

Плотностные неоднородности в верхней коре Шанучского рудного района и проблема выявления нескрытых никеленосных интрузий (Камчатский срединный массив)

Выявлены потенциально перспективные на никель структуры, их местоположение и формы. Проведена интерпретация аномалий силы тяжести в Шанучском рудном районе. Построена трехмерная плотностная модель верхней коры до глубины 20 км. Выявлены плотные блоки с незродированными базитовыми интрузиями – возможными рудогенерирующими магматическими системами. Блокам соответствуют локальные максимумы Δg в бассейнах рек Ича, Химка, Малая Химка, Облуковина и руч. Камчатский. Эти участки перспективны для поисков месторождений сульфидных медно-никелевых руд. Сделан геостатистический анализ материалов дешифрирования ДЗЗ Шанучского рудного поля. Установлены вероятные пути миграции глубинных магм и флюидов в верхние горизонты коры.

Ключевые слова: *плотность, модель, аномалия, интрузия, срединный массив, никель.*

M. D. SIDOROV, V. V. TASKIN (RGC FEB RAS),
N. A. VESHNYAKOV (JSC SIC "Geotechnology")

Density irregularities in upper crust of Shanuch ore district and the problem of detecting unopened nickel intrusion (Kamchatka median massif)

The main purpose of the paper is to discover the structures which are potentially prospective for nickel, their location and shape. The interpretation of gravity anomalies of Shanuch ore district was made. Three-dimensional density model of the upper crust up to the depth of 20 km was created. Solid blocks with nonerodible basic intrusions which are possible ore parent magmatic systems were allocated. Local maximums Δg in the basins of the Rivers Icha, Himka, Malaya Himka, Oblukovina and Kamchatsky Brook correspond to the blocks. These allotments are prospective for copper-nickel-sulphide ore deposits search. Geostatistical analysis of a remote sensed data interpretation of Shanuch ore field was made. Possible routes of migration for depth magmas and fluids to upper crust stages were determined.

Keywords: *density, model, anomaly, intrusion, median massif, nickel.*

Введение. Камчатский срединный массив (КСМ) расположен в южной части Срединного хребта Камчатского полуострова (рис. 1). Массив состоит из протерозойских метаморфических серий, слагающих ядро массива, и палеозой-мезозойских метатерригенных, метавулканогенных сланцевых отложений верхнего структурного яруса. Площадь массива около 15 тыс. км².

Единого мнения о структуре и происхождении массива не существует. Предполагается, что метаморфические образования слагают блок древнего гранитно-метаморфического слоя, бывшего когда-то частью Азиатского материка [2]. Другая точка зрения – структура массива сформирована за счет метаморфизма и гранитизации меловых геосинклинальных отложений [6, 7], а по более поздним представлениям, это метаморфизованные отложения аккреционной призмьы [13, 19]. Существует взгляд на срединный массив как на самостоятельный тип геоструктур, сложившихся в условиях деградации древней континентальной коры за счет разбавления и переработки кислых образований основным и ультраосновным материалом [18].

В срединном массиве выделяются крупные структуры гранито-гнейсовых куполов [5]: Шанучского в северной части, Хангарского в центральной, Лунтосского и Пымтинского в южной. Древние протерозойские ядерные части куполов сложены гнейсами, гнейсогранитами и мигматитизированными породами колпаковской метаморфической серии, сменяясь к периферии микрогнейсами, кристаллическими сланцами камчатской серии. В межкупольных промежутках распространены метаморфизованные в зеленосланцевой фации породы хейванской, химкинской свит мелового возраста и остатки эродированных терригенных отложений палеогенового возраста. Характерно также большое количество интрузий и субвулканических тел разного состава и возраста [9].

Со срединным массивом пространственно ассоциируют интрузии никеленосного магматического комплекса, что позволило считать его территорию никеленосной провинцией [12, 14]. Сульфидное медно-никелевое оруденение генетически связано с интрузиями формации роговообманковых базитов и сосредоточено главным образом в северной

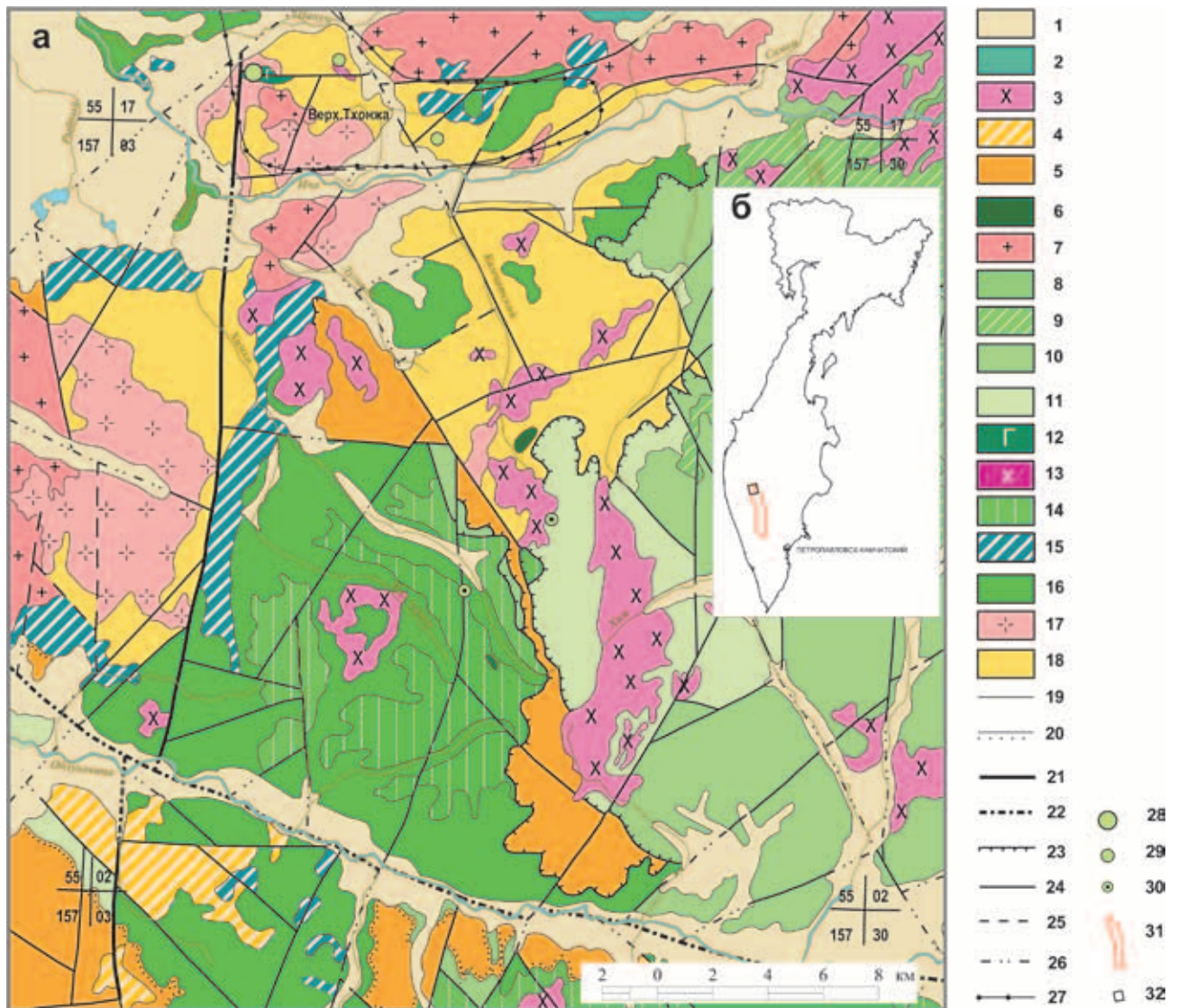


Рис. 1. Геологическая карта (а) и местоположение (б) Шанучского рудного района (по [4] с упрощениями и дополнениями авторов)

