено размещением структурно-вещественных комплексов изучаемой территории. Нахождение числа главных компонентов производилось с помощью величины общей совокупной дисперсии, вычисленной для этих компонентов. Построенные карты пространственного распределения главных компонентов, включающих ассоциации элементов, позволили уточнить положение локальных геохимических экстремумов. Группировка элементов в главных компонентах с помощью значений их векторных нагрузок позволила сделать вывод о наличии этапности в рудообразовании на перспективном Колумбинском участке. В дальнейшем проведенное исследование может послужить стимулом для досконального и обстоятельного изучения минерации рассматриваемой территории.

**Ключевые слова:** вулканические пояса, машинное обучение, геологическое картирование, метод главных компонентов, поисковая геохимия.

**Цитирование:** Шевырев, С. Л., Н. Г. Борискина, и В. В. Ивин Использование метода главных компонентов для анализа геохимических данных и ассоциаций элементов Колумбинского перспективного участка (Кемский террейн, Сихотэ-Алиньский складчатый пояс) // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES2008. — DOI: 10.2205/2024es000875 — EDN: UAOPSH

<https://elibrary.ru/uaopsh>

Получено: 6 июля 2023 г.

Принято: 3 октября 2023 г.

Опубликовано: 20 мая 2024 г.



© 2024. Коллектив авторов.

