

УДК 553.3/4:553.04:528.8

## КАРТИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ ТЕРРИТОРИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ АНАЛИЗОМ ИЗОБРАЖЕНИЙ LANDSAT 8 OLI (КЕМСКИЙ ТЕРРЕЙН, СИХОТЭ-АЛИНСКИЙ СКЛАДЧАТЫЙ ПОЯС)

<sup>1,2</sup>Шевырев С.Л., <sup>2</sup>Шевырева М.Ж., <sup>2</sup>Горобейко Е.В.<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, e-mail: shevirev@mail.ru;<sup>2</sup>Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток

Усиление роли технологий дистанционного зондирования Земли в геологическом изучении труднодоступных территорий Дальнего Востока России востребовано для детектирования тектонических структур различных порядков, определения перспективности площадей на рудные и комплексные полезные ископаемые. Площадные колебания отражательной способности горных пород, связанные с присутствием различных породообразующих минералов и вторичными изменениями, служат ключом к дистанционному геологическому картированию. Одним из препятствий, возникающих при проведении таких исследований, является необходимость в уменьшении влияния растительного покрова, затушевывающего подстилающие горные породы. Этого можно достичь вычислением вклада в наблюдаемую картину спутниковых индексов, рассчитанных для видимых и инфракрасных каналов системы Landsat 8 OLI и демонстрирующих относительные содержания минералов и плотность растительности. Вычисление соответствующих минеральным концентрациям направленных главных компонент (НГК) на основе их дисперсий производится с помощью авторского программного обеспечения DefME. В случае успешного подбора «минеральных» и «растительных» спутниковых индексов нагрузки главных компонент имеют противоположный знак, при этом значения нагрузок компоненты растительного покрова существенно превосходит по модулю значение минеральной компоненты. Дистанционное картирование подстилающих структурно-вещественных комплексов может быть выполнено с помощью методов классификации изображений, отражающих содержание минеральных компонент в подстилающих породах, например с помощью метода К-средних. Такой подход позволил выделить на дистанционной фотооснове границы распространения структурных этажей территории, литологических разностей и минерогенических зон. Технология была опробована нами в пределах Кемского террейна (Восточно-Сихотэ-Алинский вулканоплутонический пояс, ВСАВП) с выделением тектонических границ, контролирующих распространение вулканогенно-осадочного чехла ВСАВП и его складчатого фундамента. Полученные классы К-средних получили развернутую геологическую интерпретацию.

**Ключевые слова:** вулканические пояса, машинное обучение, scikit-learn, геологическое картирование, дистанционное зондирование, главные компоненты, Landsat 8

## MAPPING OF THE STRUCTURAL AND SUBSTANTIAL COMPLEXES OF THE TERRITORY BY AUTOMATED ANALYSIS OF LANDSAT 8 OLI IMAGES (KEMA TERRANE, SIKHOTE-ALIN FOLDED BELT)

<sup>1,2</sup>Shevirev S.L., <sup>2</sup>Shevireva M.Zh., <sup>2</sup>Gorobeyko E.V.<sup>1</sup>Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: shevirev@mail.ru;<sup>2</sup>Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok

Increasing role of remote sensing in the geological exploration of detached areas of the Russian Far East is in demand for detecting tectonic structures of various orders, determining mineral prospectivity of areas for ore and complex minerals. Areal changes of ground reflectance that are associated with distribution of rock-forming minerals and alterations are the key to regional remote geological mapping. Necessity of reduction of vegetation cover influence, which obscures underlying rocks is one of the critical challenges. This can be achieved by computations the contribution of satellite indices of the visible and infrared channels of the Landsat 8 OLI. Calculation of the directional principal components (DPC) that correspond to the mineral concentrations on the basis of their dispersions is carried out using open-source software DefME. In case of a successful selection of «mineral» and «plant» satellite indices, loads of the main components should have the opposite sign, while the loadings of the vegetation cover component significantly exceed value of the mineral component in modulus. Remote mapping of underlying structural and substantial complexes implies methods of image classification, for example, K-means method. This approach made it possible to identify boundaries of the structural levels, lithological differences and mineragenic zones basically on remote sensing. The technology was tested within the Kema terrane (East Sikhote Alin volcano-plutonic belt, ESAVP), with the identification of tectonic boundaries that control distribution of volcanic-sedimentary cover of the ESAVP and its folded basement. The resulting K-means classes have received a detailed geological interpretation.

**Keywords:** volcanic belts, machine learning, scikit-learn, geological mapping, remote sensing, principal components, Landsat 8

В Восточноазиатском регионе, включая территории Дальнего Востока России и Китая, существуют обширные площади, перспективные на коренные

и россыпные месторождения Au-Ag гидротермального, грейзенового или метасоматического происхождения [1–3]. Наиболее крупные рудно-россыпные районы золота

и серебра расположены вблизи границ палеозойских и мезозойских супертеррейнов, которые сложены турбидитовыми отложениями, фрагментами древних островных дуг и континентальными блоками [4, рис. 1]. Исследователи последних двух десятилетий рассматривали пространственную и генетическую взаимосвязи благороднометалльных рудных районов с периферией стагнированного по глубине мантийного слэба [5, 6]. Внутри контура этого слэба присутствуют многочисленные месторождения золота и серебра разного генезиса, характеризующиеся небольшими площадью и ресурсами. Полевые исследования этих объектов могут быть осложнены их труднодоступностью из-за расчлененного рельефа и густой растительности, что препятствует обнаружению и оконтуриванию перспективных участков. Усиление рентабельности и повышение производительности полевых работ возможны за счет проведения дистанционной геологической рекогносцировки, позволя-

ющей оконтурить границы структурно-вещественных комплексов (СВК) территории. Для достижения этой цели необходимо решить задачи синтеза методик полевого опробования, лабораторных минералогических исследований и анализа изображений минеральных компонентов, полученных на основе спутниковых данных с использованием методики программного устранения влияния растительности с помощью направленных главных компонент (НГК) [7].

### Материалы и методы исследования

Исследование было выполнено на территории Кемского террейна в составе Сихотэ-Алинского горно-складчатого пояса, где присутствуют небольшие ресурсы субвулканических метасоматических отложений. Территория детальных исследований площадью 3000 км<sup>2</sup> включает золотосеребряное месторождение Салют, Березовскую перспективную площадь и более мелкие проявления Au-Ag оруденения (рис. 1).

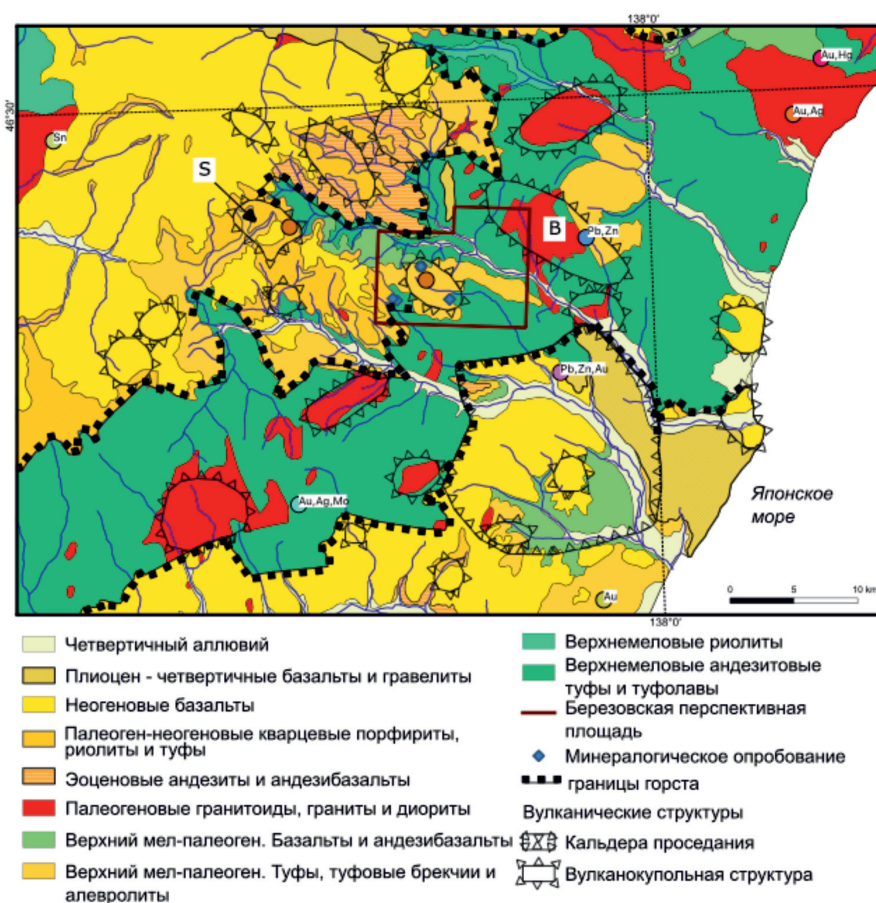


Рис. 1. Геологическая карта территории детальных исследований, включая вулканические центры и точки минерализации. S – вулканический купол месторождения Салют. B – Быковский интрузивный купол

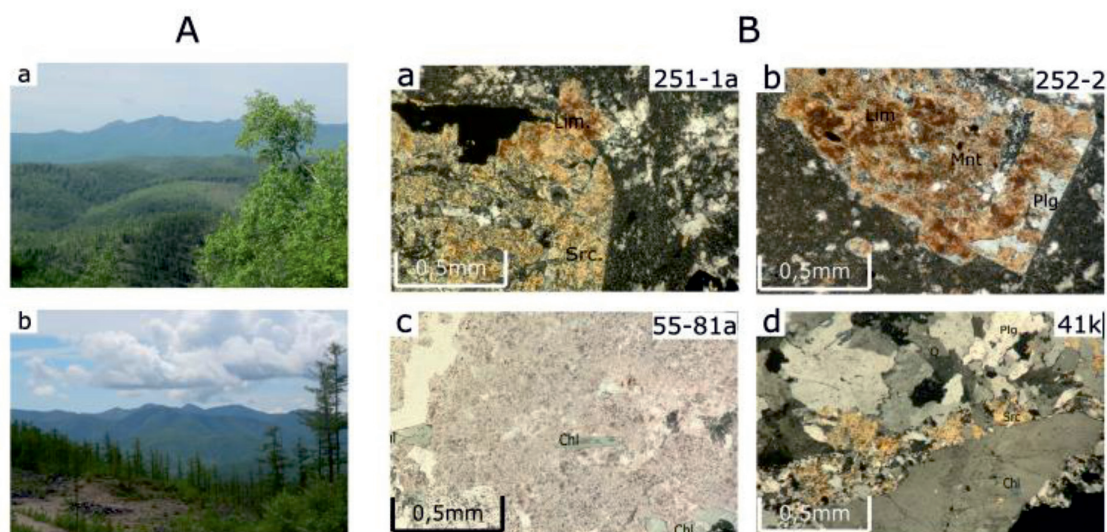


Рис. 2. Распространенные ландшафты и типичные минералы вторичных изменений территории исследования. Ландшафты (А): а – залесенные водоразделы Березовского участка; б – редкая растительность и курумы. Минералы вторичных изменений (В): а, б – риолитовые туфы с лимонитом и гидрослюдой; с – частично перекристаллизованный риолитовый туф; д – кварц-карбонатизированный риолитовый туф. Сокращения: py – pyrite, asp – arsenopyrite, Q – quartz, chl – chlorite, ep – epidote, Src – sericite, lim – limonite, Mnt – montmorillonite

Геологическое строение района исследований представляет собой складчатый фундамент, сложенный нижне- и верхнемеловыми осадочными и вулканогенными породами, несогласно перекрытый верхнемеловым-кайнозойским чехлом, прорванным измененными палеогеновыми гранитами. В районе находится несколько известных вулканических центров с разной степенью эрозии, описанных как мощные переслаивающиеся толщи лав и туфов базальтов и андезитов (палеоцен – ранний эоцен) и риолитов (эоцен) [8]. В центральной части площади исследования эрозия была вызвана поднятием блока (горста), вытянутого в северо-восточном направлении через территорию. Эффузивно-осадочный чехол подвергся эрозии, при этом вулканические аппараты размыты до субвулканических магматических очагов, прорывающих верхнемеловые андезитовые вулканогенно-осадочные породы. Территория интенсивно залесена (рис. 2а), минеральные грунты обнажаются на площадях вырубki леса и гарях.

Вулканические породы, особенно кислые туфы и туфолавы, в районе исследований интенсивно метасоматически изменены. Обломки вулканического пепла и лапилли в туфах обычно замещаются вторичными минералами, включающими единичные и кластерные включения хлорита,

эпидота, кварца и минералов, более характерных для зон рудной минерализации (оксиды железа, т.е. лимонит, гетит, гидрослюда (серицит) и каолинит).

Метасоматические изменения горных пород в пределах Березовского участка также включают интенсивную березитизацию, связанную с зонами трещиноватости северо-восточного и широтного направлений. В осевых частях этих зон встречаются кварц-серицитовые породы с гнездами вкрапленного пирита, эпидота и хлорита. В некоторых местах исходные минералы полностью замещены кварцем. Гидрослюды, преимущественно серицит, присутствуют в краевой части зон березитизации. Несмотря на обширный метасоматоз, структура исходных эффузивов в основном сохранилась.

С целью выбора минералов, характерных для различных СВК, для использования в разработке алгоритма дистанционного зондирования были исследованы натурные образцы измененных пород рудопроявлений в пределах Березовского участка (рис. 2В).

Лабораторные микроскопические исследования минерального состава послужили основой выбора минеральных видов для расчета изображений минеральных концентраций на основе спутниковых индексов и их главных компонент (таблица). Петрографическим анализом каменного материала пород, вмещающих оруденение



на территории, установлена неравномерность распространения вторичных минералов; установлены участки, где породы в основном состоят из гидрослюда и где кварцевый компонент составляет менее 20–25%, а также участки, где доля кварца достигает 60–70% объема. Растительность покрывает площадь исследований почти полностью, не оставляя достаточной территории для прямых воздушных или космических наблюдений. Типичные изображения ландшафтов и метасоматически измененных горных пород, которые были получены в полевых условиях, показаны на рис. 2А.

Перед моделированием безоблачные изображения Landsat 8 OLI подвергались атмосферной и топографической коррекции. Атмосферная коррекция включала исправление результата рассеяния отраженного электромагнитного излучения, выражающегося в том, что значения естественно черных пикселей изображения были больше нуля [9]. Алгоритм топографической коррекции SCS+C был применен для уменьшения неравномерности распределения солнечной радиации на изображениях каналов Land-

sat 8 OLI, вызванной расчлененным рельефом местности и низким положением светила [10]. Спутниковые продукты (табл. 1) были подвергнуты анализу НГК, чтобы уменьшить влияние растительного фона. По методике анализа [7] соотношение полос минералов было выбрано в соответствии с их пиками в спектрах отражения, при этом отношения каналов должны быть  $>1$  для индексов отражения растительности [7, рис. 1]. Перед этой операцией территория была разделена на классы с помощью нормализованного индекса растительности (NDVI), чтобы исключить пиксели акватории и области плотного растительного покрова из вычислений из-за их низкой отражательной способности. Для расчета направленных главных компонент использовалось авторское программное обеспечение DefME [11]. При оценке изображений полученных минеральных компонент (рис. 3) следует учитывать, что речь идет не о количественном содержании минералов, а об их предполагаемом присутствии, полученных с учетом пиковых значений лабораторных кривых их спектральной яркости [7].

Соотношения каналов Landsat 8 OLI для получения изображений типичных минеральных компонент, присутствующих на территории [7]

Минеральный вид	Отношения спектральных каналов для получения НГК	
	Отношения спектральных каналов для растительности	Отношения спектральных каналов для минералов
Кварц	5/4	6/1
Мусковит	3/1	6/4
Каолинит	3/1	7/4
Хлорит	3/4	5/7
Гематит	5/4	4/1
Лимонит	5/4	6/7

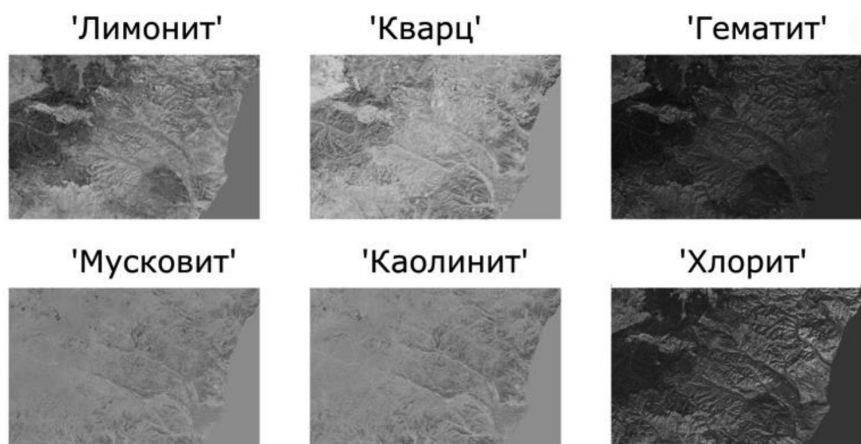


Рис. 3. Изображения направленных главных компонент, соответствующие минералам вторичных изменений на территории исследования

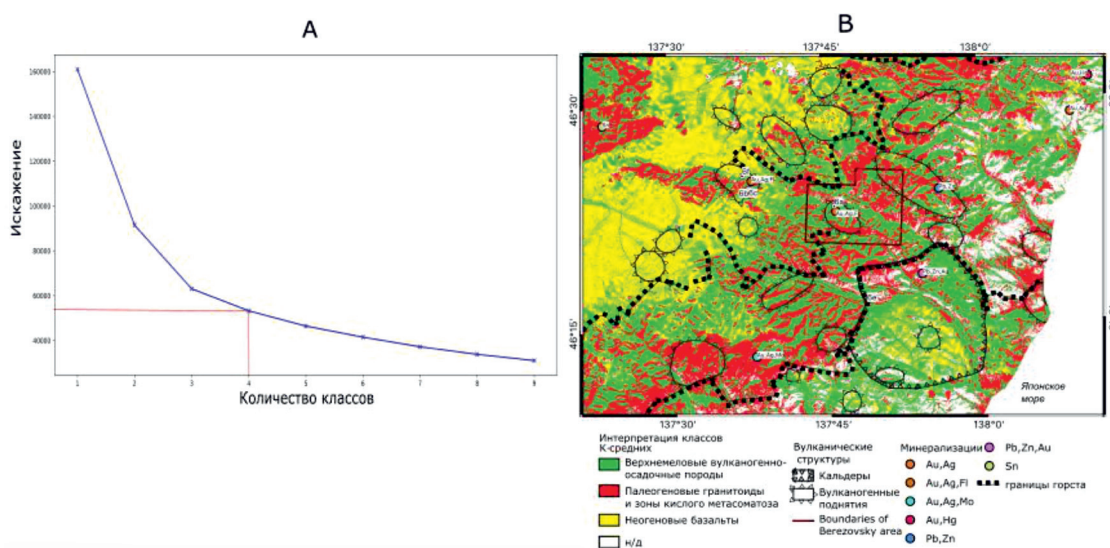


Рис. 4. Нахождение оптимального количества классов К-средних (А) и полученная на их основе карта с интерпретацией (Б)