1, 2 – четвертичный период: 1 – аллювиальные, пролювиальные, озерно-болотные, ледниковые отложения, 2 – срединенский комплекс – потоки базальтов; 3 – неогеновый период, миоцен: лавкинский комплекс – интрузии гранодиоритов, диоритов, гранитов; 4, 5 – палеогеновый период, эоцен – палеоцен: 4 – черепановский комплекс – субвулканические тела андезитов, дацитов, 5 – амининская, снатольская, платоничская свиты, тектоно-гравитационные микститы – песчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты; 6 – меловой период – палеогеновый период: левоандриановский комплекс – интрузии габбро; 7–11 – меловой период, поздняя эпоха: 7 – кольский комплекс – интрузии гранитов, 8 – кирганинская свита – туфы базальтов, андезитов, трахибазальты, трахиандезиты, туффиты, 9 – силлы, штоки андезитов, трахибазальтов, 10 – ирунейская свита – кремнистые сланцы, туффиты, туфы, андезиты, базальты, 11 – хозгонская свита – аспидные сланцы, песчаники, алевролиты, аргиллиты; 12, 13 – меловой период, поздняя эпоха – палеогеновый период, эоцен: 12 – дукукский комплекс – мелкие штоки метагаббро, 13 – диоритов; 14–16 – меловой период, ранняя-поздняя эпоха: 14 – химкинская свита – кварц-альбит-актинолитовые сланцы, филлиты, 15 – алисторский комплекс пикрит-базальтовый – силлы и штоки метагаббро, метапикриты, 16 – хейванская свита – филлиты, метапесчаники, метаалевролиты, биотитовые, гранат-биотитовые кристаллосланцы; 17 – меловой период, ранняя эпоха: кругогоровский комплекс – гнейсограниты; 18 – протерозой поздний: камчатская метаморфическая серия – кристаллосланцы, микрогнейсы, амфиболиты; 19, 20 – геологические границы согласного (19), несогласного (20) залегания; 21–23 – разрывные нарушения главные: 21 – достоверные, 22 – главные, скрытые под вышележащими отложениями, 23 – надвиги; 24–26 – прочие разломы: 24 – достоверные, 25 – предполагаемые, 26 – скрытые под вышележащими отложениями; 27 – граница Шанучского рудного поля; 28 – медно-никелевое месторождение; 29 – проявления медно-никелевых руд; 30 – пункты минерализации никеля; 31 – контур срединного массива; 32 – участок исследований

и южной оконечностях массива – в Шанучском и Дукукском рудных районах. Промышленные перспективы связаны с регенерированными месторождениями, сформированными в процессе магматического и гидротермального переотложения рудных масс [8], выделившихся ранее в промежуточных магматических камерах и магматических проводниках. Рудные тела приурочены к небольшим

штокам, силлам, являющимся апофизами крупных интрузий в надинтрузивной и экзоконтактных частях. К этому типу относятся месторождение Шануч и несколько перспективных рудопроявлений. Представляется важным исследование верхнего слоя земной коры и выявление неоднородностей геологической среды, которые могут указывать на наличие рудогенерирующих магматических систем,

подобных Шанучской [16]. Плотность — одно из свойств геопространства, которое позволяет выявлять искомые объекты, а сведения о ее распределении содержатся в аномальном поле силы тяжести.

Шанучский рудный район. Расположен на северной окраине Камчатской никеленосной провинции. Площадь его около 1400 км². Наиболее древними образованиями являются породы камчатской метаморфической серии, распространенные в северо-западной части района (рис. 1). *Камчатская метаморфическая серия* разделена на две метаформации — микрогнейсов и высокоглиноземистых кристаллических сланцев. Граница между ними литологическая. Мощность микрогнейсов около 1600, кристаллических сланцев 1700 м. На современных геологических картах возраст протолита датируется поздним протерозоем, метаморфизм ранним мелом [4, 5].

Выше камчатской серии залегают ранне-поздне-меловые метаморфизованные терригенные породы *хейванской* и вулканогенные *химкинской* свит. Отложения свит слагают центральную часть района. Контакт между свитами согласный, с постепенным переходом. Мощность хейванской свиты 1800, химкинской около 600 м [4].

Восточная часть района сложена поздне-меловыми осадочными отложениями *хозгонской*, вулканогенно-осадочными *ирунейской* и *кирганинской* свит. Породы свит прорваны многочисленными субвулканическими телами и интрузиями, сильно дислоцированы [4]. С образованиями камчатской серии хейванская и химкинская свиты в междуречье Облуковина — Ича граничат по надвигам. Общая мощность свит может достигать 7000 м.

Палеогеновые образования распространены в центральной и юго-западной частях района. На водоразделе рек Облуковина — Хим — Химка — руч. Камчатский в узкой (0,5–2,5 км) северо-западной тектонической пластине мощностью до 800 м залегают грубообломочные тектоно-гравитационные микститы, а на левобережье Облуковины на меловых образованиях со стратиграфическим несогласием залегают осадки аманинской и снатольской свит суммарной мощностью не более 500 м. Меловые отложения в этой части района прорваны субвулканическими телами дацитов *черепановского* вулканического комплекса [4].

На северной окраине района выделяются фрагменты покровов базальтов *срединненского* вулканического комплекса четвертичного возраста мощностью до 200 м [4].

Рыхлые четвертичные отложения распространены в долинах рек, мощность не превышает первых десятков метров.

Значительная часть территории района занята интрузиями гранитоидного ряда: *крутогоровского* гнейсоплагиогранитового, *кольского* плагиогранит-гранодиоритового, *лавкинского* гранодиоритового плутонических комплексов. Базитовые интрузии менее распространены и представлены *дукукским* габбро-норит-кортландитовым, *левоандриановским* дунит-клинопироксенит-монзонитовым плутоническими комплексами, а также субвулканическими интрузиями *алисторского* пикрит-базальтового вулканического комплекса.

Раннемеловые интрузии *крутогоровского* комплекса обнажаются на западе района и в междуречье Шануч — Ича. Гнейсограниты образовались

в результате ультраметаморфизма и гранитизации протерозойского субстрата [4, 5]. Интрузии крутогоровского комплекса прорваны породами позднемелового *кольского* комплекса гранит-гранодиоритовой формации. Гранодиоритовые интрузии *лавкинского* комплекса прорывают все домиоценовые образования и распространены преимущественно в центре и на востоке района.

Из базитовых интрузивных образований наиболее ранними и распространенными в районе являются субвертикальные и субпластовые тела метапикритов, метапикродолеритов и метагаббро *алисторского* пикрит-базальтового вулканического комплекса. Интрузии располагаются в зонах повышенной проницаемости вдоль региональных глубинных разломов [4, 5].

Дукукский габбро-норит-кортландитовый плутонический комплекс никеленосный, несет сульфидную кобальт-медно-никелевую сингенетичную и эпигенетичную минерализацию. Интрузии комплекса распространены в южной и северной частях КСМ и представлены двумя типами массивов. Один тип — крупные пластинообразные и лополитообразные тела площадью до 20–30 км², мощностью более 1 км. Эти интрузии распространены на южном фланге срединного массива. Их особенностью является расслоенность и возрастание основности пород к подошве тела, чередование кортландитов, горнблендитов, меланократовых и лейкократовых габброноритов и габбро, наличие в эндоконтактных зонах ксенолитов вмещающих метаморфических и гибридных пород [5]. Другой тип интрузивных тел представлен небольшими штоками, дайками и пластовыми телами амфиболовых габбро, пироксенитов, перидотитов, горнблендитов, кортландитов, диоритов мощностью от нескольких до 200 м и протяженностью до 1200 м [5]. Малые интрузии являются апофизами крупных массивов [16].

