

УДК 553.3/4:553.04:528.8

АНАЛИЗ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ И АССОЦИАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРСПЕКТИВНОЙ БЕРЕЗОВСКОЙ ПЛОЩАДИ МЕТОДОМ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ (КЕМСКИЙ ТЕРРЕЙН, СИХОТЭ-АЛИНСКИЙ СКЛАДЧАТЫЙ ПОЯС)

Шевырев С.Л., Горобейко Е.В.*Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, e-mail: shevirev@mail.ru*

Коренные благороднометалльные месторождения внутри ареала стагнированного океанического слэба, подстилающего протяженные части Сино-Корейского и Северо-Азиатского кратонов, и находящиеся между ними складчатые пояса, характеризуются небольшими ресурсами и площадью, что затрудняет их обнаружение. Одной из структур, вмещающей такие объекты, является Сихотэ-Алинский складчатый пояс, включающий террейны различного возраста и генезиса: аккреционного, островодужного и турбидитового, прорванные интрузивными и перекрытые вулканогенно-осадочными породами одноименного вулканоплутонического пояса. Несмотря на сложное строение и расчлененный рельеф территории, геохимические методы поиска по вторичным ореолам имеют критическое значение для выделения рудных объектов в пределах перспективных структур. Островодужный Кемский террейн, охватывающий территории континентального побережья Татарского пролива, вмещает небольшие золотосеребряные месторождения и проявления, связанные с этапом формирования и развития активной вулканической окраины, и имеют эпitherмальный генезис, ассоциированный с верхнемеловыми и палеогеновыми интрузивными и вулканическими свитами. Рассматриваемая в нашем исследовании перспективная Березовская площадь находится в 8 км к юго-востоку от вулканического купола известного золотосеребряного месторождения Салют и связана с вулканокупольной структурой меньшего масштаба, локализованной в долине реки Кузнецова. Метод главных компонент относится к классу методов уменьшения размерности данных и широко применяется в естественных науках. Применение этого метода при обработке результатов спектрального анализа поисковых геохимических проб позволяет выявить ассоциации элементов, объединенных в отдельные компоненты, и установить их пространственное распределение, связанное с размещением на территории структурно-вещественных комплексов и степенью их вторичных изменений. Обоснование количества выделяемых компонент производится с помощью величины общей совокупной дисперсии, описанной этими компонентами. Для компонент, включающих ассоциации различных элементов, построены карты пространственного распределения и локализации аномалий. Группировка элементов в главных компонентах, выраженная в значениях их векторных нагрузок, предположительно связана с наличием этапности в рудообразовании на Березовской площади и может служить для понимания особенностей минерализации территории.

Ключевые слова: метод главных компонент, вулканические пояса, scikit-learn, геологическое картирование, поисковая геохимия

ANALYSIS OF GEOCHEMICAL DATA AND CHEMICAL ELEMENTS ASSOCIATIONS OF PROSPECTIVE BEREZOVSKY AREA (KEMA TERRAIN, SIKHOTE-ALIN FOLDED BELT)

Shevirev S.L., Gorobeyko E.V.*Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, e-mail: shevirev@mail.ru*

Native deposits of precious metal inside of the areal of stagnant oceanic slab beneath the vast parts of Sino-Korean and North Asian cratons as well as folded belts located between them are described with smaller resources and areas, which impedes their discoveries. One of such folded structures that possesses precious metal deposits is the Sikhote-Alin folded belt that occupies terrains of different age and genesis: accretionary, island arc and turbidite. Sediments of these terrains are intruded and overlain by magmatic rocks of Sikhote-Alin volcano-plutonic belt. Despite its complicated composition and dissected relief, geochemical methods of exploration of secondary haloes are critical for the outlining of ore objects within prospective structures. Island arc Kema terrain embraces area along the continental shore of Tartar strait and holds epithermal Au-Ag deposits and manifestations associated with forming and development of active volcanic margin, which are associated with Upper Cretaceous and Paleogene intrusive and volcanic rocks. Discussed prospective Berezovsky area is in the distance of 8 km from known Au-Ag deposit of Saluyt and is related to volcanic dome structure of less scale that is situated in the Kuznetsova river valley. Principal component analysis is the method of data dimension decrease and widely applicable in natural sciences. Application of that method in processing of field sampling geochemical data allows to determine the associations of elements and their spatial distribution related to positions of structure and rock complexes as well as their alteration changes. Determining of principal components number was done with the value of related explained variance. For components including associations of various elements maps of spatial distribution and locations of anomalies were built. Integration of chemical elements into various components is supposedly associated with staging of mineralization of Berezovsky area and could serve to general understanding of ore mineralization of the area.