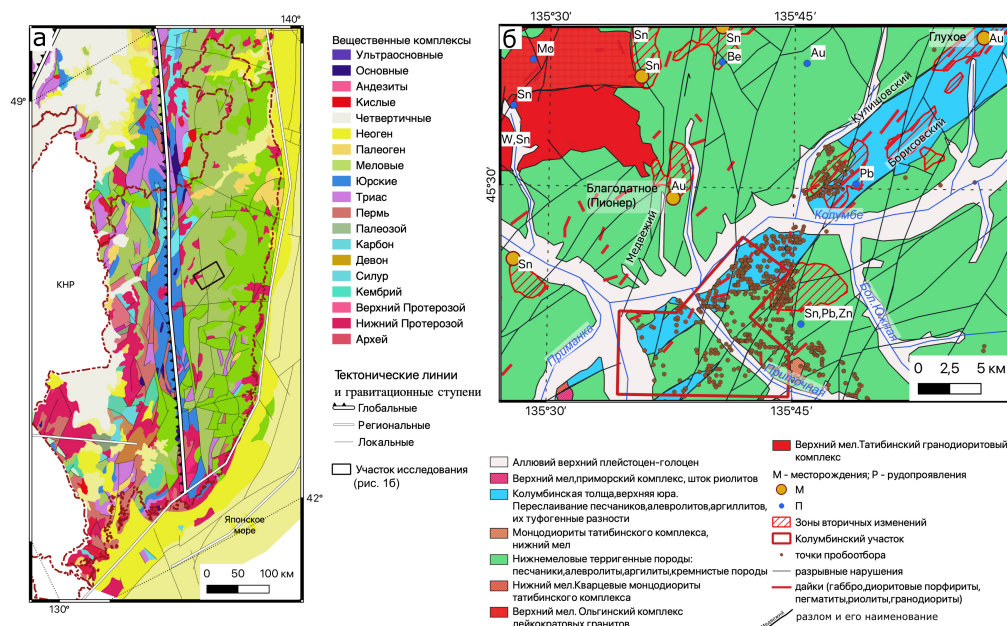
## 1. Введение

Экономическое развитие Дальнего Востока России требует возобновления поисковых работ и наращивания ресурсного потенциала рудного и благороднометалльного сырья. Работами предшественников описаны основные закономерности размещения крупных и средних месторождений в пределах Тихоокеанской континентальной окраины [Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. 2006; Лызганов и др., 2013; 2020], в частности, их приуроченность к дизъюнктивам общепланетарного и регионального значения, а также границам контура проекции океанического слэба, стагнированного в транзитной зоне мантии [Уткин, 2005; Khomich et al., 2014]. Площадные геохимические поиски по вторичным ореолам рассеяния являются источником данных об эволюции геохимических процессов и совместном нахождении химических элементов в приповерхностной зоне земной коры. Территория исследований, включающая Колумбинский участок проведения геохимических работ, располагается в пределах Кемской металлогенической зоны Восточно-Сихотэ-Алиньского магма-металлогенического пояса, совпадающего пространственно и структурно с островодужным Кемским террейном Сихотэ-Алиньского горно-складчатого пояса. Целью проводимого исследования является описание закономерностей распределения химических элементов в элювиально-делювиальных отложениях Колумбинской площади и формирование ими вторичных ореолов рассеяния, совместное поведение элементов и соответствие выявленных аномалий химических элементов структурно-вещественным особенностям территории. Поставленная цель предопределила выбор решаемых задач: предварительную обработку и очистку данных поисковой геохимической съемки; уменьшение размерности данных с помощью метода главных компонент (МГК, РСА); обоснование выбора оптимального количества главных компонент (ГК, РС); оценка собственных значений главных компонент и анализ роли отдельных химических элементов в компонентах; графическое представление и интерпретация полученных результатов.

## 2. Материалы и методы исследования

Полевой материал для проведения исследования был получен на Колумбинском перспективном участке, который расположен в пределах Кемского террейна Сихотэ-Алиньского горно-складчатого сооружения. Территория поисков прилегает к месторождениям Благодатное (Пионер) и Глухое, и, по-видимому, обладает с ними общностью истории геологического развития и минерации. В качестве источника геохимических данных взяты результаты анализов штучных проб, отобранных Колумбинской поисковой партией ОАО «Примгеология» в 2011–2013 годах. Исследования проб были проведены с помощью спектрального, спектрозолотометрического, атомно-абсорбционного и химического анализов. Таблица аналитических данных включает 898 значений, описывающих содержание в штучках 17 химических элементов (Sn, Pb, Zn, Cu, Ag, V, Cr, Ni, Mn, Ti, Co, Mo, W). Пробы были отобраны по нерегулярной сети с шагом опробования 30–500 м, охватившей около 400 км<sup>2</sup> территории. Площадь опробования включала ареал распространения меловых гранитоидов татибинского и ольгинского комплексов, а также диоритов и габбро дальнегорского комплекса. Указанные магматиты прорывают верхнеюрские и нижнемеловые породы фундамента Восточно-Сихотэ-Алиньского вулканоплутонического пояса, с чем связано развитие ореолов вторичных гидротермальных изменений во вмещающих породах. Территория имеет разветвленную гидросеть, образованную р. Колумбе (правый приток р. Бол. Уссурка) и ее притоками. Аллювий гидросети имеет существенную мощность (рис. 1). В геологическом строении участка играют роль осадочный фундамент Кемского террейна, включающий сложнодислоцированные породы колумбинской толщи верхней юры, развитой на территории исследования почти исключительно в пределах Колумбинского свода, ограниченного Кулишовским и Борисовским разломами, журавлевской, ключевской, устьколумбинской и приманкинской свит, среди которых описаны песчаники, алевролиты, кремнисто-глинистые породы, базальты, туфы и туффиты. Эти

породы прорываются гранитоидами татибинского (нижний мел), ольгинского и приморского (верхний мел) комплексов. На территории, прилегающей к Колумбинскому участку, татибинский комплекс представлен двумя фазами внедрения: первая включает многочисленные дайки северо-восточного простирания (40–60°), состоящих из диоритов, диорит-порфириров, габбро, монцодиоритов; вторая фаза обособливается в виде крупного Приискового массива гранитоидов, обнажающегося на северо-западе территории исследований (рис. 1б). Радиологические датировки пород первой фазы U–Pb (SHRIMP) составляют 103,2–107,1 млн лет; для второй фазы (Приисковый массив) по результатам SHRIMP U–Pb исследований цирконов получены датировки 97–101,5 млн лет [Лызганов и др., 2020].



**Рис. 1.** Схематические геологические карты. а – расположение Колумбинского участка исследования в геологической ситуации юга Дальнего Востока России; б – геологическое строение и границы Колумбинского участка с местами отбора проб (по [Лызганов и др., 2020] с изменениями).