Три интрузии этого типа обнажаются в междуречье Ича — Шануч. Эта часть территории выделяется как Шанучское рудное поле. Интрузия на северо-западном склоне горы Верхняя Тхонжа представляет собой блок из нескольких сближенных субвертикальных дайкоподобных тел общей мощностью около 300 м, вытянутых в субширотном направлении на 2 км. Отдельные тела сложены габбро, биотит-амфиболовыми диоритами, перидотитами, пироксенитами, горблендитами и кортландитами [16]. С этой интрузией связано месторождение Шануч, а с двумя другими рудопроявления Графитовое и Геофизическое. Под горным массивом Верхняя Тхонжа на глубине около 2 км предполагается промежуточная магматическая камера, апофизами которой являются интрузии рудного поля [16]. Многочисленные определения абсолютного возраста пород дукукского комплекса дают возраст в интервале от позднего мела до эоцена [4, 5, 17].

Интрузии *левоандриановского* дунит-клинопироксенит-монзонитового плутонического комплекса представляют собой зональные ультрамафитовые массивы с дунитовым ядром. Крупные массивы распространены в восточной и центральной частях срединного массива. В Шанучском районе обнажаются два небольших тела габбро в верхнем течении р. Химка и руч. Камчатский. Возраст комплекса по радиоизотопным данным определяется как поздний мел — палеоген [5].

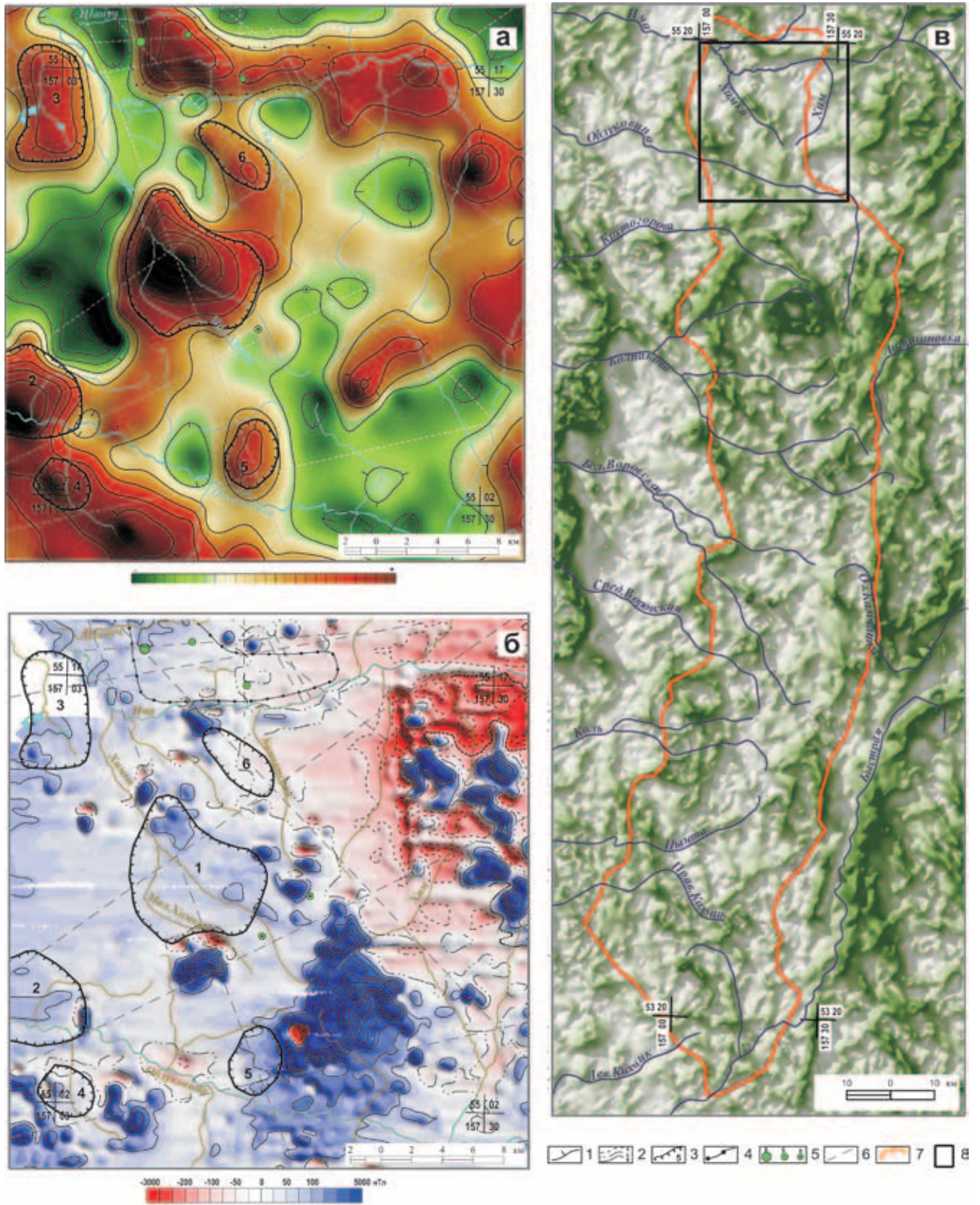


Рис. 2. Схемы морфологии локальной составляющей поля силы тяжести (а), аномального магнитного поля (б) Шанучского района и полного горизонтального градиента Δg Камчатского срединного массива (в)

1 – изоаномалы силы тяжести, бергштрихи направлены в сторону уменьшения поля; 2 – изоаномалы магнитного поля: отрицательные (а), нулевые (б), положительные (в); 3 – контуры перспективных аномалий силы тяжести, их номера; 4 – граница Шанучского рудного поля; 5 – месторождение (а), проявления (б) и пункты минерализации (в) никеля; 6 – интерпретационные профили; 7 – контур срединного массива; 8 – участок исследований. Величина градиента увеличивается от светло-серого к темно-зеленому цвету

Петрофизические группы пород Шанучского района

Номер группы	Характеристика пород
1	Немагнитные (α до $100 \cdot 10^{-5}$ СИ), относительно малоплотные ($2,57-2,65$ г/см ³) породы. Гнейсы, гранито-гнейсы, мигматиты колпаковской и камчатской метаморфических серий, граниты интрузий крутогоровского и кольского комплексов
2	Немагнитные (α до $100 \cdot 10^{-5}$ СИ), слабوماгнитные (сотни в 10^{-5} СИ) средней плотности ($2,66-2,80$ г/см ³) породы хейванской, хозгонской, химкинской свит, кристаллосланцы камчатской серии
3	Магнитные (α $1000-3000 \cdot 10^{-5}$ СИ), средней плотности ($2,66-2,80$ г/см ³). Породы кирганинской и ирунейской свит (кроме осадочных), интрузий лавкинского комплекса, кайнозойские эффузивы
4	Немагнитные (α до $100 \cdot 10^{-5}$ СИ), слабوماгнитные (α сотни в 10^{-5} СИ) плотные породы (свыше $2,85$ г/см ³). Породы дукукского интрузивного, метапикродолериты, метагаббро алисторского вулканического комплексов
5	Магнитные (α $1000-3000 \cdot 10^{-5}$ СИ) и сильномагнитные (α более $3000 \cdot 10^{-5}$ СИ) породы высокой плотности (свыше $2,85$ г/см ³). Породы левоандриановского дунит-клинопироксенит-габбрового комплекса

В районе медно-никелевая минерализация сосредоточена главным образом в Шанучском рудном поле. Характеристика рудного поля и месторождения приводится в работах [16, 17] и в настоящей статье не рассматривается.