Keywords: principal component analysis, volcanic belts, scikit-learn, geological mapping, exploration geochemistry

Необходимость экономического и инфраструктурного развития территорий Дальнего Востока России требует наращивания их

ресурсного потенциала в отношении стратегического сырья благородных металлов. Исследованиями последних десятилетий

обоснованы базовые закономерности размещения крупных и средних месторождений [1–3], их позиция вдоль планетарных дизъюнктивов и региональных сдвигов, а также вдоль границы стагнированного океанического слэба [4]. Поисковые и оценочные работы, проводимые в отношении небольших рудных объектов, являются источником данных об эволюции и сонахождении химических элементов в приповерхностной зоне земной коры, доступной для непосредственных наблюдений и изучения. Исследуемая территория Березовской перспективной площади располагается в пределах Кемской металлогенической зоны (Восточно-Сихотэ-Алинский магма-металлогенический пояс), совпадающей территориально с островодужным Кемским террейном Сихотэ-Алинского горно-складчатого пояса. Цель исследования – описать закономерности распределения химических элементов и формирование ими вторичных ореолов рассеяния, совместное поведение элементов в зоне выветривания и соответствие повышенных концентраций элементов структурно-вещественным комплексам Березовского участка. Для достижения этой цели необходимо решение следующих задач: статистическая обработка результатов поисковой геохимической съемки с помощью метода главных компонент (МГК, РСА); обоснование выбора оптимального количества главных компонент (ГК, РС) для описания совокупности данных; оценка собственных значений главных компонент и вкладов химических элементов в компоненты; графическое представление данных и интерпретация полученных результатов.

Материалы и методы исследования

Как уже указывалось выше, оригинальный исследовательский материал был получен в пределах Березовской перспективной площади, находящейся на территории Кемского террейна, несогласно перекрытого вулканическими породами Восточно Сихотэ-Алинского вулcano-плутонического пояса. Объект исследований граничит с месторождением Салют и, вероятно, обладает с ним историко-геологической общностью и парагенетической близостью [5]. В качестве источника данных выступили проанализированные с помощью электронного зондового микроанализатора JEOL JXA-8100 материалы поисковой геохимической съемки, выполненной в 2016 году полевыми работами Приморской горно-геологической экспедиции.

Данные включили результаты спектрального анализа 17,5 тысяч литогеохимических проб по вторичным ореолам, отобранных по сети 100x20 и 200x50 на площади около 70 км². Площадь включила территорию, прилегающую к Березовскому вулcano-купольному поднятию (БВКП), находящемуся в ее центральной и западной частях, образованному вулcanoгенно-осадочными образованиями мелового, палеогенового и неогенового возраста и местами перекрытому современными аллювиальными отложениями (рис. 1).

Геологическое строение участка включает несколько генераций вулканических пород, а именно самаргинский комплекс и приморскую свиту верхнего мела (переслаивающиеся риолиты, риодациты и андезидациты), прорванные гранитами дальнегорского комплекса, богопольскую свиту (позднемаастрихтско-датского(?) возраста), содержащую лавы и туфы риолитов, кузнецовские эоценовые андезиты и андезибазальты и их туфы, кедровские эоценовые риолиты и риодациты, а также кизинские (нижне-среднемиоценовые) андезибазальты. Региональные исследования, включившие абсолютные датировки с помощью К-Аг метода, определили возраст вулканитов кузнецовской свиты как эоценовый (53,4–42,5 млн лет) [6].

На территории, непосредственно примыкающей к БВКП (центральная часть участка, рис. 1), породы интенсивно метасоматически изменены на участках, примыкающих к сети радиальных и концентрических разрывных нарушений. Метасоматические изменения сопровождаются появлением кварца, серицита и гидрослюда в качестве вторичных минералов. Присутствуют также вторичные хлорит, эпидот, лимонит и каолинит. Рудоконтролирующую роль играют области вторичных изменений, ассоциированные с зонами трещиноватости северо-восточного направления, соответствующего направлению тектонических зон Сихотэ-Алия первого порядка. Наличие ореолов вторичных изменений, а также зон окварцевания и карбонатизации в меловых и эоценовых породах позволяет предположить возраст вторичных изменений и метасоматизации как послеоценовый.

В качестве средства для обработки геохимических данных выступила библиотека *Python scikit-learn*, являющаяся эффективным средством для анализа данных и машинного обучения [7]. Расчеты и построение графики выполнялись в среде Jupyter.

Таблица результатов анализа геохимических проб была очищена от неполных записей; для масштабирования разнопорядковых значений содержаний элементов применялся метод стандартизации, который необходимо

задействовать перед применением МГК [8]. Результат вывода заголовка и первых пяти строк таблицы стандартизованных данных показан (таблица), выполнено округление до трех символов слева от запятой.

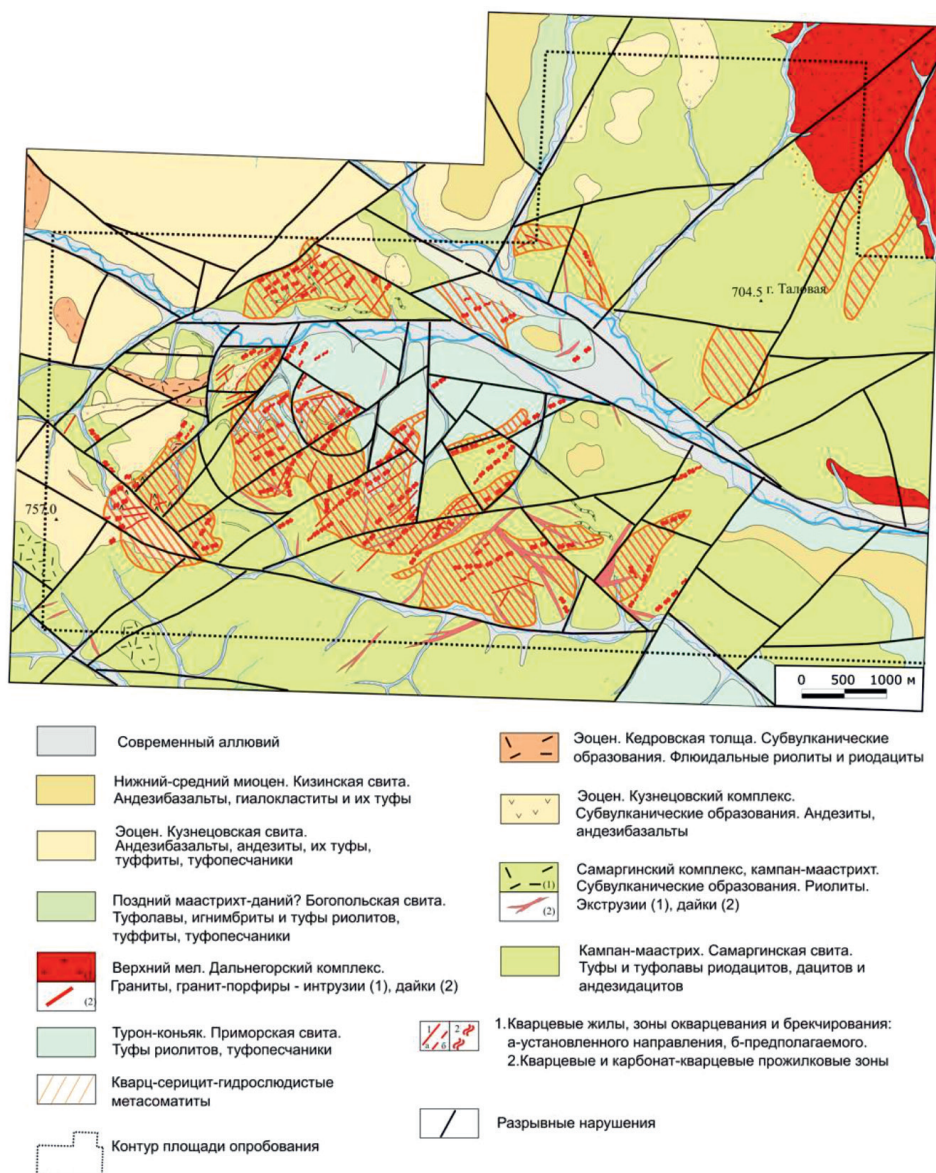


Рис. 1. Геологическая карта Березовской перспективной площади (по материалам Приморской горно-геологической экспедиции, с изменениями)

Стандартизованные результаты спектрального анализа геохимических проб Березовской площади (объект *scaled_features* программы, первые 5 строк из 17507)

	Au	Ag	Sn	Pb	Zn	Cu	Ni	Mn	Co	Mo	Ba
0	-0.087	-0.062	0.815	-0.285	-0.416	-0.174	0.578	0.018	-0.275	0.154	0.791
1	-0.087	-0.375	0.815	-0.344	-0.416	-0.174	-0.295	-0.620	-0.881	-0.328	-0.275
2	-0.087	-0.375	-0.482	-0.344	-0.780	-0.174	-0.513	-0.620	-0.881	-0.328	0.081
3	-0.087	-0.312	-0.482	-0.344	-0.780	-0.174	-0.295	-0.701	-0.881	-0.328	-0.275
4	-0.087	-0.312	0.815	-0.344	-0.780	-0.174	-0.513	-0.620	-0.881	-0.328	-0.275

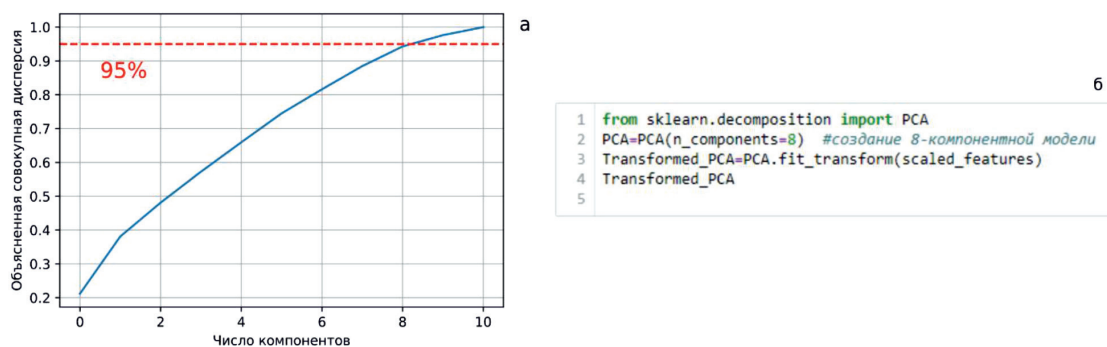


Рис. 2. Нахождение числа главных компонент (а), создание и обучение модели PCA (б) в Jupyter

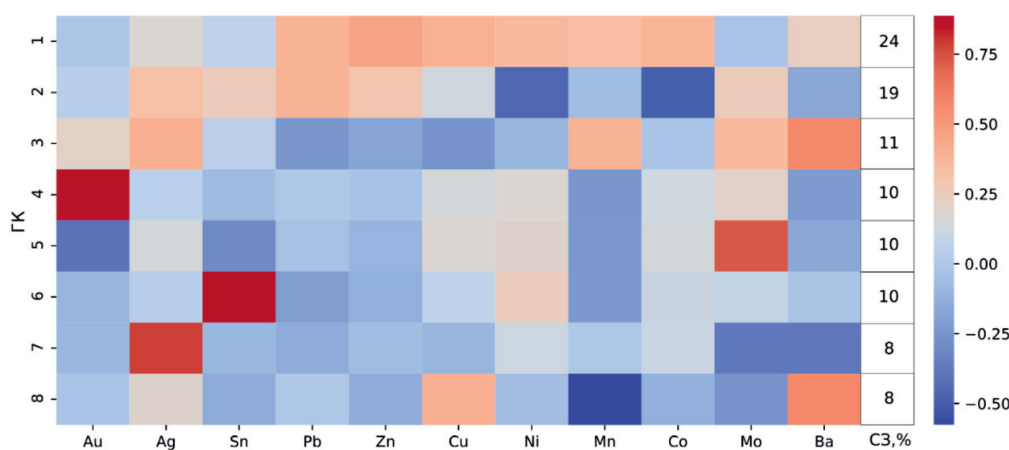


Рис. 3. Векторные нагрузки – вклад элементов в главные компоненты (ГК), а также их собственные значения (C3, в %)

Для определения количества главных компонент оценивалась соответствующая им накопленная объясненная совокупная дисперсия (*pca.explained_variance_ratio_*). С помощью оценки дисперсии, описанной определенным количеством компонент [9], было найдено 8 компонент, соответствующих 95% дисперсии совокупности данных (рис. 2а). Создание модели МГК для необходимого количества главных компонент осуществлялось так, как показано на рис. 2б.

Вклад отдельных элементов в ГК оценивался с помощью векторной тепловой карты, построенной с помощью библиотеки Python *seaborn* (рис. 3), визуализирующей векторные нагрузки компонент и их собственные значения (*eigenvalues*, EV). Векторные нагрузки демонстрируют вклад элемента в ГК, тогда как собственные значения показывают его долю компоненты

в дисперсии данных. Векторные нагрузки элементов, показанные цветом, позволяют оценить группировку элементов в отдельных компонентах.

На основании векторных нагрузок элементов нами были выделены ГК 1, 2, 4, 7. ГК1, обладающий наибольшим вкладом (24%) в дисперсию, включил халькофильные элементы Pb, Zn, Cu, а также сидерофильные Mn, Ni, Co. ГК2 (19%) описывает распределение Ag, Sn, Pb и Zn. ГК4 (10%) включает повышенную векторную нагрузку Au и незначительную Mo, тогда как ГК7 (8%) – нагрузку Ag с незначительным превышением сидерофилов Ni и Co.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные в результате применения методов главных компонент таблицы значе-

ний выбранных ГК 1, 2, 4 и 7 были использованы для построения карты распределения геохимических аномалий вторичных ореолов рассеяния на площади исследуемого перспективного Березовского участка.

Для интерполяции и визуализации были использованы библиотеки Python *scipy* (функция *griddata*) и *matplotlib*. Нахождение промежуточных значений ГК на площади осуществлялось с помощью метода «ближайшего соседства» (*nearest neighborhood*). На полученные карты распределения ГК выносились контуры территории геохимического опробования с целью дальнейшего сопоставления карт значений с геологической картой и картой фактического материала (рис. 4).

свит, и располагающиеся к северо-западу от БВКП.

Как следует из рис. 4, ГК 4 и 7 на территории образуют контрастные, мелкие, не площадные аномалии, разделенные между собой полями значений, близких к фоновым, препятствующих объединению аномальных значений в одном контуре (рис. 4).

Для ГК4, отражающем распределение Au, характерно сгущение аномалий к юго-западу от БВКП, преимущественно в зоне распространения кварцевых жил и кварц-карбонат прожилковых зон среди мел-палеогеновых самаргинских и кузнецовских вулканогенно-осадочных пород. Аномалии ГК7 сгруппированы на юге территории и, незначительно, на северо-востоке, совмещенно

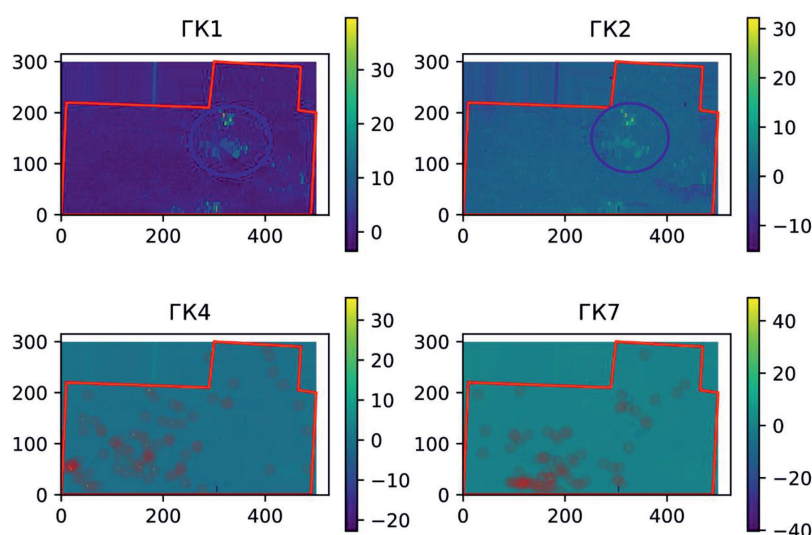


Рис. 4. Результаты интерполяции значений ГК для территории Березовской перспективной площади. Синей окружностью обведены площадные аномалии ГК1 и 2. Красные кружки на ГК4 и 7 показывают их небольшие аномалии, вынесены вне масштаба

В качестве критерия для выделения геохимических аномалий использовалось «правило трех сигм», в соответствии с которым значения, отличающиеся от математического ожидания более чем на три величины стандартного отклонения, рассматриваются как аномальные [10]. В соответствии с этим правилом в центральной части Березовской площади выделены площадные аномалии ГК1 и 2, в пространственном отношении совпадающие с зоной вторичных изменений и кварц-карбонат прожилковыми зонами, непосредственно примыкающими к руслу р. Кузнецова среди вулканогенных образований самаргинской и богопольской

с площадной аномалией ГК2, в котором значимую роль также играет серебро.

Так как опробование проводилось по вторичным ореолам рассеяния, необходимо учитывать возможное гравитационное смещение установленных аномалий вниз по склону относительно коренных источников вместе с чехлом элювиально-делювиальных образований.

Выводы

В результате анализа геохимических данных территории Березовской перспективной площади произведена группировка химических элементов в главные компо-

ненты, вероятно, отражающие их совместное поведение и накопление в процессе рудообразования. Установленные ассоциации элементов демонстрируют различное пространственное распределение на территории, что косвенно свидетельствует о, возможно, различном времени формирования рудных минералов и источников вещества для их отложения. Подтверждение этих предположений данными минераграфии сможет служить основанием для постановки более детальных работ с целью выяснения этапности формирования Березовской вулканической структуры, необходимости дальнейшего расширения коллекций обнаруженных на ее площади рудных минералов, а также установления степени, с которой эволюция Березовского вулкано-купольного поднятия отражает особенности регионального историко-геологического развития и минерагении Восточно-Сихотэ-Алинского магма-металлогенического пояса.

Список литературы / References

1. Yakubchuk A.S. Revised Mesozoic-Cenozoic orogenic architecture and gold metallogeny in the northern Circum-Pacific. *Ore Geology Reviews*. 2009. № 35. P. 447–454.
2. Khanchuk A.I., Kemkin I.V., Kruk N.N. The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. № 120. P. 117–138.
3. Shevyrev S., Carranza E.J.M. Modelling of geodynamic regimes of precious metal-bearing porphyry deposits: Lazurnoe deposit (Sikhote-Alin Belt, Far East) case study. *Geological Journal*. 2020. № 55. P. 8309–8328. DOI: 10.1002/gj.3935.
4. Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. A geodynamic perspective of world-class gold deposits in East Asia. *Gondwana Research*. 2014. № 26. P. 816–833.
5. Шевырев С.Л., Шевырева М.Ж., Горобейко Е.В. Картирование структурно-вещественных комплексов территории автоматизированным анализом изображений Landsat 8 OLI (Кемский террейн, Сихотэ-Алинский складчатый пояс) // *Успехи современного естествознания*. 2021. № 10. С. 89–94.
6. Шевырев С.Л., Шевырева М.Ж., Горобейко Е.В. Mapping of the structural and substational complexes of the territory by automated analysis of Landsat 8 OLI images (Kema terrane, Sikhote-Alin folded belt) // *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2021. № 10. P. 89–94 (in Russian).
7. Чашин А.А., Попов В.К., Будницкий С.Ю., Чашин С.А., Ноздрачев Е.А. Новые данные о возрасте вулканических комплексов кайнозойских рифтогенных впадин восточного Сихотэ-Алия // *Успехи современного естествознания*. 2020. № 4. С. 169–175. DOI: 10.17513/use.37381.
8. Chashchin, A.A., Popov, V.K., Budnitskiy, S.Yu., Chashchin, S.A., Nozdachev, E.A. New data on the age of volcanic complexes from the Cenozoic rift basins of the Eastern Sikhote-Alin // *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2020. № 4. P. 169–175. DOI: 10.17513/use.37381 (in Russian).
9. Scikit-learn, 2021. Scikit-learn. [Electronic resource]. URL: <https://scikit-learn.org/> (date of access: 08.11.2021).
10. Hoss Belyadi, Alireza Haghighat. Machine Learning Guide for Oil and Gas Using Python. GPP. 2021. 462 p.
11. Jake VanderPlas Python Data Science Handbook. [Electronic resource]. URL: <https://jakevdp.github.io/PythonDataScienceHandbook/05.09-principal-component-analysis.html> (date of access: 08.11.2021).
12. Govett G.J.S. Rock Geochemistry in Mineral Exploration. Chapter 3 – Recognition of Geochemical Anomalies. Handbook of Exploration Geochemistry. 1983. Vol. 3. P. 29–47. DOI: 10.1016/B978-0-444-42021-3.50008-2.