EARTH SCIENCES (25.00.00)

#### УДК 553.3/.4:553.04:528.8(571.63)

# НЕОТЕКТОНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ И БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНАЯ МИНЕРАГЕНИЯ ПРИМОРЬЯ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

## 1,2Шевырев С.Л.

<sup>1</sup>Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток; <sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, e-mail: shevirev@mail.ru

Прогноз месторождений полезных ископаемых и постановка поисковых работ на коренные и россыпные рудные объекты требуют уточнения глубины пострудного размыва рассматриваемых территорий, что делает актуальным распознавание и картирование неоген-четвертичных поднятий. Наряду с индикацией относительных значений эрозионного среза, локальные поднятия в ряде случаев ассоциируются с рудоносными интрузивными массивами, не вскрытыми эрозией. Территория исследования, дислокации которой сформированы в мезо-кайнозое вследствие субдукции океанической плиты Изанаги под окраину Восточной Азии, продолжает испытывать неотектонические перемещения сложной кинематики, а также различного генезиса и амплитуды. Они выражаются в неравномерной эрозии и обнажении фрагментов фундамента среди перекрывающих террейны осадочно-вулканогенных образований и сшивающих их интрузий. Присутствующие на территории постмагматические гипо-, мезо- и эпитермальные благороднометалльные месторождения характеризуются определенной контрастной сменяемостью с глубиной минерагенических ассоциаций и геохимических ореолов. В рамках проведенного исследования анализом цифровой модели рельефа SRTM выделены аномалии разности базисных поверхностей второго и третьего порядков эрозионной сети с оценкой их тектонической позиции, которые в общем случае отвечают локальным поднятиям. Обсуждаются модели формирования локальных поднятий различного генезиса, также предложена их классификация. На основе детектированных локальных поднятий, с помощью метода кластеризации k-средних, составлена карта районирования территории исследований, включая Сихотэ-Алинское орогенное сооружение и Ханкайский массив. Предложенное зонирование отражает время формирования выделенных зон, степень денудации и характер минерагенической специализации. Изложенная методология может быть задействована при формировании новых подходов к оценке минерально-сырьевого потенциала площадей.

Ключевые слова: геодинамика, вулканические пояса, дистанционное зондирование, эрозионная сеть, геоинформатика

### NEOTECTONIC ZONING AND PRECIOUS METAL MINERAGENY OF PRIMORIE ON REMOTE SENSING DATA

#### <sup>1,2</sup>Shevyrev S.L.

<sup>1</sup>Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok; <sup>2</sup>Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: shevirev@mail.ru

Prognosis of mineral resources and organization of prospective works for native and placer ore objects require determining of post ore denudation range of the areas under consideration. It makes detecting and mapping of the Neogene-Quaternary uplifts important. Along with this, local uplifts are often associated with the presence of intrusions, uncovered by the erosion. Dislocations of the Asian continental margin were formed in Meso-Cenozoic as the result of the subduction of the Izanagi oceanic plate under boundary of the Eastern Asia, continues to undergo tectonic movements of complicated kinematics, different genesis and amplitude. They are expressed in differentiated erosion cut and exposition of terrane basement among overlying sedimentary-volcanogenic complexes and later intrusions. Post magmatic hypo-, meso- and epithermal gold-silver deposits have typical contrast sequence of mineragenic associations and geochemical haloes which change with depth. During given research anomalies of base difference surfaces of 2nd and 3rd orders were detected for the erosion network by analysis of digital relief model SRTM. Their tectonic position was determined as related to the tectonic uplifts in the most cases. Models of the local uplifts formation of different genesis were discussed, with proposals of classification approaches. On a base of detected local uplifts, method of k-means allowed to commit zoning of research area, including Sikhote-Alin folded belt and Khanka massif. Given zoning reflects time of discreet zones forming, their level of erosion and mineragenic specialization. Proposed methodology could be applied in forming of the new approaches to assessment of areas mineral potential.