За пределами Шанучского рудного поля известны три пункта никелевой минерализации. Два из них расположены в верховьях р. Химка. Здесь в метавулканогенных породах содержание никеля достигает 0,3 %. Повышенные содержания никеля установлены в геохимических ореолах на левобережье рек Малая Химка и Облуковина. Никель в ореолах ассоциируется с хромом и кобальтом, а его концентрация составляет 0,02–0,04, в отдельных пробах до 0,4% [4]. Наиболее изучено Шанучское рудное поле. В остальной части рудного района геологическими исследованиями интрузий никеленосного комплекса не выявлено, но существуют данные, косвенно свидетельствующие о наличии их в приповерхностном слое. Анализ материалов аэромагнитной и гравиметрической съемок (рис. 2) позволяет предполагать неэродированные базитовые массивы в междуречье Облуковина – Ича.

Этот вывод базируется на установленных для Камчатской никеленосной провинции геофизических критериях: крупным базитовым интрузиям никеленосного комплекса соответствуют локальные максимумы поля силы тяжести, над которыми отсутствуют четко выраженные аномалии магнитного поля и расположение этих максимумов в региональных зонах горизонтальных градиентов силы тяжести – участков повышенной проницаемости в земной коре [11, 12]. Всего на рассматриваемой территории по этим критериям выделяются шесть мест (не считая Шанучского рудного поля), где можно предположить крупные массивные магматические тела. Им соответствуют локальные аномалии Δg_b с амплитудами от 2 до 8 мГал (здесь и далее величина аномалий приводится в условном уровне) и плавное околонулевое магнитное поле (рис. 2). Аномалии расположены в региональных градиентных зонах, указывающих на деструкцию коры – глубинных магмоводов.

По плотности и магнитным свойствам породы разделяются на пять групп [12], характеристика которых приведена в таблице.

Методы исследований. Территория Шанучского района в разные годы охвачена гравиметрической

двухмиллигальной и аэромагнитными съемками масштабов 1 : 50 000 и 1 : 200 000. По материалам съемок (в рамках подготовки геофизической основы для Госгеолкарты-1000) создана электронная база данных, которая использовалась для количественной интерпретации геофизических аномалий.

С запада на восток, по долине р. Облуковина, район пересечен сейсмическими профилями ГСЗ и МОВЗ. На разрезах ГСЗ за пределами срединного массива выявлены сейсмические границы, которые по скоростным характеристикам соответствуют кровле верхнемеловых отложений, границам К и М, но на отрезке профиля через КСМ сейсмических данных не было получено [10]. Подобное наблюдается и на профиле МОВЗ. На флангах массива и за его пределами в разрезе трассируются цепочки из точек обмена, которые отождествляются с границами внутри коры, а в осевой части массива выявлена вертикальная зона отсутствия обменных волн шириной около 15 км. Отчасти это связано со сложным геологическим строением, а также с расположением профилей в зоне регионального разлома, проходящего по долине реки.

Основным источником информации о глубинном строении района явились результаты интерпретации аномалий силы тяжести методами плотностного моделирования и особых точек. Данные сейсморазведки были использованы для составления разрезов плотностных моделей на флангах участка.

Плотностное моделирование основано на решении прямой задачи гравиразведки – вычислении теоретических аномалий, создаваемых совокупностью предполагаемых на глубине геологических тел с заданными параметрами (размеры, форма, плотность). Земная кора представляется в виде слоисто-блоковой среды с устойчивыми контрастными границами в пределах моделируемой области.

Построение плотностной модели района выполнялось поэтапно. Вначале по априорным данным были составлены предварительные (исходные) модели глубинных геолого-геофизических разрезов. Вычислены теоретические аномалии и подобраны параметры разрезов до совпадения графиков теоретической и практической аномалий с погрешностью 3–5 %. Далее с плоскости каждого из подобранных разрезов считывалась информация о модельной плотности и формировалась единая база данных. На завершающем этапе была построена трехмерная матрица объемного изображения (voxel).

На интерпретационных профилях решалась двумерная (2D) прямая задача для слоистых сред. Были составлены геологические разрезы в самой верхней части коры. Для этого использовались геологическая карта, стратиграфическая колонка [4] и сведения о физических свойствах горных пород [12]. Исходные модели геологических разрезов аппроксимированы многоугольниками, которые представляют собой сечения бесконечных либо усеченных по простиранию призм (геологических блоков). Для маломощных в масштабе модели слоев применен принцип эквивалентности — объединение нескольких слоев в один с усредненной плотностью. Для интрузий и в блоках расчлененного рельефа призмы ограничены перпендикулярно к расчетному профилю (3/4D). Верхние части моделей, примерно 2–5 км, построены наиболее детально.

Для продолжения разрезов вглубь привлечены результаты решения обратной задачи аномального поля методом нахождения особых точек. Особенность и достоинство метода в том, что он не требует геологических знаний о возмущающих объектах, главенствующим является морфология интерпретируемых аномалий. Локализация особых точек осуществлена способом деконволюции Эйлера для ограниченной области гравитационного поля и его градиентов. В скользящем окне заданного размера определялась степень однородности функции Эйлера — структурный индекс, который соответствует некоторому типу источников аномалий. Структурный индекс может быть соотнесен с определенным классом геологических тел (толстые вертикальные и горизонтальные пласты, дайки, силлы, линзовидные и трубообразные тела). Интерпретация проведена в трехмерном варианте с помощью программы Euler 3D (Geosoft) при различных размерах палетки и структурных индексах. Результаты собраны в единую базу данных. Особые точки определены до глубины 15 км.

Более глубокая часть коры является фоновой и принята в обобщенном виде из нижнего ($\sigma = 2,9\text{--}3,0$ г/см³) и верхнего ($\sigma = 2,75\text{--}2,85$ г/см³) слоев. Границы К и М экстраполированы с профиля ГСЗ и для исследуемого района залегают на глубине 22–25 и 35–39 км [10].

Плотностное моделирование проведено по девяти разрезам (рис. 2). Расчетные точки на профилях располагались с интервалом 0,5–1 км таким образом, чтобы максимально подробно описать форму аномалий. Корректность подбора контролировалась взаимным пересечением разрезов. Теоретические аномалии вычислены программой GMSYS (Geosoft). В общую базу плотности также были включены два профиля, проходящие с внешней стороны вблизи северной и южной границ участка (на рис. 2 не показаны), а также два детальных разреза на восточном фланге Шанучского рудного поля, построенных по материалам профильных высокоточных гравиметрических наблюдений [17].

Для формирования базы данных плотности (БДП) на плоскость разрезов накладывалась сетка 200 × 200 м (для детальных разрезов 50 × 50), в узлах которой вычислялись координаты (x, y, z) и модельная плотность. Полученные таким образом данные сведены в единый файл, который служил основой для 3D-матрицы объемного изображения плотности. Элементарные объемные ячейки используются для изображения функций,

распределенных непрерывно в пространстве. Этим свойством обладает рассчитанная плотность геологической среды. Для создания БДП использован ArcGis, 3D-матрица вычислена и визуализирована в Oasis Montaj (Geosoft). Размер ячеек зависит от густоты исходных данных и изменялся от 2 × 2 × 2 до 0,8 × 0,8 × 0,8 км. Представление плотности в виде воксельной модели удобно для изучения структурных неоднородностей, позволяет строить и изображать изоплотностные поверхности, срезы на различных глубинах и вертикальные сечения.

Изучена деструкция верхнего слоя в междуречье Ича — Шануч до глубины 5 км по материалам дешифрирования аэрофото (АФС) и космических (КС) снимков с целью установления степени тектонической раздробленности.

В основе методики лежит эмпирически установленное правило о том, что трещиноватость одной грани кубика породы адекватно отражает степень трещиноватости всего образца [1, 9]. Проявление деформаций макроскопического уровня любого объема земной коры может быть рассмотрено как сумма деформаций многочисленных объемов, составляющих его, а упругие свойства породы в целом зависят от таких микропараметров, как ориентация зерен минералов, составляющих породу или развитие микротрещин [3, 20].