Ольгинский комплекс гранитоидов, представленный на территории, включает часть Приискового массива лейкократовых амфибол-биотитовых гранитов и относится ко второй фазе внедрения. По нему были получены SHRIMP U–Pb абсолютные датировки, возраст составил 73–86 млн лет [Лызганов и др., 2013; 2020]. Риолиты приморского комплекса (верхний мел) представлены на территории незначительно и включают небольшой шток на юго-западе (правый берег р. Приманка). Также здесь присутствует дальнегорский комплекс, выраженный в наличии верхнемеловых даек диоритов, диорит-порфириров и спессартиров, прорывающих ольгинские лейкократовые граниты Приискового массива [Лызганов и др., 2020]. Ореолы вторичных изменений приурочены к разрывным структурам и контактам магматических тел и вмещающих пород и включают зоны серицитизации, лимонитизации, окварцевания и ороговикования. На юге исследуемой территории описана локальная сложнодислоцированная структура Колумбинского свода, ограниченного Борисовским и Кулишовским разломами, в зоне влияния которых закартированы ореолы вторичных изменений (рис. 1б).

В зоне, прилегающей к Колумбинскому участку, описаны рудопроявления благородных металлов (Au, Ag) и комплексного сырья Sn–W, Be, Mo, Sn, Pb–Zn, а также золотосульфидное месторождение Глухое (Au) и золотокварцевое месторождения Благодатное (Пионер) (Au). Помимо золота, на территории оценены месторождения олова

Куалинское, Туегинское и Сидатунское [Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. 2006; Лызганов и др., 2020].

Для обработки геохимических данных нами была выбрана библиотека машинного обучения `scikit-learn` языка программирования Python [Scikit-Learn, 2021]. Научные расчеты, построение графиков и диаграмм выполнялось в браузерной среде программирования `Jupyter`. Таблица результатов штучного опробования была очищена от неполных записей, координаты точек опробования были приведены в ГИС-совместимый формат (десятичные градусы вместо градусов, минут, секунд). Встречающиеся в геохимических данных значения менее и более порога чувствительности были преобразованы в значения, отличающиеся на величину от 0 до 10% в меньшую или большую сторону, соответственно. В противном случае необходимо было бы удалить рассматриваемые записи. Результаты анализов были стандартизированы, что требуется для применения метода главных компонент (МГК) [Шевырев и Горобейко, 2021; VanderPlas, 2016]. Первые пять строк из 898 стандартизированных данных показаны в Таблице, округление символов произведено до 4 знаков после запятой.

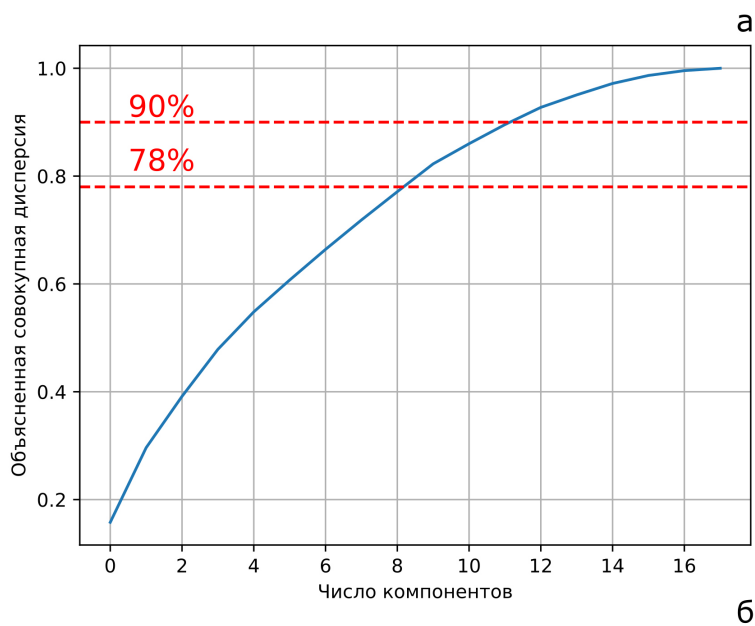
**Таблица 1.** Стандартизированные результаты анализов штучных проб Колумбинского участка