Keywords: geodynamics, volcanic belts, remote sensing, erosion network, geoinformatics

Территория исследований представляет собой коллаж террейнов, объединённых последовательностью и условиями формирования геологических комплексов Сихотэ-Алинского горно-складчатого сооружения и Ханкайского массива, осложнённых на востоке перекрывающими и сшивающими образованиями Восточно-СихотэАлинского вулкано-плутоногенного пояса (ВСАВПП) [1]. В пределах территорий распространения производных мезо-кайнозойского вулканизма, степень и тип рудной минерализации во многом обусловлен составом и парагенезисом подстилающих и вмещающих осадочно-метаморфических пород и прорывающих их магматических

НАУКИ О ЗЕМЛЕ (25.00.00)

комплексов [2]. Это подтверждается вертикальной зональностью оруденения и коррелируется с глубиной денудации минерализованных площадей.

Целью настоящего исследования является изучение локальных геоморфологически выраженных поднятий, их классификация и прогнозное минерагеническое районирование Сихотэ-Алинской орогенной системы. Достижение этой цели обеспечивается подбором дистанционной основы на территорию исследования (юг Сихотэ-Алиня в пределах Приморского края), включающей цифровую модель рельефа и результаты гравиметрической съемки; разработкой вычислительного аппарата для дешифрирования порядков водотоков, расчета поверхностей базиса эрозии и их разностей; построением карт локальных максимумов разности базисных поверхностей; районированием (кластеризацией) территории исследования по геоморфологическим аномалиям; интерпретацией выделенных районов и определением их благороднометалльного потенциала.

#### Геологическое строение и историко-минерагенические особенности Сихотэ-Алинского горно-складчатого сооружения

Площадь исследуемой территории Приморского края, соответствующая листам L-(52), 53 и (К-52, 53), в геологическом отношении представляет собой Ханкайский массив, супертеррейновое сооружение Сихотэ-Алиня и ВСАВПП, сформированные в результате активного взаимодействия системы «континент - океан» с эпизодами субдукционного и трансформного режимов. Несмотря на полуторавековую историю наблюдений и геологического изучения, разведанные запасы благородных металлов здесь существенно ниже, чем на сопредельных территориях [3]. На площади Сихотэ-Алинского горно-складчатого сооружения описаны Нижне-Амурский и Кемский благороднометалльные пояса, а также Благодатненский, Аскольдовский, Нижнетаежный рудные узлы, как и отдельные Au-Ag месторождения и рудопроявления [1; 4] (рис. 1). Благороднометалльные месторождения и проявления приурочены к грейзенизированным и скарнированным интрузивным массивам, а также к субвулканическим телам и малым интрузиям и обладают выраженной латеральной и вертикальной зональностями. Примером такого зонального распределения многометалльной минерализации является месторождение серебра Кумирное, детально описанное в работе [4].

Площадная дифференциация территории Сихотэ-Алинского супертеррейна по степени интенсивности производных рудообразующих процессов возможна анализом вещественного состава и возраста до-, син- и пострудных геологических комплексов. Сведения об унаследованной позднекайнозойской тектонической активности, распределении препарированных денудацией или перекрытых рудоносных интрузивов могут быть получены анализом значений разности базисных поверхностей эрозионной сети.

История формирования южной и центральных частей ВСАВПП, длящаяся около 90 млн лет, включает три главных этапа магматической активности: позднемеловой (~90-70 млн лет), маастрихт-раннемиоценовый (~69,4-19,0 млн лет) и поздний миоцен-плиоценовый (~16-4 млн лет). Первый и второй магматические этапы связывают с субдукцией, заключительный – с рифтогенезом [5].

#### Материалы и методы исследования

Связь металлогении и локальных поднятий, в том числе неотектонических, обосновывалась многими исследователями, в том числе А.А. Гавриловым, Н.Т. Кочневой, Р.И. Никоновой, Ю.Н. Размахниным, И.Н. Томсоном, Г.И. Худяковым, Ю.П. Юшмановым и другими [6]. Однако следует отметить, что данные исследования использовали методологический аппарат, лишенный современных ГИС-технологий, особенно в части обнаружения локальных поднятий, их картографирования и дальнейшего районирования.