### Результаты исследования и их обсуждение

Для классификации территории с помощью изображений НГК, отражающих минеральные концентрации, применялся метод К-средних [12], реализуемый в библиотеке Python *scikit-learn*. Оптимальное количество классов подбиралось с помощью метода «локтя» («elbow method»), описанного в [13], обуславливающего выбор числа классов как баланс детальности изображения и его искажения, возвращаемого с помощью свойства *kmeanModel.inertia*. Согласно этой методике, следует выбирать такое число классов, чтобы значение, превышающее его, не приводило к существенному уменьшению искажения изображения. Для территории, включающей Березовскую рудоперспективную площадь и месторождение Салют, оптимальными оказались четыре класса. Сопоставлением геологической карты и фактических материалов выполнена интерпретация их геологической природы, это: «верхнемеловые вулканогенно-осадочные породы», «палеогеновые гранитоиды и зоны кислого метасоматоза», а также «неогеновые базальты» (рис. 4). Несмотря на менее четкие границы комплексов, чем на геологической карте, в целом сохраняется характер их распространения; размытость границ может быть обусловлена интенсивным метасоматозом пород территории.

### Выводы

В процессе выполнения работы достигнута поставленная цель, заключающаяся в оконтуривании границ СВК и построении карты их распространения. Показано, что минералы, типичные для известных пород территории, присутствие которых установлено посредством лабораторных исследований, могут быть идентифицированы в спектрах дистанционных изображений. Полученная нами карта районирования на основе минеральных изображений, сгенерированных с помощью метода направленных главных компонент, характеризуется существенным совпадением классов К-средних и структурно-вещественных комплексов территории. Такие графические построения могут быть использованы для минерагенического районирования, экспресс-оценки территории и рекогносцировки перед постановкой полевых работ.

### 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. 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.
4. Shevryev 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.

5. Khomich V.G., Boriskina N.G. Ore-magmatic systems with noble metals in the northern marginal sector of the Argun superterrane. *Doklady Earth Sciences*. 2007. № 414. P. 534–537.

6. Deng J., Wang C., Bagas L., Carranza E.J.M., Lu Y. Cretaceous–Cenozoic tectonic history of the Jiaojia Fault and gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: constraints from zircon U–Pb, illite K–Ar, and apatite fission track thermochronometry. *Miner Deposita*. 2015. № 50. P. 987–1006.

7. Carranza E.J.M., Hale M. Mineral imaging with Landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrane. *Int. J. Remote Sensing*. 2002. № 23(22). P. 4827–4852.

8. 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-Алиня // *Успехи современного естествознания*. 2020. № 4. С. 169–175. DOI: 10.17513/use.37381.

Chashchin A.A., Popov V.K., Budnitskiy S.Yu., Chashchin S.A., Nozdrachev E.A. New data on the age of volcanic

complexes from the Cenozoic rift basins of the Eastern Sikhote-Alin. *Advances in Current Natural Sciences*. 2020. № 4. P. 169–175. DOI: 10.17513/use.37381 (in Russian).

9. Richards J.A. Remote sensing digital image analysis. Fifth edition. Springer. 2013. 502 p. DOI: 10.1007/978-3-642-30062-2.

10. Soenen S.A., Peddle D.R., Coburn C.A. SCS+C: A Modified Sun-Canopy-Sensor Topographic Correction in Forested Terrain // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2005. Vol. 43. № 9. P. 2148–2159.

11. DefME. Software page. [Electronic resource]. URL: <https://github.com/SergeiShevyrev/DefME> (date of access: 01.10.2021).

12. Scikit-learn, 2020a. K-means clustering. Scikit-learn. [Electronic resource]. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html> (date of access: 01.10.2021).

13. Umargono E., Suseno J.E., Vincensius Gunawan S.K. K-Means clustering optimization using the Elbow method and early centroid determination based-on mean and median. In *Proc. of the Int. Conf. on Information System and Technology (CONRIST 2019)*, 2020. P. 234–240. DOI: 10.5220/0009908402340240.