	Sn	Pb	Zn	Cu	Ag	V	Cr	Ni	Mn
0	-0,1361	-0,0713	-0,0818	-0,1982	-0,1266	1,2785	0,2143	-0,0305	-0,2853
1	-0,1361	-0,1004	-0,2160	0,0286	-0,1194	0,0754	-0,0618	-0,0305	1,5418
2	-0,1361	-0,1004	-0,0818	-0,5156	-0,1194	0,0754	-0,0618	-0,0305	0,3237
3	-0,1489	-0,1470	-0,0818	-0,5156	-0,1266	1,2785	-0,0618	-0,1684	0,3237
4	-0,1361	-0,0713	-0,2160	-0,5156	-0,1194	0,0754	0,2143	-0,0305	-0,2853
	Ti	Co	Mo	W	As	Bi	Sb	Au	Ba
0	0,3838	1,0822	-0,0886	-0,0815	-0,1583	-0,0972	-0,0896	0,5955	1,3094
1	-0,4900	1,5291	0,1510	-0,0815	-0,1605	-0,0852	-0,0978	0,5502	0,5793
2	0,3838	0,4567	0,0012	-0,0672	-0,1739	-0,0816	-0,0978	-0,3563	-0,2967
3	0,3838	0,0098	-0,0886	-0,1053	-0,1505	-0,0822	-0,0841	0,3236	1,3094
4	0,3838	0,0098	-0,0886	-0,0894	-0,1505	-0,1172	-0,1388	-3,0757	-0,2967

Для определения числа главных компонент (ГК) была определена накопленная ими совокупная дисперсия [VanderPlas, 2016]. Нахождение оптимального числа компонент возможно оценкой доли дисперсии, описываемой компонентами. В соответствии с построениями (рис. 2), 90% дисперсии охватываются 11-ю компонентами, тогда как 8 компонент охватывают уже 78% дисперсии. Ввиду того, что уменьшение числа компонент на 3, т.е. почти на четверть, приводит к уменьшению охвата совокупной дисперсии на 12%, было выбрано число компонент 8.

Вклад отдельных элементов в ГК массива данных оценивался в помощью созданной с помощью библиотеки `seaborn` тепловой карты, где интенсивность цвета является индикатором векторной нагрузки компонент и его собственного значения. Векторные нагрузки являются индикатором вклада элементов в ГК, тогда как собственные значения показывают долю компонента в дисперсии данных. Цветовая индикация элементов в компоненте, отмечаемая в тепловой карте построчно, позволяют оценить группировку элементов в отдельных компонентах, их сонахождение и совместную эволюцию в формировании рудных концентраций на исследуемой территории (рис. 3).

На основании векторных нагрузок химических элементов для интерпретации их ассоциаций оказались примечательны ГК 1, 2, 4, 6, 7, 8. Первый главный компонент (ГК1), внесший в дисперсию наибольший вклад, объединяет, в основном, литофильные (V, Mn, Ti, Cr) и некоторые сидерофильные элементы (Co, Ni), а также Cu. Второй главный компонент (ГК2) включает халькофилы (Sn, Pb, Zn, Cu, Ag, в меньшей степени As, Bi). Также во втором компоненте отмечаются немного повышенные векторные



```

from sklearn.decomposition import PCA
PCA=PCA(n_components=8) #создание 8-компонентной модели
Transformed_PCA=PCA.fit_transform(scaled_features)
Transformed_PCA
    
```

Рис. 2. Определение числа ГК (а), код Python для создания и обучения модели PCA (б).

нагрузки литофильных элементов W и V. Четвертый главный компонент (ГК4) примечателен высокими векторными нагрузками As (0,6349) и Bi (0,6213). В седьмом (ГК7) и восьмом (ГК8) компонентах участвует Au. Помимо него ГК7 включает W, Cu, Zn, а ГК8 – сидерофил Mo, а также халькофилы Zn, As, Sb.