Для детектирования зон новейшей активизации и площадной дифференциации Сихотэ-Алинского горно-складчатого сооружения автором используется модернизированный метод анализа базисных поверхностей Философова [7; 8], на основе анализа спутниковой цифровой модели рельефа (ЦМР), обрабатываемой с помощью научных языков программирования Python (включая библиотеки Gdal, Numpy и Pandas) и Matlab.

Современная гидросеть, отраженная на ЦМР SRTM, содержит информацию об интенсивности эрозионного процесса территории и ее изменениях, вызванных колебаниями уровня моря, активизацией складчатого горообразования, а также рифтогенезом.

В соответствии с методом базисных поверхностей наиболее древние водотоки территории имеют наивысший, а менее древние – меньший порядок, при этом современные водотоки, не имеющие притоков, представляют первый порядок. Заложение

гидросети территории отражает время наиболее значительных тектонических или климатических изменений, приведших к смене циклов осадконакопления.

Алгоритм детектирования локальных поднятий и районирования описан ниже (таблица).



Рис. 1. Структурно-вещественные комплексы исследованной территории юга Дальнего Востока России и ее благороднометалльная минерагения

Алгоритм расчета разности оазисных поверхностеи и нахождения
локальных неотектонических поднятий

...

Шаг	Процедура
1	Подбор спутниковой ЦМР SRTM и геологических данных на общирную территорию южного и центрального Сихотэ-Алинского складчатого сооружения
2	Детектирование эрозионной сети на ЦМР, использован Matlab Topo Toolbox, отличающийся высо- ким качеством распознавания ЦМР SRTM для залесенных территорий
3	Выделение водотоков 2-го и 3-го порядка
4	Интерполяция поверхностей базиса эрозии 2-го и 3-го порядков
5	Расчёт разностной поверхности 2–3 порядков
6	Оконтуривание положительных аномалий базисных поверхностей пороговым отсечением
7	Нахождение точек центроидов локальных аномалий разности базисных поверхностей и присвоение им значений площади кластера
8	Классификация положительных локальных аномалий базисных поверхностей по значениям площади
9	Кластеризация пространственного распределения центроидов с учетом класса площади
10	Нахождение границ кластеров и районирование территории исследования
11	Интерпретация выделенных районов с учетом анализа развитых в их пределах магматитов и рекон- струируемых тектонических событий

154



Рис. 2. Карта разности базисных поверхностей 2-го и 3-го порядков (A) и положение локальных максимумов поднятий. Шкалирование точек проведено пропорционально площади выделенных поднятий (B)

Применение указанного алгоритма позволило получить карту разностей базисных поверхностей 2-го и 3-го порядков (рис. 2).

# Результаты исследования и их обсуждение

Анализом карты разности базисных поверхностей и локализованных поднятий проведено районирование территории (рис. 2, A, B).

Базисные эрозионные поверхности [6] и их разность демонстрируют проявление неотектонических движений в течение времени формирования порядков гидросети и неравномерность развития процессов денудации. Генезис выявленных в пределах площади исследований поднятий раскрывается их сопоставлением с подстилающими структурно-вещественными комплексами, а также геофизическими данными.

Так, положительные аномалии разности базисов эрозии, соответствующие линейным зонам пониженных значений поля силы тяжести, пространственно сопряжённые с разломами, предположительно связаны с изостатическим процессом воздымания разуплотненных пород зон дробления. Локальные изометрические поднятия, выраженные в положительных аномалиях силы тяжести и контрастных линейных аномалиях магнитного поля, связаны с обнаженными и, вероятно, слабо перекрытыми интрузивными массивами основного состава. Остаточные поднятия выражены в локальных максимумах разности базисных поверхностей на фоне погружения сопряжённых блоков.

Миоцен-четвертичный диапазон возрастов оцениваемых структур соответствует времени формирования эрозионной сети, начало развития которой означает для Сихотэ-Алиня завершение этапа крупных структурно-тектонических перестроек территории [9]. Квартер ознаменовался развитием локальных структур и заключительными эпизодами вулканизма на юго-западе Сихотэ-Алинского пояса [10].