В общем случае коэффициент тектонической раздробленности блока определяется отношением объема его трещин к объему блока. Если «разбить» исследуемую часть земной коры на кубические блоки со стороной *a*, в которых одной из граней является дневная поверхность, то степень тектонической раздробленности каждого кубика будет равна $\Sigma l \cdot b \cdot h / a^3$, где *l* — длина, *b* — ширина раскрытия, *h* — глубина трещин. Ширина и глубина трещин не являются определяемыми по АФС и КС, но *b* может быть принята как усредненная величина для некоторой конкретной территории, а значение *h* приравнено к *a* [1, 9]. При этих условиях переменными для оценки уровня дизъюнктивности кубика по АФС и КС остаются общая длина трещин в пределах его верхней (совпадающей с дневной поверхностью) грани и длина ребра, а степень раздробленности — значение удельной длины линеаментов (УДЛ) $\Sigma l / a^2$. Для среды с однородными реологическими свойствами значение УДЛ относят к центру куба [1, 9].

Исходными данными для расчетов стали результаты дешифрирования АФС и КС способом масштабного приближения от регионального уровня к локальному. Дешифрирование выполнено Н. А. Вешняковым. Цифровая обработка данных проведена в ArcGIS. На карту линеamentной сети накладывалась регулярная сетка со стороной ячейки *a*, равной 100 м. Затем в каждой клетке производился подсчет суммарной длины линеаментов и ее нормирование на площадь. Полученное значение относится к центру ячейки на глубине *a*/2 от верхней грани. Так была получена матрица распределения УДЛ, характеризующая степень тектонической раздробленности на глубине 50 м, выраженная в км⁻¹. Далее в каждом последующем цикле расчетов сторона ячейки увеличивалась на 100 м. Была построена трехмерная модель раздробленности среды для глубин 50–5000 м. Модель содержит 100 слоев по вертикали с шагом 50 м. Воксельное представление модели позволило выделить изоперности для различных УДЛ, которые дают пред-

ставление о форме и нахождении участков с повышенной проницаемостью.

Результаты исследований. Модель распределения плотности Шанучского района представлена на рис. 3, *а*. Плотность изменяется от 2,3 до 3,0 г/см³ и более. Исследованная территория разделяется на две части. Северо-восточная часть более плотная. Типичная плотность коры 2,7–2,76 г/см³. Для остальной территории преобладают значения менее 2,7 г/см³. Граница проходит между руч. Камчатский и р. Хим (рис. 4, *в*) и соответствует восточному краю срединного массива.

Крупный, 20-километровый в поперечнике блок пониженной плотности (2,50–2,60 г/см³) расположен в западной части района, между реками Облуковина – Химка – Шануч. Относительно низкая плотность распространяется до глубины 10–12 км, образуя сферическую область. На участке среднего – верхнего течения р. Химка и под горным массивом горы Верхняя Тхонжа в низкоплотной среде выделяются массивные блоки с плотностью 2,8–3,0 г/см³. Размеры блоков до 3–4 км в поперечнике, расположены они в интервале от дневной поверхности до 6–7 км ниже уровня моря. Форма плотных блоков под горой Верхняя Тхонжа и к западу от нее сферическая, а в бассейне р. Химка удлиненная в вертикальной плоскости (рис. 3, *а*).

На тектонических схемах современных геологических карт в ареале низкоплотной области выделен Шанучский (Левоозерновский) гранито-гнейсовый купол [4, 5]. Купольная структура показана в междуречье Облуковины и Химки. В ядре структуры находится крупный массив гранито-гнейсов, обрамленный кристаллическими сланцами камчатской метаморфической серии с периклинальным залеганием плоскостных структурных элементов. Крайняя западная часть купола сложена гранитоидами кольского комплекса. В модели купольной структуре соответствует изометричный участок с плотностью около 2,6 г/см³. Средняя плотность гнейсов и гранитов 2,55–2,62 г/см³. Можно предполагать, что в основном низкоплотная область соответствует объему геологической среды, в котором преобладают метаморфические породы гранитоидного ряда. На глубине область распространения этих образований значительно шире, чем на поверхности, и располагается между р. Облуковина на юге, р. Шануч на севере и руч. Камчатский на востоке. Это хорошо видно на вертикальных сечениях плотностной модели (рис. 4). Наиболее низкие плотности (менее 2,6 г/см³) моделируются на глубине 5–8 км в нижнем течении р. Химка, образуя разуплотненное «ядро» (рис. 4, *а*, *б*, *з*). С гранито-гнейсами можно также связать низкую плотность на участке от горы Верхняя Тхонжа и к югу от нее до глубины 1,5–2 км (рис. 4, *а*, 5, *а*).

Массивные блоки, расположенные внутри разуплотненной области, могут содержать в себе интрузивные образования из пород основного и ультраосновного состава. В поле силы тяжести над этими блоками наблюдаются локальные максимумы (рис. 2, *а*). Интерпретация аномалий методом особых точек показывает сосредоточение массивных тел в интервале от 1,0 до 5,5 км ниже дневной поверхности. Еще одной важной особенностью является то, что в ареале максимумов отсутствуют интенсивные магнитные аномалии. Магнитное поле, по данным аэромагнитной крупномасштаб-

ной съемки, плавное, слабоинтенсивное. Все это в совокупности дает основание предположить, что в плотных блоках с высокой вероятности могут находиться базитовые интрузии никеленосного дукукского комплекса и (или) крупные субвулканические тела алисторского пикрит-базальтового вулканического комплекса, породы которых имеют высокую плотность и практически немагнитны (таблица).

Интерпретация аномалий силы тяжести на Шанучском рудном поле (7 и 8 на рис. 5) показала, что избыточную плотность 0,2–0,3 г/см³ по отношению к вмещающей среде имеют породы диорит-габбро-перидотитового ряда, слагающие магматическую камеру, являющуюся промежуточным очагом для малых интрузий с промышленным сульфидным медно-никелевым орудуением [16, 17]. В модели, под горой Верхняя Тхонжа, хорошо видно сферическое тело, расположенное ниже уровня моря до глубины 2,5 км (рис. 3, 4, *а*, 5, *а–в*). Плотность этого образования более 2,85 г/см³. В надинтрузивной зоне этого массивного тела расположены малые интрузии, с одной из них связано месторождение Шануч. Западнее от него, в 7–8 км и на глубине 4–6 км, в модели выделяется похожее по форме и размерам массивное тело. Ему на поверхности соответствует аномалия 3 (рис. 2, *а*). Возможно, что это такая же промежуточная магматическая камера, как и под горой Верхняя Тхонжа, но находящаяся в опущенном блоке. Центр тяжести интрузии определяется по особым точкам на глубине около 7 км.

Ближе к поверхности находятся плотные блоки в бассейнах рек Химка и Мал. Химка. Центры тяжести определяются на глубине 2–3 км ниже уровня моря. Форма блоков удлиненная в вертикальной плоскости. В ареале максимума 1, в верхнем течении р. Химка, выделяются два фрагмента – западный с плотностью 2,75 и восточный с плотностью более 2,80 г/см³. В промежутке между фрагментами плотность составляет 2,60–2,65 г/см³, что типично для гнейсо-гранитов. На дневной поверхности западному фрагменту соответствует субвулканическая интрузия алисторского комплекса, продолжение которой вглубь отражает этот фрагмент. Верхняя кромка восточного фрагмента находится на глубине 1,3 км. Плотность его больше западного и в центральной части достигает 3,0 г/см³. Здесь можно предположить интрузию базитов дукукского комплекса.