Интересные закономерности получены выявлением высоких отрицательных нагрузок литофильных элементов V, Ti (ГК3), а также W (ГК8) (рис. 3). Отмечается, что указанные элементы вносят существенный вклад в формирование своих ГК. Находящиеся в ассоциации W и Mo формируют проявления, связанные с ольгинским комплексом лейкократовых гранитов, а также находящееся за пределами территории исследований

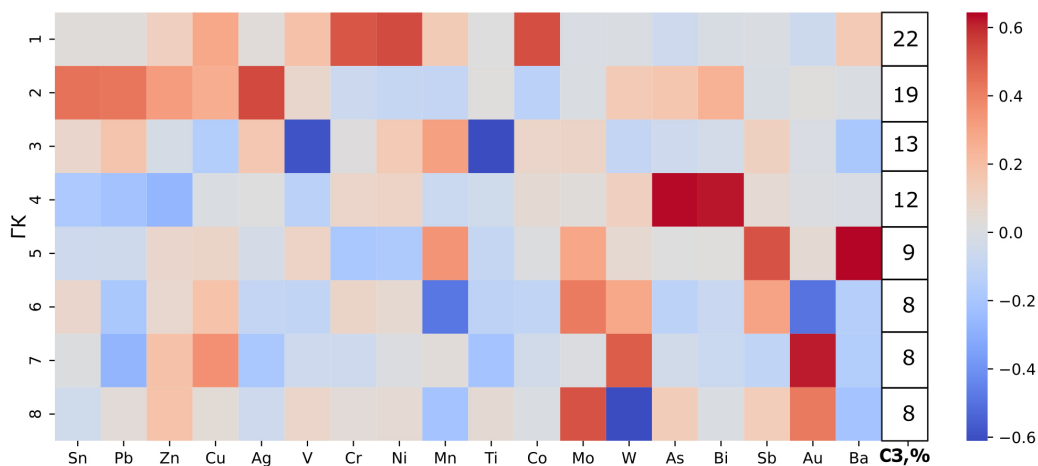


Рис. 3. Тепловая карта векторных нагрузок элементов, а также их собственные значения (СЗ, в %), рассчитанная для геохимических данных Колумбинского участка.

месторождение Забытое (Sn–W, + Mo, + Be). Элементы V и Ti, входящие в ГК3 на территории исследований, значимых проявлений не образуют.

### Результаты исследования и их обсуждение

Вычисленные значения ГК 1, 2, 4, 6, 7, 8, полученные по результатам обработки геохимических данных, были использованы для создания карт их распределения на территории Колумбинского участка и прилегающей площади. Интерполяция значений компонентов в точках отбора проб и визуализация результатов производилась в свободно распространяемой программе ГИС QGIS с помощью алгоритма обратных взвешенных расстояний (IDW) [GIS Geography, 2023], примененного для нерегулярно распределенных точек опробования. В QGIS для этих целей используется модуль Interpolation. Полученные карты анализировались визуальным сопоставлением со структурно-вещественными картами исследуемой территории, а также с учетом относительного размещения точек опробования. Поля распространения выбранных ГК, которые объединяют элементы, связанные особенностями распределения и изменения их собственных значений, выделялись в локально выраженные максимумы и минимумы (рис. 4).

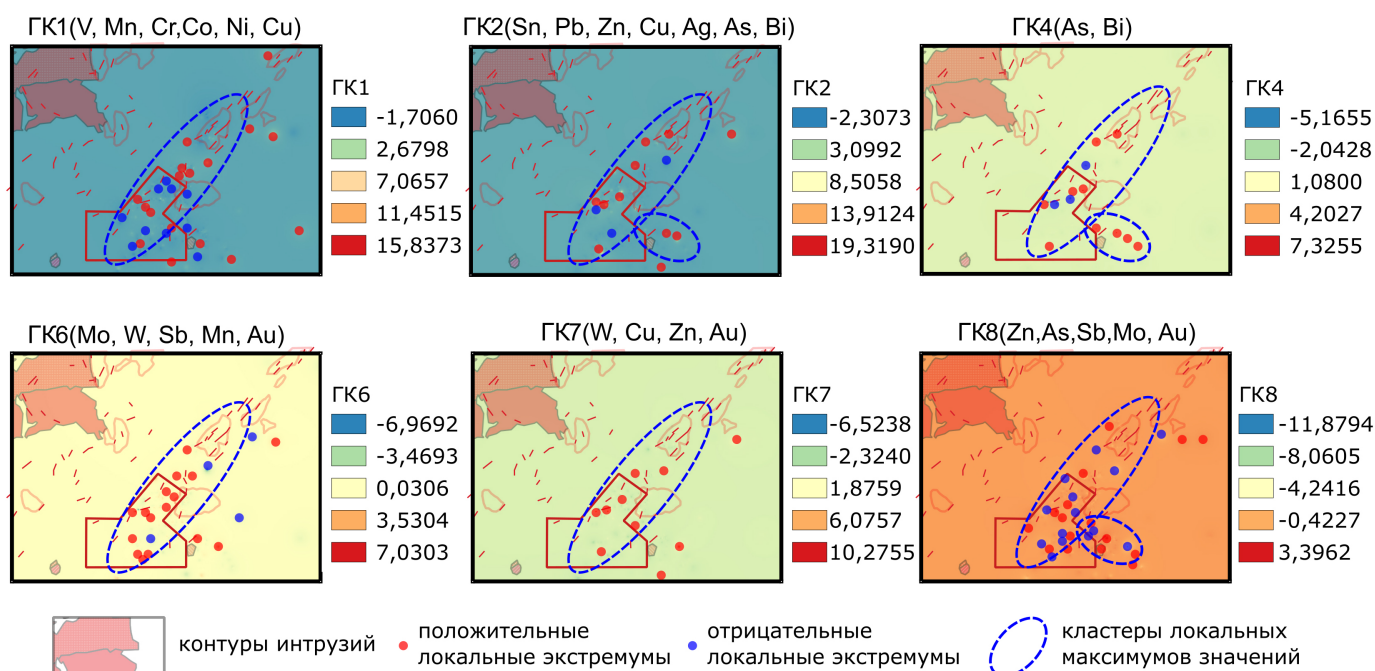


Рис. 4. Карты значений Главных компонентов для Колумбинского участка.

Прежде всего хотелось бы отметить, что по данным штучного опробования в пределах Колумбинского участка локальные экстремумы, как максимумы, так и минимумы, имеют небольшие площади и, как следствие, мало выражены в масштабе карты. Тем не менее, в совокупности они формируют кластеры, которые своим простираем отражают приуроченность к рудоперспективным региональным структурам – разломам первого порядка (северо-восточного простираем) и второго порядка (северо-западного простираем) по В. П. Уткину [2005]. На рис. 4 видно, что локальные положительные экстремумы ГК 1, 2, 4, 6, 7, 8 формируют цепочки, вытянутые в северо-восточном направлении, конформном основному направлению простираем региональных геологических структур, и в пространственном отношении совпадают с полями даек и связанными с их внедрением ореолами вторичных изменений в пределах территории Колумбинского свода, ограниченного Кулишовским и Борисовским разломами. Интересно, что для ГК 2, 4, 8 (халькофильные элементы и Au) проявляются кластеры локальных положительных экстремумов, ориентированные ортогонально в северо-западном направлении (рис. 4). Можно предположить, что структурно эти кластеры

соответствует обстановкам растяжения, являющимися структурами второго порядка [Уткин, 2005; Шевырев и Хомич, 2013]. В эрозионном срезе обнажается интрузия кварцевых монцодиоритов первой фазы внедрения татибинского комплекса [Лызганов и др., 2020], что может косвенно свидетельствовать о его связи с оруденением. На геологической карте масштаба 1:200,000 к этой фазе внедрения татибинского комплекса отнесена большая часть даек [Лызганов и др., 2020].

### Заключение

Анализом геохимических данных территории, прилегающей к Колумбинскому участку, химические элементы были сгруппированы в главные компоненты, которые естественным образом отражают поведение этих элементов в процессе миграции и рудообразования. Так, халькофильные и литофильные – объединены в отдельных главных компонентах, которые формируют несколько отличающиеся по морфологии и размещению кластеры. Эти наблюдения могут говорить об асинхронности отложения и наличии нескольких генераций рудных минералов. Проверка гипотезы о соответствии этапности рудообразования группируемым в главных компонентах элементам, определенным ковариацией их дисперсий, требует проведения дополнительных минераграфических исследований, что в свою очередь может служить основанием для реализации более детальных историко-геологических и минерагенических исследований на территории Кемского террейна.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках госзадания Дальневосточный геологический институт ДВО РАН (Регистрационный № НИОКТР 122040800199-8, пифр научной темы FWMF-2022-0003).

### Список литературы

- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. / под ред. А. И. Ханчук. — Владивосток : Дальнаука, 2006. — 981 с.
- Лызганов А. В., Кандауров А. Т., Михальченко Н. П. Геологическое строение и полезные ископаемые бассейнов рек Большая Уссурка, Арму, Колумбе, Перевальная. Отчет о результатах работ по объекту: ГДП-200 листа L-53-XXII (Микулинская площадь) за 2011-2013 гг. Гос.контракт № 05-11/2. Лицензия ВЛВ 02061 ТП. — Владивосток : ОАО "Приморгеология", 2013. — 760 с.
- Лызганов А. В., Кандауров А. Т., Михальченко Н. П. Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200 000. Серия Южно-Сихотэ-Алинская. Лист L-53-XXII (Мельничное). — Москва : ВСЕГЕИ, 2020.
- Уткин В. П. Строение, геохронология и структурно-динамические условия вертикального развития Восточно-Сихотэ-Алинского магмо-металлогенического пояса // Доклады Академии наук. — 2005. — Т. 404, № 5. — С. 659–663.
- Шевырев С. Л., Горобейко Е. В. Анализ геохимических данных и ассоциаций элементов перспективной Березовской площади методом главных компонент (Кемский террейн, Сихотэ-Алинский складчатый пояс) // Успехи современного естествознания. — 2021. — № 11. — С. 151–156. — DOI: [10.17513/use.37727](https://doi.org/10.17513/use.37727).
- Шевырев С. Л., Хомич В. Г. Выявление инфраструктурных элементов рудно-магматических систем Приморья по материалам космического зондирования // Вестник ВГУ. Серия: Геология. — 2013. — № 2. — С. 118–128.
- GIS Geography. Inverse Distance Weighting (IDW) Interpolation. — 2023. — URL: <https://gisgeography.com/inverse-distance-weighting-idw-interpolation/> (visited on 06/30/2023).
- Khomich V. G., Boriskina N. G., Santosh M. A geodynamic perspective of world-class gold deposits in East Asia // Gondwana Research. — 2014. — Vol. 26, no. 3/4. — P. 816–833. — DOI: [10.1016/j.gr.2014.05.007](https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.05.007).
- Scikit-Learn. Machine Learning in Python. — 2021. — URL: <https://scikit-learn.org/> (visited on 11/08/2021).
- VanderPlas J. In Depth: Principal Component Analysis // Python Data Science Handbook. — O'Reilly Media, 2016.

PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS FOR GEOCHEMICAL DATA  
ANALYSIS AND CHEMICAL ELEMENTS ASSOCIATIONS OF  
PROSPECTIVE KOLUMBE AREA (KEMA TERRAIN, SIKHOTE-ALIN  
FOLDED BELT)S. L. Shevyrev<sup>1</sup> , N. G. Boriskina<sup>\*\*1</sup> , and V. V. Ivin<sup>1</sup> <sup>1</sup>Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia**\*\*Correspondence to:** N. G. Boriskina, boriskina2000@mail.ru

Native manifestations and deposits of precious metals of folded belts of surrounding of the North Asian and Sino-Korean cratons are of lesser resources and areas; that requires growth of research and technological potential for discoveries of the mineralizations. In Sikhote-Alin folded belt, which is typical example of boundary folded belts developed over a subduction zone, terranes of different age are described. Basements of these terranes are of accretion, island arc and turbidite origin, intruded by magmatic rocks and overlain by volcanic-sedimentary cover. Conducted researches consider area of island arc Kema terrane, which occupies large territories of the Strait of Tartary continental coast. Au-Ag deposits here are related to the origin and development of the active volcanic boundary. Genesis of the ore objects here is epithermal and related to intrusive and effusive complexes of Upper Cretaceous and Paleogene ages. Detailed field lithogeochemical surveys were held on a prospective Kolumbe site where Upper Jurassic–Lower Cretaceous siliceous and terrigenous rocks are intruded by Cretaceous granites of Tatibinski and Olginsky complexes. Research of the geochemical features was done using Principal Component Analysis, the effective method of dimensional reduction and data filtration. Implementation of that method in geochemical data analysis facilitates outlining of the associations of the elements by unifying them into principal components and discover their spacial distribution related to geological complexes of the research area. Determining of the number of principal components used explained variance covered by these components. Derived maps of the spatial distribution of principal components that include elements associations allowed to determine the locations of the local geochemical extrema. Grouping of elements into principal components made it possible to assume the staging in ore deposition in a prospective Kolumbe site. Conducted studies could invigorate further more detailed researches of the minerageny of the considered area.

**Keywords:** volcanic belts, machine learning, geological mapping, principal component analysis, exploration geochemistry.

Received: 6 July 2023

Accepted: 3 October 2023

Published: 20 May 2024



© 2024. The Authors.

**Citation:** Shevyrev, S. L., N. G. Boriskina, and V. V. Ivin (2024), Principal Component Analysis for Geochemical Data Analysis and Chemical Elements Associations of Prospective Kolumbe Area (Kema Terrain, Sikhote-Alin Folded Belt), *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES2008, <https://doi.org/10.2205/2024ES000875> EDN: UAOPSH

## References

Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Russian East : in 2 books / ed. by A. I. Khanchuk. — Vladivostok : Dalnauka, 2006. — P. 981.



- GIS Geography. Inverse Distance Weighting (IDW) Interpolation. — 2023. — (visited on 30.06.2023). <https://gisgeography.com/inverse-distance-weighting-idw-interpolation/>.
- Khomich V. G., Boriskina N. G., Santosh M. A geodynamic perspective of world-class gold deposits in East Asia // Gondwana Research. — 2014. — Vol. 26, no. 3/4. — P. 816–833. — DOI: [10.1016/j.gr.2014.05.007](https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.05.007).
- Lyzganov A. V., Kandaurov A. T., Mikhailchenko N. P. Geological structure and minerals of the Bolshaya Ussurka, Armu, Kolumbe, Perevalnaya river basins / Report 2011-2013 on exploration work on the object GDP-200 sheets L-53-XXII Mikulinskaya area. State contract No. 05-11/2. License VLV 02061 TP. — Vladivostok : Primorgeologia, 2013. — P. 760.
- Lyzganov A. V., Kandaurov A. T., Mikhailchenko N. P. State geological map of the Russian Federation at a scale of 1:200 000. South Sikhote-Alin series. Sheet L-53-XXII (Melnichnoe). — Moscow : VSEGEI, 2020.
- Scikit-Learn. Machine Learning in Python. — 2021. — (visited on 08.11.2021). <https://scikit-learn.org/>.
- Shevyrev S. L., Gorobeyko E. V. Analysis of geochemical data and chemical elements associations of prospective Berezovsky area (Kema terrain, Sikhote-Alin folded belt) // Advances in Current Natural Sciences. — 2021. — No. 11. — P. 151–156. — DOI: [10.17513/use.37727](https://doi.org/10.17513/use.37727).
- Shevyrev S. L., Khomich V. G. Identification of ore-magmatic systems infrastructure element of Primorie on remote sensing materials // Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology. — 2013. — No. 2. — P. 118–128.
- Utkin V. P. Structure, geochronology, and structural-dynamic conditions of the vertical development of the East Sikhote-Alin magma-metallogenic belt // Doklady Earth Sciences. — 2005. — Vol. 405, no. 8. — P. 1136–1140.
- VanderPlas J. In Depth: Principal Component Analysis // Python Data Science Handbook. — O'Reilly Media, 2016.