Анализ карты разности базисных поверхностей второго и третьего порядков в сопоставлении с известными полями позднекайнозойских вулканитов, препарированными раннемеловыми интрузиями и глубинными разломами, позволил уточнить роль процессов активного воздымания и денудации в формировании современного рельефа Сихотэ-Алинского складчатого пояса. Дешифрированные локальные аномалии включают эрозионные останцы, магматогенные или изостатические поднятия в разуплотненных приразломных зонах, метасоматически изменённые изостатически флотирующие массивы среди дислоцированных комплексов. Для дальнейшего определения генезиса картированных положительных аномалий использовался набор формальных признаков: структурно-вещественные ассоциации пород, близость крупных разломов, геоморфологические характеристики эрозионного рельефа, а также материалы авторских полевых наблюдений. Локальные поднятия, связанные с изостатическим (гравитационным) вязкопластическим перераспределением масс в земной коре, вызываются изменением плотности пород при меланжировании в сосдвиговых зонах и взаимодействии с подземными водами и гидротермальными растворами. Грейзенизация приводит к уменьшению объема и увеличению плотности изначальной породы [11], аргиллизация, каолинизация,

альбитизация – к существенному снижению плотности [12–14].

Для районирования территории по уровню ее денудации применялся метод k-средних (k-means) [15]. Этот метод позволяет учитывать данные точек-центроидов локальных поднятий, содержащих значения максимума разностной поверхности в ее пределах. Районирование производится на основе заданного произвольного количества кластеров до сходимости с принятым геодинамическим районированием территории. Для центроидов детектированных локальных поднятий были выделены 4 зоны (рис. 3, а), различающиеся плотностью структур и их площадью (рис. 3, б). Они типизируются по вероятному происхождению поднятий: 1 – бимодальные вулканогенно-осадочные покровы олигоцен-миоцена на северо-востоке территории; 2 – эродированные раннемеловые абиссальные массивы с наличием вулканогенных поднятий и плато на юго-западе; 3 – эрозионные останцы на территории Ханкайского массива (северо-запад); 4 глыбовые деформации, эродированные абиссальные интрузии в центральной части площади исследований.

Высотная амплитуда базисных поверхностей территории составила около 300 м.



Рис. 3. Районирование территории (k-means) по положениям центроидов и амплитуде локальных поднятий (a), статистика счета и площадей локальных поднятий в пределах отдельных зон (б)

156

НАУКИ О ЗЕМЛЕ (25.00.00)

Например, на месторождении Кумирное, находящемся в зоне 1, такой перепад высот обеспечил последовательную смену оловомедно-серебряной минерализации (Sn-Cu-Ag) на отметках 150-200 м полиметалльно-серебряной (Zn-Pb-Ag) на отметках 200-500 м, и золото-серебряной (Au-Ag) (отметки 500-700 м) в приводораздельной части [4]. Выполненное нами районирование территории исследований в общем виде описывает уровень эрозионного среза и возраст структур, а следовательно, имеет минерагеническое значение.

#### Выводы

В результате проведённого исследования установлена латеральная зональность Сихотэ-Алинского горно-складчатого сооружения, обусловленная плотностью и взаимным расположением положительных аномалий разности базисных поверхностей 2-го и 3-го порядков. Выявленные с помощью алгоритма k-средних зоны получили свою геодинамическую интерпретацию, для чего учитывалось преобладание и взаимное расположение объектов определённой площади в пределах рассматриваемой зоны. Также устанавливалось их соответствие таким объектам магматических поясов, как эродированные абиссальные интрузивы или вулканические центры. Выделенные зоны соответствуют участкам Сихотэ-Алинского подвижного пояса, в пределах которого в разной степени проявились горообразовательные процессы и коровое гравитационное перераспределение масс, способствующее формированию локальных аномалий разности базисных поверхностей, рассматриваемых в качестве поднятий.

#### Список литературы / References

1. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: В 2 кн. / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.

Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii: Vol. 1, 2 / Editor A.I. Hanchuk. Vladivostok: Dal'nauka, 2006. Vol. 1. 572 p. (in Russian).

2. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems. Economic Geology. 2010. Vol. 105. № 1. P. 3-41. DOI: 10.2113/ gsecongeo.105.1.3.

3. Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. A geodynamic perspective of world-class gold deposits in East Asia. Gondwana Research. 2014. Vol. 26. P. 816-833. DOI: 10.1016/j.gr.2014.05.007.