С массивными телами интрузий дукукского комплекса можно отождествить плотные блоки под максимумами 2, 4, 5 и 6. Наиболее приближен к поверхности блок максимума 2. Верхняя кромка залегает на 1,8 км ниже уровня моря. Для аномалий 4, 5, 6 глубина до кромок 3,4, 3,2 и 2,8 км.

С востока и запада срединный массив ограничен глубинными (сквозькоровыми) разломами и пересечен разломами северо-западной и субширотной ориентировки, выходящими далеко за его пределы. Краевые разломы отражены в поле силы тяжести интенсивными гравитационными ступенями [15], а секущие – характерными коррелируемыми искажениями изолиний наблюдаемого поля. Предполагается, что раздробленность коры в зонах разломов стала благоприятным условием для продвижения магматических расплавов из мантийных очагов в верхние горизонты коры, а наибольшая проницаемость возникла в узлах пересечения

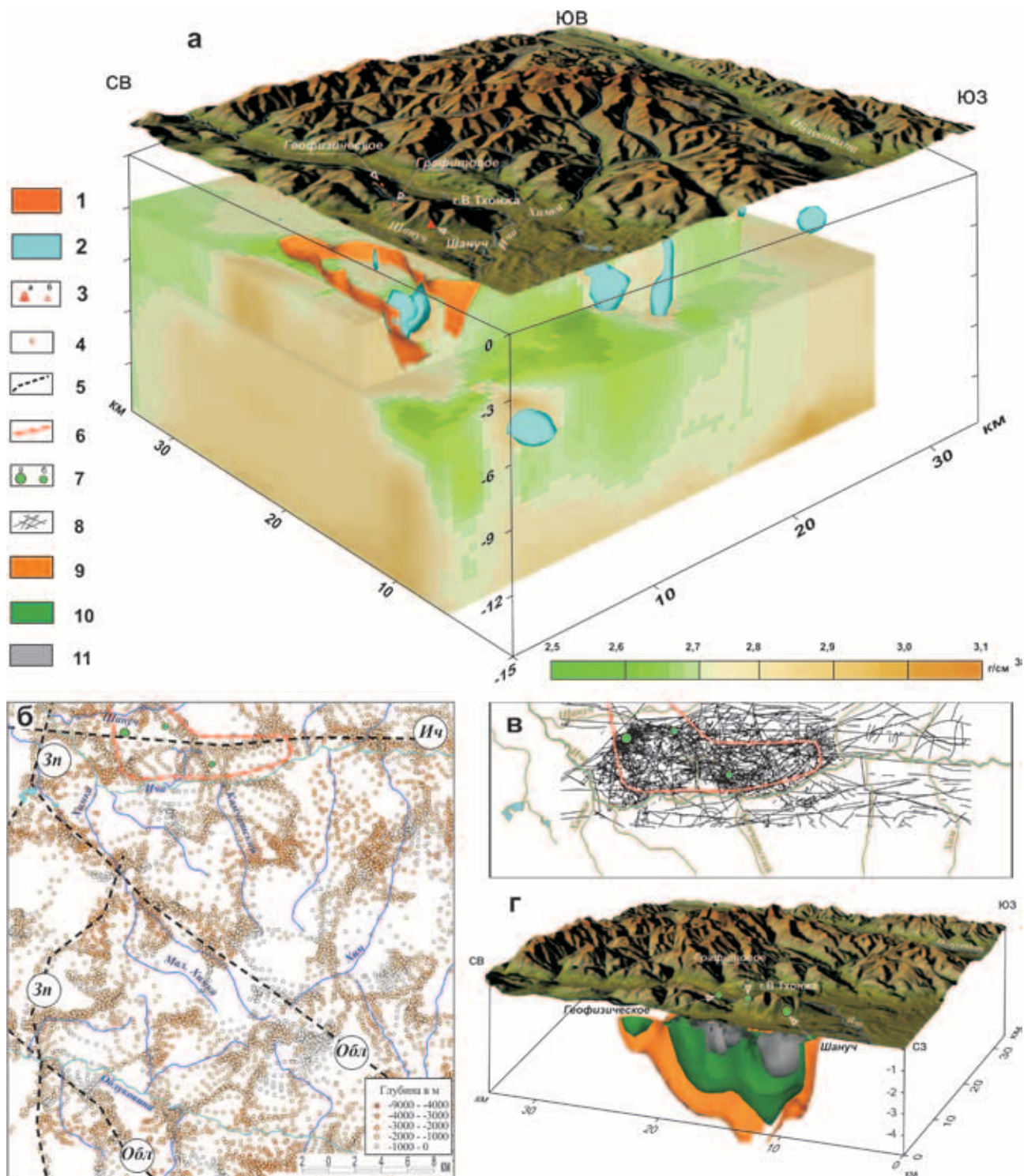


Рис. 3. Воксельная (объемная) плотностная модель верхней части земной коры Шанучского рудного района, вид с северо-запада (а), схема расположения особых точек (б), схема линейментов, выделенных по АФС и КС (в), блок-диаграмма изоповерхностей повышенной трещиноватости (г)

На фрагментах а и г масштаб рельефа увеличен в два раза и его поверхность поднята на 1 км. Часть ячеек на фрагменте а погашена (на фрагменте г полностью), чтобы показать изоповерхности

1 – изоповерхность с УДЛ $0,12 \text{ км}^{-1}$; 2 – изоповерхность с плотностью $2,86 \text{ г/см}^3$; 3 – месторождение и проявления сульфидных медно-никелевых руд (на фрагментах б–г); 4 – проекция особой точки на дневную поверхность, интенсивность закраски отражает ее глубину; 5 – оси региональных градиентных зон силы тяжести (Ич – Ичинская, Зп – Западная, Обл – Облуковинская); 6 – граница Шанучского рудного поля; 7 – месторождение (а), проявления (б) никеля; 8 – линейменты; 9–11 – изоповерхности УДЛ (на фрагменте г) $0,12$ (9), $0,15$ (10), $0,2 \text{ км}^{-1}$ (11)

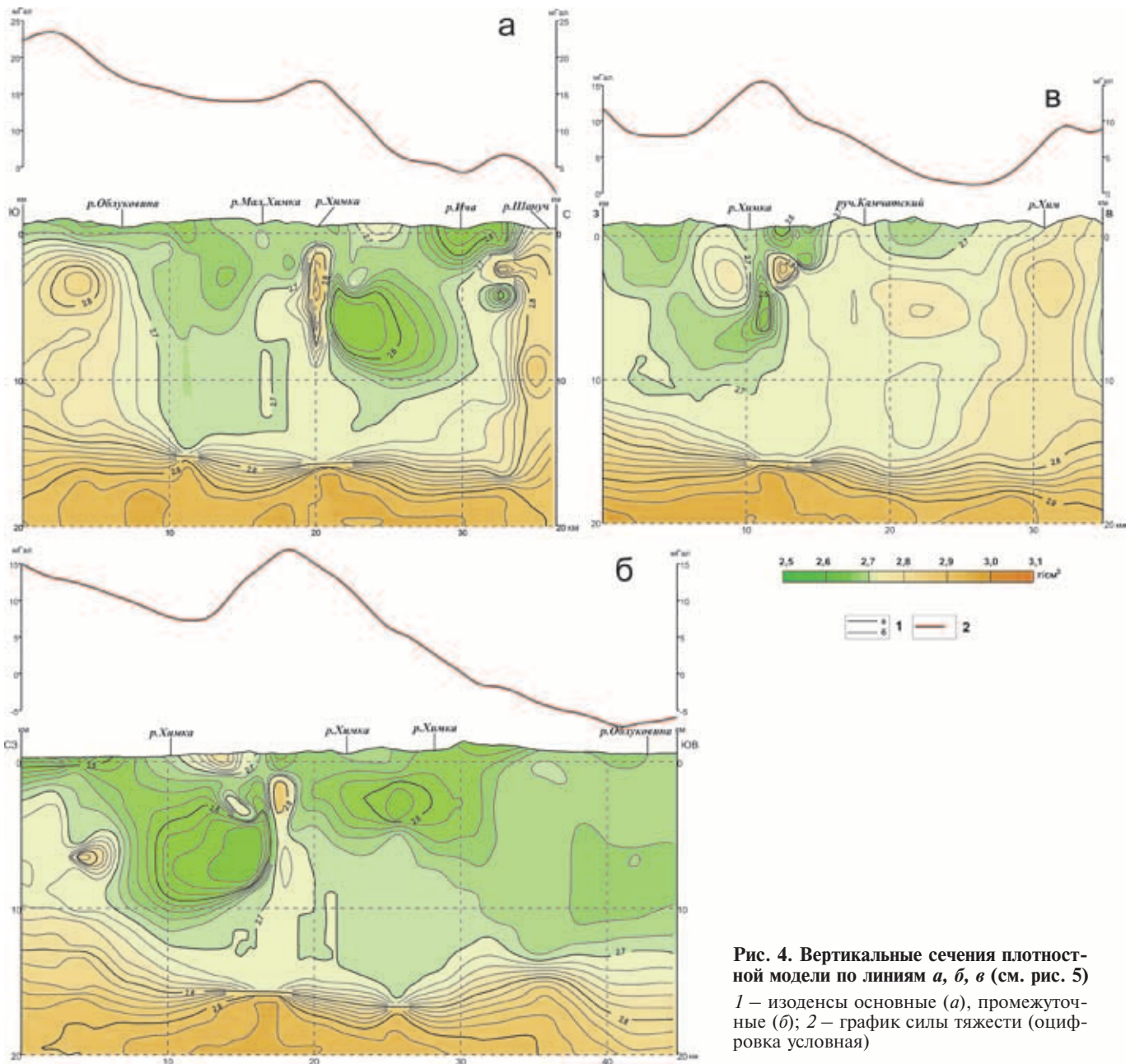


Рис. 4. Вертикальные сечения плотностной модели по линиям а, б, в (см. рис. 5)
 1 – изоденсы основные (а), промежуточные (б); 2 – график силы тяжести (оцифровка условная)

разломов. Внедрение магмы создало высокую неоднородность плотности в зонах разломов и, как следствие, сильную изменчивость горизонтальных градиентов поля силы тяжести, ширина таких зон от 5 до 20 км. Кроме аномального поля Δg , зоны разломов хорошо видны на аэро- и космоснимках.

Шанучский район частично охватывает следующие зоны: субмеридиональную, ограничивающую метаморфический массив с запада, субширотную, в междуречье Ича – Шануч, и секущую, северо-западную, в бассейне р. Облуковина (рис. 3, б). Облуковинская зона представлена двумя ветвями, которые «разрывают» западную (субмеридиональную) на два фрагмента. На пересечении зон расположены рудоносная магматическая система месторождения Шануч и одноименное рудное поле, восточная часть которого конформна Ичинской градиентной зоне.

На рис. 3, в и г представлены исходные данные и результат геостатистической обработки ДЗЗ по

описанной выше методике. Несмотря на многие допущения, примененная методика позволила установить основные черты деструкции блока рудного поля. Среднее значение УДЛ составляет $0,06 \text{ км}^{-1}$. Если его считать фоновым, тогда изоповерхности со значениями, превышающими среднее, показывают наиболее раздробленные участки и их форму. На рис. 3, г видно, что в слое до глубины 2–2,5 км «аномальная» трещиноватость наблюдается во всем блоке рудного поля, максимально увеличиваясь на двух участках, в которых расположены интрузии месторождения Шануч и рудопоявления Геофизическое. Далее вглубь, в интервале 3–5 км ниже уровня моря, изоповерхности $0,12$ и $0,15 \text{ км}^{-1}$ локализуются под горой Верхняя Тхонжа, очевидна тенденция на дальнейшее погружение зоны повышенной трещиноватости. Все это подтверждает сделанное ранее предположение о том, что канал, по которому поступала мантийная магма, расположен под горным массивом Верхняя Тхонжа в узле

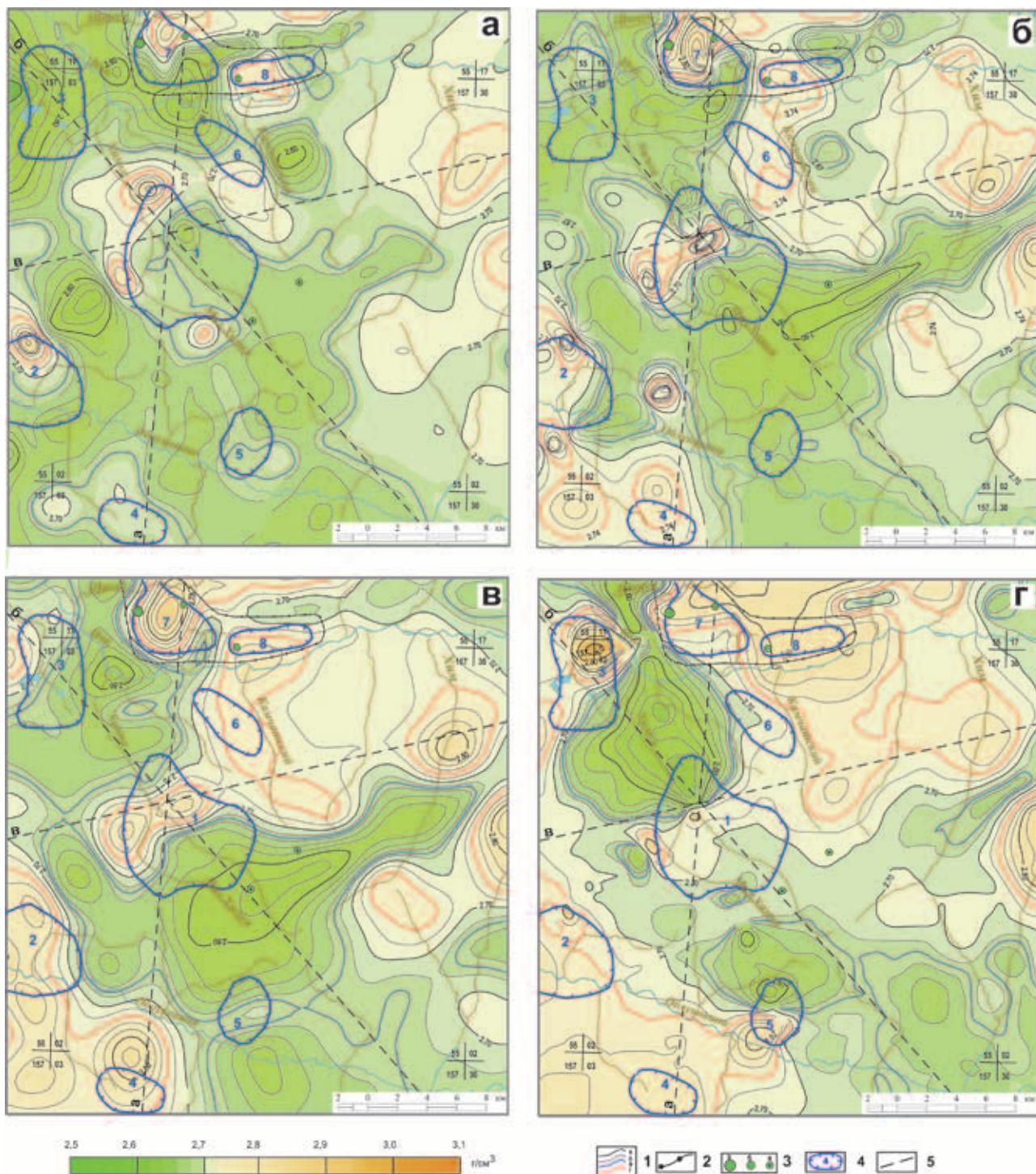


Рис. 5. Сечения плотностной модели на глубине (км): а – 0, б – 1,4, в – 2,5, г – 6,5

1 – изоденсы основные (а), промежуточные (б) с плотностью $2,67 \text{ г/см}^3$ (в), с плотностью $2,74 \text{ г/см}^3$, характерной для кристаллических сланцев (г); 2 – граница Шанучского рудного поля; 3 – месторождение (а), проявления (б) и пункты минерализации (в) никеля; 4 – контуры перспективных аномалий силы тяжести; 5 – линии вертикальных сечений плотностной модели

пересечения Ичинской и Западной градиентных зон [17].

Проведенный анализ деструкции не учитывает всего многообразия генезиса линеаментов, их разновозрастности. На снимках трудно отличить трещины тектонические от не тектонических, но статистический подход (в комплексе с геофизическими методами) закономерно позволяет выявить главное – положение в пространстве наиболее пронцаемых блоков и, как следствие, прогнозировать

вероятные пути движения магмы, постмагматических растворов, локализовать наиболее перспективные участки для поиска месторождений.

Заключение. Проведена интерпретация аномального поля силы тяжести в северной части камчатского срединного метаморфического массива, в бассейнах рек Облуковина и Ича. Построена трехмерная плотностная модель верхней части коры до глубины 15 км. Выявлены плотные блоки, содер-

жащие неэродированные никеленосные базитовые интрузии – вероятные рудогенерирующие магматические системы, подобные системе месторождения Шануч. Определены их форма и глубина залегания. Блокам соответствуют локальные максимумы аномалий силы тяжести в верхнем течении рек Химка и Мал. Химка, аномалии в бассейне р. Облуковина, а также максимум в нижнем течении руч. Камчатский. Эти территории следует считать перспективными для поисков медно-никелевых руд.

Сделан геостатистический анализ материалов дешифрирования дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для Шанучского рудного поля. Построена трехмерная модель раздробленности блока рудного поля до глубины 5 км. Выявлены участки с максимальной трещиноватостью. Опробованная методика позволяет прогнозировать наиболее вероятные пути миграции магм и флюидов. Канал, по которому поступала глубинная магма в верхние горизонты коры, расположен под горным массивом Верхняя Тхонжа в узле пересечения тектонических зон, ограничивающих с запада и севера срединный массив.

1. Богати́ков О.А., Не́чаев Ю.В., Собисевич А.Л. Использование космических технологий для мониторинга геологических структур вулкана Эльбрус // Докл. РАН. 2002. Т. 387. № 3. – С. 1–6.

2. Герман Л.Л. Древнейшие кристаллические комплексы Камчатки. – М.: Наука, 1978. – 129 с.

3. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 535 с.

4. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Хангарская. Лист N-57-VIII (г. Тупая). Объясн. записка / В.И. Сидоренко, М.Т. Селиванов, В.А. Лисович; ред. В.А. Шульдинер. – СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 2010. – 234 с. + 2 вкл.

5. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Лист N-57 Петропавловск-Камчатский. Объясн. записка / Б.И. Сляднев, В.Н. Шаповаленко, Н.Ф. Крикун, А.А. Полетаева, В.К. Ротман, В.И. Сидоренко, Е.Г. Сидоров, С.Н. Суриков, Ш.Г. Хасанов. – СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2007. – 206 с.

6. Лебедев М.М. Верхнемеловые кристаллические сланцы Камчатки // Сов. геология. 1967. № 4. – С. 57–69.

7. Лебедев М.М., Ястремский Ю.М., Гузиев И.С. О природе гранито-гнейсовых куполов Срединной Камчатской метаморфической зоны // Геология и геофизика Тихоокеанского пояса. Ново-Александровск. 1970. Вып. 25. – С. 34–49.

8. Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. – М.: Эслан, 2006. – 496 с.

9. Не́чаев Ю.В. Линеаменты и тектоническая раздробленность. Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – 215 с.

10. Потатьев С.В. Рекогносцировочные исследования ГСЗ на Западной Камчатке // Труды СахКНИИ. 1974. № 5. Вып. 37. – С. 49–61.

11. Сидоров М.Д. Геофизические критерии прогнозирования никеленосных интрузий в Камчатском срединном массиве // Чтения памяти академика К.В. Симакова: Тезисы докладов Всерос. конф., 25–27 ноября 2009 г. Магадан, 2009. – С. 92–93.

12. Сидоров М.Д., Степанов В.А. Геофизические поля и никеленосность Камчатского срединного массива // Вестник КРАУНЦ. Серия наук о Земле. Петропавловск-Камчатский, 2006. № 2. Вып. 8. – С. 140–150.

13. Соловьев А.В. Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит: методы тре-

кового датирования и структурного анализа. – М.: Наука, 2008. – 319 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 577).

14. Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д. Основные особенности Камчатской никеленосной провинции // Доклады VIII Междунар. конф. «Новые идеи в науках о Земле». – М., 2007. Т. 5. – С. 268–270.

15. Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д. Камчатская никеленосная провинция // Докл. РАН. 2008. Т. 418. № 6. – С. 802–805.

16. Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д., Кунгурова В.Е. Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы. 2009. № 5. – С. 75–81.

17. Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д., Кунгурова В.Е. Шанучское медно-никелевое рудное поле (Камчатка) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2011. № 1. – С. 20–26.

18. Ханчук А.И. Геология и происхождение Срединно-Камчатского кристаллического массива // Тихоокеанская геология. 1983. № 4. – С. 45–53.

19. Ханчук А.И. Эволюция древней сиалической коры в островодужных системах Восточной Азии. – Владивосток: ДВНЦ АН, 1985. – 138 с.

20. Fernandes da Silva P.C., Cripps J.C., Wise S.M. The use of Remote Sensing techniques and empirical tectonic models for inference of geological structures: Bridging from regional to local scales // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 96. – P. 18–36.

1. Bogatikov O.A., Nechaev U.V., Sobisevich A.L. Application of space technologies for the monitoring of geological structures of the Elbrus volcano. *Dokl. RAN*. 2002. Vol. 387. No 3, pp. 1–6. (In Russian).

2. German L.L. Drevneishie kristallicheskie komplekxy Kamchatki [The most ancient crystal complexes of Kamchatka]. Moscow: Nauka. 1978. 128 p.

3. Gzovskiy M.V. Osnovy tektonofiziki [Basic principles of tectonophysics]. Moscow: Nauka. 1975. 535 p.

4. Gosydarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1 : 200 000. Izdanie vtoroje. Seriya Hangarskaya. List N-57-VIII (g. Tupaya). Obyasnitelnaya zapiska [State geological map of Russian Federation of 1 : 200 000 scale. Second issue. Khangar series. Sheet N-57-VIII (Tupaya mount). Explanatory Note]. V.I. Sidorenko, M.T. Selivanov, V.A. Lisovich. Ed by V.A. Shuldiner. St-Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory. 2010. 234 p.

5. Gosydarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1 : 1 000 000. Izdanie tret'e. List N-57. Petropavlovsk-Kamchatsky. Obyasnitelnaya zapiska [State geological map of Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (third generation). Sheet N-57 Petropavlovsk-Kamchatsky. Explanatory Note]. B.I. Slyadnev, V.N. Shapovalenko, N.F. Krikun, A.A. Poletaeva, V.K. Rotman, V.I. Sidorenko, Ye.G. Sidorov, S.N. Surikov, Sh.G. Khasanov. St-Petersburg: Saint-Petersburg publishing house of VSEGEI Cartographic Factory. 2007. 206 p.

6. