

УДК 553.3/4:553.04:528.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭПИТЕРМАЛЬНОГО ОРУДЕНЕНИЯ ОСТРОВА КУНАШИР С ПОМОЩЬЮ ДАННЫХ LANDSAT 8 И МЕТОДА ЛОГИСТИЧЕСКОЙ РЕГРЕССИИ

^{1,2}Шевырев С.Л.¹Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, e-mail: shevirev@mail.ru;²Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток

Сопровождающие гидротермальное золото-серебряное оруденение вторичные изменения (пропилитизация, аргиллитизация, окварцевание) могут быть выявлены и оценены на дистанционных изображениях Landsat 8 OLI. Учёт вклада главных компонент изображения (метода Кроста) в наблюдаемую картину наравне со спектральными индексами позволяет проводить только качественный анализ местности и предполагать наличие рудоперспективных участков. Острова Южно-Курильской гряды (Кунашир, Итуруп, Уруп) обладают потенциалом благороднометалльного и комплексного сырья, объекты которого находятся среди неоген-четвертичных вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород и обладают стратиформным и сложным жильным строением. Сложные природно-климатические условия территории, наличие расчлененного рельефа, древесно-кустарниковой растительности и почвенного слоя затрудняют применение спектральных методов. Однако учёт сезонности при подборе комплектов, КФС для анализа, а также использование автоматизированного вычислительного аппарата позволили использовать снимки Landsat 8 OLI для оценки металлогенического потенциала юга Большой Курильской гряды. Исходные данные, использованные для обучения модели, представляют собой пространственное распределение рудных объектов, что предполагает надежный учёт только «данных присутствия», отсутствие сведений о минерализации в том или ином месте может быть связано с недостаточными поисковыми усилиями. Метод логистической регрессии (максимальной энтропии) может быть использован для учёта специфики имеющихся данных и построения релевантной прогнозной модели. Применение этого метода позволило объяснить приуроченность известных проявлений и месторождений полезных ископаемых острова Кунашир, а также предположить зоны, благоприятные для их обнаружения. Полученное зональное распределение площадей, отвечающих фактическому нахождению известных рудных объектов и перспективных зон, обрело геологическую интерпретацию.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, эпитеpмальные месторождения, прогноз рудных полезных ископаемых, scikit-learn, логистическая регрессия, максимальная энтропия

MODELING OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE EPITHERMAL MINERALIZATION OF KUNASHIR ISLAND WITH THE LANDSAT 8 DATA AND LOGISTIC REGRESSION METHOD

^{1,2}Shevirev S.L.¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: shevirev@mail.ru;²Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok

Alteration haloes of Au-Ag mineralization (propylitization, argillization, silicification) could be detected and assessed on the remote sensing images of Landsat 8 OLI. Analysis of contribution of the image principal components (Crosta method) as well as the spectral indexes into the observed picture allows to make only qualitative assessment of the area and outlining of the prospective areas. Islands of the Greater Kuril Ridge (Kunashir, Iturup, Urup and others) have mineral potential of precious metals and complex ores, which mineralizations occurs among Neogene-Quaternary volcanogenic and volcanogenic-sedimentary rocks and compose stratiform and complicated vein bodies. Climate and weather conditions, dissected relief, soil and forestation impede assessment of spectral data for this area. However, considering of seasonality and vegetation cycle when picking satellite datasets for analysis as well as using appropriate processing and assessment techniques let to use Landsat 8 OLI for modeling of the mineralization distribution of Kunashir and Iturup Islands. Source data for the model training are based on spatial distribution of the known ore mineralization points that presume reliable accounting only of presence data. Absence of the information of mineralization at discrete point may be related to insufficient prospective efforts. Method of the logistic regression (maximum entropy) could be used for processing of possessed data and development of the prospective model. Application of this method made possible to explain positions of the known ore objects and predict new areas, favorable for ore accumulation on target areas. Obtained zonal distribution of the ore mineralizations and prospective zones got appropriate geological explanation.

Keywords: remote sensing of the Earth, epithermal deposits, ore prospecting, scikit-learn, logistic regression, maximum entropy

Необходимость наращивания ресурсной базы благороднометалльного сырья требует развития технологий анализа спутниковых изображений, что наиболее важно для удаленных и труднодоступных регионов.

Островодужные системы привлекают исследовательский интерес в связи со своим контрастным геологическим строением, а также наличием как традиционных, так и необычных типов минерального сырья.

Рудные месторождения редко- и благороднометалльного типов сырья, связанные с измененными вулканогенно-осадочными и магматическими породами [1], могут быть выражены в ореолах вторичных изменений, фиксируемых на космических изображениях, следовательно, прогноз и освоение минерального сырья островодужных систем возможны с привлечением методов дистанционного зондирования Земли. Природно-климатические факторы в данном случае выступают как осложняющие прогноз и оценку, однако их влияние может быть редуцировано тщательным подбором сезонных изображений для анализа, а также использованием техник машинного обучения. Целью настоящего исследования является составление и апробация карты минерагенического потенциала дистанционных изображений на примере относительно хорошо изученной в минерагеническом отношении территории острова Кунашир.

Материалы и методы исследования

Курильская островодужная система (КОС) простирается в северо-восточном направлении от острова Хоккайдо до полуострова Камчатка на 1175 км. КОС включает две субпараллельные островные дуги Большой и Малой Курильских гряд. Большая Курильская гряда (БКГ) характеризуется наличием большого количества вулканов и расположена в тылу КОС, со стороны задугового Охотоморского бассейна. Малая Курильская гряда (МКГ) является фронтальной, ограничена Курило-Камчатским желобом Тихого океана, и вулканизм для нее менее характерен. Область исследования настоящей работы включает в себя территорию острова Кунашир (рис. 1). КОС была сформирована в ходе надсубдукционного вулканического процесса, включает более чем 200 вулканов (105 являются субаэральными), большая часть локализована в пределах Кунашир-Урупского сегмента. Мощность континентальной коры в основании БКГ достигает 35–40 км. В структуре КОС выделяют фундамент (поздний мел – ранний палеоген), несогласно перекрытый олигоцен-неоген-четвертичными островодужными комплексами [1; 2]. Среди разрывных нарушений преобладают правые сдвиги северо-восточного простирания, сформированные косым взаимодействием Тихоокеанской плиты и окраины континента. Структуры второго порядка характеризуются левосторонним смещением и северо-западным простиранием [1].

Острова БКГ сложены олигоцен-неоген-четвертичными породами и представляют собой горстово-антиклинальную структуру с углами падения на крыльях до 30–40°, осложненную изолированными вулканическими постройками. В пределах БКГ обособливаются комплексы «зеленых туфов», вулканогенно-кремнисто-диатомитовый, базальтовый и андезитовый [1; 3; 4]. Вулканогенные породы острова Кунашир (рис. 1) обычно описываются как супрасубдукционные вулканиды Тихоокеанского типа [1; 4; 5]. Мелководно-морские высококремнеземистые осадочные породы плиоцена, включающие различные обломочные фракции и диатомиты, насыщены пирокластикой. Они переслаиваются пемзами и тейфрами различного возраста и прорываются многочисленными экструзиями и субвулканическими телами (до 63–64% SiO_2) и обладающие выраженной столбчатой отдельностью. До 60% площади островов сложено лавопирокластическим материалом плейстоцена-голоцена состава с существенным преобладанием двупироксеновых базальтовых андезитов и андезитов [1; 3; 4]. Южные острова Большой Курильской гряды вмещают скопления рассеянных элементов (Mo, Bi, Cd, In, Ge, Re), благородных (Au-Ag) и цветных (Zn, Cu, Sn, Zn, Pb) металлов, а также полуметаллов (Se, Te, Sb, As). Распространены малоглубинные (≤ 1 км) золото-серебряные, золото-полуметаллические, золото-алунитовые, золото-адюляровые, золото-сульфидные рудопоявления. Интерес представляют также сольфатарные поля и термальные источники центров современного вулканизма (рис. 1). Территория имеет потенциал для обнаружения порфировых Cu-Mo-Au месторождений (глубина ≤ 4 км), связанных интрузивными массивами (глубина внедрения 5–10 км) [1; 6]. Вулканогенно-пирокластические породы комплекса «зеленых туфов» вмещают стратиформные эксгальационно-осадочные и жильные гидротермально-метасоматические тела сульфидных руд Zn, Pb, Cu типа Куроко. Прорывающие их габброплагиограниты вмещают золото-серебряные руды с Se и Te. Экструзивные, субвулканические и интрузивные тела фельзитового состава, а также ореолы их вторичных изменений (аргиллизации, окварцевания, серицитизации, ожелезнения и другие) связаны с многочисленными золото-серебряными (\pm Sn) проявлениями [1]. Крупным известным объектом – примером эндогенной минерализации юга БКГ считается Прасоловский рудный узел, рас-

положенный на Охотоморском побережье острова Кунашир (рис. 1, Б) [7]. Прасоловский рудный узел приурочен к интрузивно-купольному поднятию, образованному габбродиорит-плагиогранитным массивом (его возраст $33 \pm 8 - 30 \pm 2$ млн лет (K-Ar) и 31 ± 1 млн лет по циркону (U-Pb) [1]. На площади Прасоловского рудного узла присутствуют сульфидная медно-цинковая минерализация, а также благороднометалльная минерализация различных типов, связанная с жильно-метасоматическими телами и ореолами вторичных изменений, окружающих субвулканические тела [7].

Площадное распределение спектральных особенностей дистанционного изображения позволяет получить картину наличия определенного вещественного признака, включая развитие вторичных изменений и минерализации определенного типа. Для оконтуривания интересующих площадей возможно использовать оценку главных компонентов изображения и спектральных индексов, т.н. метод Кроста [8], сопоставляемых с данными рудоперспективности территории. Анализ производится с помощью авторской прикладной программы, написанной на языке Python. Для проведения исследования подбирались сцены Landsat 8 OLI без облаков, прошедшие геометрическую и спектральную коррекцию. Ввиду пересеченного рельефа территории

исследований и невысоких углов возвышения светила изображения требуют топографической коррекции с применением алгоритма SCS + C [9].

Главные компоненты, рассчитанные для изображения, отражают вклад в интегральную картину отдельных каналов, их анализ достаточно известен для картирования вторичных изменений при металлогенических исследованиях [10]. Глинистые минералы характеризуются сильным поглощением в 7 канале Landsat 8 OLI ($2,11-2,29 \mu\text{m}$) и значительным отражением в канале 6 ($1,57-1,65 \mu\text{m}$), отношение этих спектральных каналов (7/6) представляют собой индекс CM (clay minerals – глинистые минералы). Отношение каналов 7/2 представляет собой индекс-индикатор развития минералов-гидроксидов (HA, hydroxyl alteration), а 4/2 – индикатор присутствия минералов – оксидов железа (IO, Iron Oxide) [10; 11]. Характеристика 7 спектральных каналов Landsat 8 OLI (105/029 path/row, дата съемки 27.10.2015), использованных для анализа участка интереса «Кунаширский», приведена в табл. 1.

Расчет главных компонент изображения осуществлялся с помощью функции *pca* модуля *decomposition* библиотеки *scikit-learn* Python. Сведения о ковариации каналов изображения и его главных компонент приведены в табл. 2.

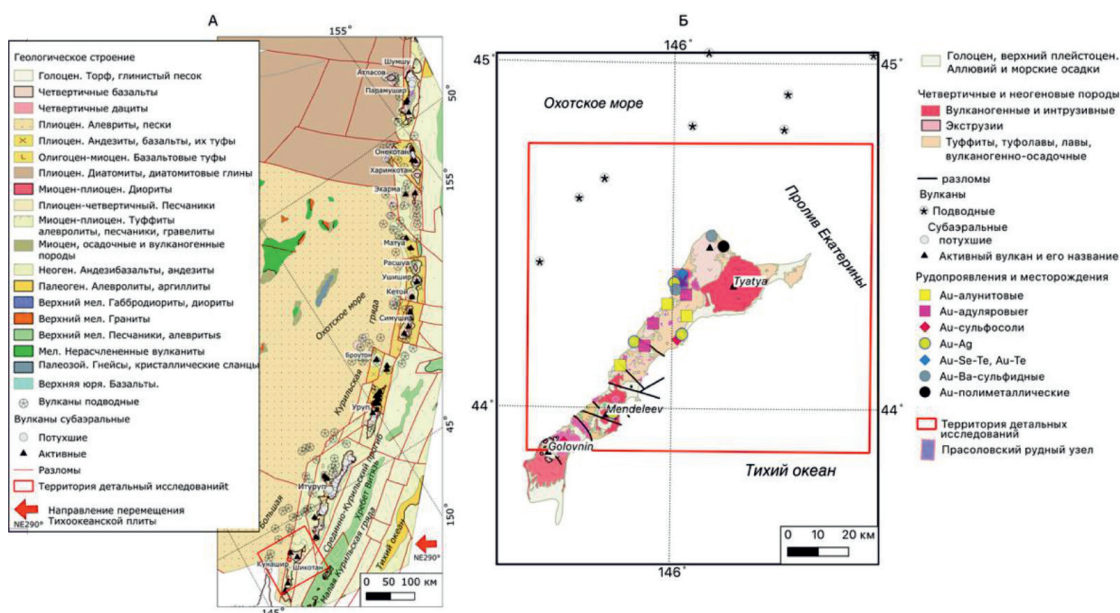


Рис. 1. А – геологическая карта Курильской островодужной системы (с использованием [3]); Б – геологическая карта и металлогения острова Кунашир

Таблица 1

Статистическая характеристика спектральной яркости изображения

	band1	band2	band3	band4	band5	band6	band7
Minimum	7660,00	6952,00	5963,00	5161,00	4993,00	4674,00	4628,00
Maximum	33884,00	36697,00	38807,00	42869,00	42474,00	17273,00	13330,00
Mean	8632,79	7911,12	6784,60	6153,18	6150,50	5405,09	5191,28
Median	8545,00	7801,00	6618,00	5976,00	5444,00	5067,00	5017,00
Std.dev.	671,39	776,81	904,92	1016,75	2241,78	1062,90	532,93

Таблица 2

Ковариация спектральных каналов изображения и их главных компонент (PC)

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
band1	0,021	0,082	0,158	-0,044	-0,011	0,019	0,000
band2	0,023	0,098	0,182	-0,056	-0,003	0,026	0,000
band3	0,013	0,146	0,193	-0,073	0,008	0,009	0,000
band4	0,011	0,170	0,213	-0,079	-0,028	0,009	0,000
band5	-0,136	0,609	0,072	-0,065	-0,012	0,009	0,000
band6	-0,091	0,245	-0,096	-0,106	-0,016	0,004	0,000
band7	-0,044	0,119	-0,044	-0,057	-0,016	0,003	0,000

Отношения спектральных каналов Landsat 8 OLI и главные компоненты сопоставлялись с матрицей обратных евклидовых расстояний до эпитегрмальных рудопроявлений и месторождений, пересчитанные в пиксели и ограниченные радиусом 50 пикселей для каждого объекта, которые рассматривались как выражение рудоносности территории (IOD). Для близко расположенных рудных объектов перекрывающиеся радиусы суммировались. Значения IOD применялись для обучения и валидации прогнозной модели логистической регрессии (также известной как «максимальной энтропии», MaxEnt).

Территория исследования покрывалась сеткой квадратных окон осреднения (ОО) площадью 1 км², для каждого полигона рассчитывалось среднее значение признака, хранящегося в растровых слоях (СМ, IOA, PC1-7, НА, NDVI), включая значения отношений спектральных каналов, главных компонент космического изображения и евклидовых расстояний до эпитегрмальных рудопроявлений и месторождений. Данные по каждому ОО помещались в атрибутивную таблицу, которая затем рассматривалась как таблица экспериментальных данных. Алгоритм оценки экспериментальных данных включает использование методов анализа особенностей отражательной способности поверхности, а также обучение и модели логистической регрессии, перспективной для прогнозных минерогени-

ческих исследований [12]. Используется класс OneClassSVM, входящий в библиотеку *scikit-learn* (рис. 2). Этот метод позволяет использовать неполные данные и оценивает вероятность принятия значения целевой переменной с максимальной энтропией и контролируется набором ограничений, представленных неполнотой информации о целевом распределении [13; 14].

Результаты исследования и их обсуждение

Для визуальной оценки и дешифрирования территории применяются композиции каналов RGB432 («естественные цвета»), а также псевдоцветные композиции: RGB642, RGB742, RGB765, RGB764, позволяющие визуально различить растительность, водные объекты, гидротермальные изменения субстрата (RGB765), развитие минералов гидроокислов и минералов – оксидов железа (НА, IOA, (НА+IOA)/2, «зона изменений») (рис. 3).

Подготовленная модель логистической регрессии была апробирована на территории острова Кунашир для данных, не использовавшихся при ее обучении. Результат построения моделью карты прогнозной перспективности территории острова Кунашир, показан на рис. 4, А. Оценка качества осуществлялась оценкой площади под ROC-кривой. Полученное нами значение 0,6540 характеризует приемлемо обученную модель (рис. 4, Б).

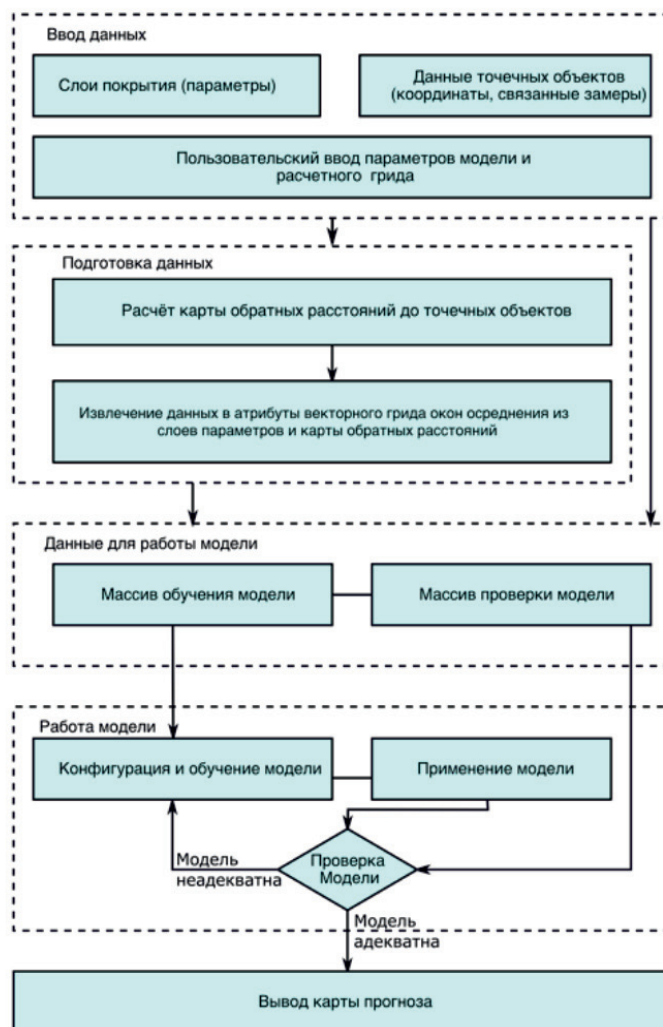


Рис. 2. Алгоритм прогнозного исследования с использованием спектральных данных и логистической регрессии, реализованный на языке Python

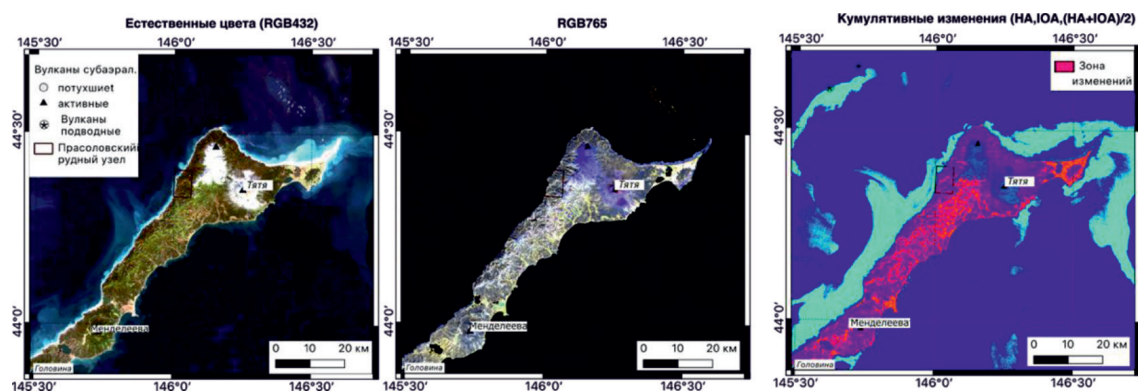


Рис. 3. Материалы для визуальной оценки территории обучения, Landsat 8 OLI (105/029 path/row, дата съемки 27.10.2015)

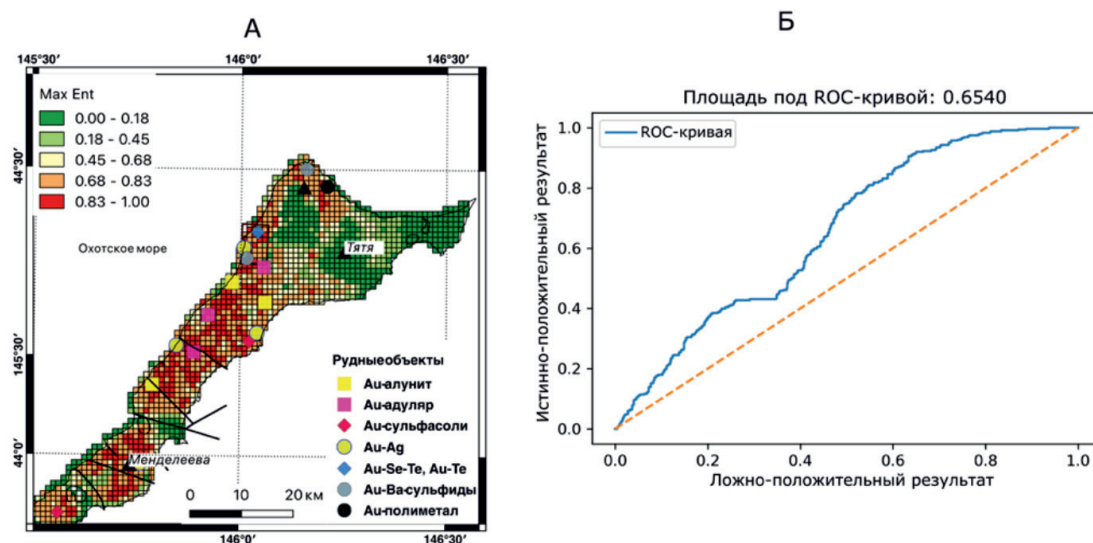


Рис. 4. А – результат, полученный при работе модели логистической регрессии, обученной по 60% данных, на острове анализа продуктов Landsat 8 OLI; Б – ROC-кривая модели, обученной по 40% исходных данных

Видно, что распределение рудных объектов в целом показано верно, показанные в оверлее рудопроявления и месторождения находятся в осевых частях выявленных «рудоперспективных» кластеров. Выделение этих кластеров производилось с помощью выделением пяти классов окон осреднения с помощью классификации естественных границ Дженкса. Три класса наименьших значений рассматривались как фоновые, два класса наибольших значений – условно перспективные. Качество применяемой модели также подтверждалось наличием внутренней зональности кластеров – значение IOD уменьшалось от центра кластера к периферии.

Выводы

Северо-восточное простирание наиболее перспективных кластеров (рис. 4А) соответствует разрывным нарушениям первого порядка и позволяет предположить их взаимосвязь с проницаемыми правосдвиговыми структурами. Это позволяет рассматривать простирание выделенных зон в качестве дополнительного поискового признака. Карта прогнозной перспективности территории острова Кунашир показывает соответствие перспективных кластеров известным рудным объектам и вулканическим структурам. Кластер на юго-западе площади, по периферии вулкана Менделеева, может рассматриваться в качестве

объекта для дальнейшего геологического опосредования. Используемая модель эффективно работает по исходным данным, включающим спектральные характеристики и только известные объекты в условиях частичной обнаженности, позволяя воссоздать распределение эпitherмального оруденения по дистанционной основе.

Список литературы / References

1. Khomich V.G., Boriskina N.G., Kasatkin S.A. Geology, magmatism, metallogeny, and geodynamics of the South Kuril Islands. *Ore Geology Reviews*. 2019. № 105. P. 151–162. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.12.015.
2. Борискина Н.Г., Касаткин С.А., Хомич В.Г. Глубинная геодинамика и особенности металлогении Кунашир-Урупского звена Курильской островодужной системы // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. 2019. № 3 (43). С. 38–51. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-3-43-38-51.
3. Boriskina N.G., Kasatkin S.A., Khomich V.G. Deep-earth geodynamics and metallogenic peculiarities in the Kunashir-Urup chain of the Kuril islands // *Vestnik KRAUNTS*. 2019. № 3 (43). P. 38–51 (in Russian).
4. Ковтунович П.Ю., Сафронов А.Д., Удодов В.В., Куделькин В.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. 2-е изд. Серия Курильская. Листы L-55-XXII, XXXIII, XXXIV, (Курильск): L-55-XXIII, XXIX, (Рейдово), L-55-XXXIII (влк. Тятя), K-55-II, L-55-XXXII (Южно-Курильск). Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2002. 269 с.
5. Kovtunovich P.Yu., Safronov A.D., Udodov V.V., Kudelkin V.V. State geological map of the Russian Federation on a scale of 1: 200,000. 2nd ed. Kuril series. Sheets L-55-XXII, XXXIII, XXXIV, (Kurilsk): L-55-XXIII, XXIX, (Reidovo), L-55-XXXIII (Tyatya volcano), K-55-II, L-55-XXXII (Yuzhno-Kurilsk). Explanatory letter. SPb.: VSEGEI, 2002. 269 p. (in Russian).
6. Гранник В.М., Рыбин А.В., Пискунов Б.Н., Чибисова М.В. Вулканологические исследования на Курильских островах: итоги и перспективы // *Вестник ДВО РАН*. 2011. № 6. С. 13–18.

- Grannik V.M., Rybin A.V., Piskunov B.N., Chibisova M.V. Volcanological investigations in the kurile islands: results and perspectives // Vestnik DVO RAN. 2011. № 6. С. 13–18 (in Russian).
5. Martynov Y.A., Khanchuk A.I., Martynov A.Y., Kimura J.-I., Rybin A.V. Geochemistry and petrogenesis of volcanic rocks in the Kuril island arc. *Petrology*. 2010. № 18. P. 489–513. DOI: 10.1134/S0869591110050048.
6. Richards J.P. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: products of remelting of subduction-modified lithosphere. *Geology*. 2009. № 37(3). P. 247–250. DOI: 10.1130/G25451A.1.
7. Кемкина Р.А., Кемкин И.В. Вещественный состав руд и минералого-геохимическая методика оценки потенциального загрязнения окружающей среды токсичными элементами (на примере Прасоловского Au-Ag месторождения). Владивосток: Дальнаука, 2007. 212 с.
- Kemkina, R.A., Kemkin, I.V. Mineral composition of ores and mineralogical-geochemical technique of a rating potential pollution of an environment by toxic elements (on an example of Prasolovka Au-Ag deposit). Vladivostok: Dal'nauka, 2007. 212 p. (in Russian).
8. Rejas J.G., Pothier C., Rigotti C., Méger N., Vásquez I., Rotunno O.C., Bonatti J., Barbosa H. Studying evolution of hydrothermal alteration materials in the Turrialba volcano trough multispectral and hyperspectral images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2020. XLIII-B2-2020. P. 1259–1264. [Electronic resource]. URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLIII-B2-2020/1259/2020/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1259-2020.pdf> (date of access: 02.09.2020).
9. Vázquez-Jiménez, R., Romero-Calcerrada, R., Arrogante-Funes, R., Novillo, C.J. Topographic Correction to Landsat Imagery through Slope Classification by Applying the SCS + C Method in Mountainous Forest Areas. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2017. № 6. P. 287. DOI: 10.3390/ijgi6090287.
10. Babu P.S., Majumdar T.J., Bhattacharya A.K. Study of spectral signatures for exploration of Bauxite ore deposits in Panchpatmali, India. *Geocarto International*. 2015. № 30:5. P. 545–559.
11. Ducart D.F., Silva A., Toledo C.L.B., Assis L. Mapping iron oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*. 2016. № 46(3). P. 331–349.
12. Zhang S., Xiao K., Carranza E.J.M. et al. Maximum Entropy and Random Forest Modeling of Mineral Potential: Analysis of Gold Prospectivity in the Hezuo–Meiwu District, West Qinling Orogen, China. *Natural Resources Research*, 2019. № 28. P. 645–664. DOI: 10.1007/s11053-018-9425-0.
13. Phillips S.J., Dudík M. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 2008. № 31(2). P. 161–175. DOI: 10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x.
14. Elith J., Phillips S.J., Hastie T., Dudík M., Chee Y.E., Yates C.J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*. 2011. № 17(1). P. 43–57. DOI: 10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x.