4. Ивин В.В., Медведев Е.И., Фатьянов И.И. Зональность многометалльного оруденения Кумирного месторождения серебра (Северное Приморье) // Успехи современного естествознания. 2017. № 3. С. 85-91.

Ivin V.V., Medvedev E.I., Fatyanov I.I. Zoning of multimetall ore-bearing of Kumirnoe silver deposit (Northern Primorye) // Advances in Current Natural Sciences. 2017. № 3. P. 85-91 (in Russian).

5. Martynov Yu.A., Golozubov V.V., Khanchuk A.I. Mantle diapirism at convergent boundaries (Sea of Japan). Russian Geology and Geophysics. 2016. Vol. 57. Issue 5. P. 745-755. DOI: 10.1016/j.rgg.2015.09.016.

6. Гаврилов А.А. История и основные результаты геолого-геоморфологических исследований территории юга Дальнего Востока // Вестник ДВО РАН. 2009. № 4. C. 164-178.

Gavrilov A.A. History and basic results of the geologicgeomorphological studies in the Southern Far East of Russia // Vestnik of the far east branch of the russian academy of sciences. 2009. № 4. P. 164-178 (in Russian).

7. Shevyrev S. Neotectonics, remote sensing and erosion cut of ore-controlling structures of the Mnogovershinnoe goldsilver deposit (Khabarovsk Krai, Russian Far East). Ore Geology Reviews. 2019. Vol. 108. P. 8-22. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.11.016.

8. Философов В.П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: СГУ, 1975. 232 с.

Philosophov V.P. Fundamentals of morphometric method for search of tectonic structures. Saratov: SGU, 1975. 232 p. (in Russian).

9. Мартынов Ю.А., Ханчук А.И. Кайнозойский вулканизм Восточного Сихотэ-Алиня: результаты и перспективы петрологических исследований // Петрология. 2013. Т. 21. № 1. C. 94–108. DOI: 10.7868/S0869590313010068.

Martvnov Yu.A., Khanchuk A.I. Cenozoic volcanism of the eastern Sikhote Alin: Petrological studies and outlooks. Petrology. 2013. Vol. 21. № 1. P. 85–99. DOI: 10.1134/ S0869591113010049.

10. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист (L-(52), 53; (K-52, 53). Оз. Ханка. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2011. 684 с.

State geological map of Russian Federation. Scale 1:1000000. (3rd generation). Sheet (L-(52), 53; (K-52, 53). Lake Khanka. Text description. SPb.: VSEGEI, 2011. 684 p. (in Russian)

11. Launay G., Sizaret S., Guillou-Frottier L., Gloaguen E. Melleton J., Pichavant M., Champallier R., Pinto F., Ferraz P. Greisenisation and Permeability Changes in Granitic Intrusions Related to Sn-W Deposits: Case of Panasqueira. Conference paper. SGA, 2017. [Electronic resource]. URL: https://www. researchgate.net/publication/316861346\_Greisenisation\_ and\_Permeability\_Changes\_in\_Granitic\_Intrusions\_Related\_ to\_Sn-W\_Deposits\_Case\_of\_Panasqueira (date of access: 15.07.2019).

12. Brimhall G.H., Dietrich W.E. Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems. Results on weathering and pedogenesis. Geochim. Cosmochim. Acta. 1987. Vol. 51. P. 567-587. DOI: 10.1016/0016-7037(87)90070-6.

13. Frolova J., Ladygin V., Rychagov S., Zukhubaya D. Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril-Kamchatka island arc. Engineering Geology. 2014. Vol. 183. P. 80-95. DOI: 10.1016/j. enggeo.2014.10.011

14. Kaur P., Chaudhri N., Hofmann A.W., Raczek I., Okrusch M., Skora S., Baumgartner L.P. Two-Stage, Extreme Albitization of A-type Granites from Rajasthan, NW India // Journal of Petrology, 2012. Vol. 53. Issue 5. P. 919–948. DOI: 10.1093/petrology/egs003.

15. Vanderplus J. Python Data Science Handbook. Essential Tools for Working with Data. O'Reilly Media, 2016. 548 p.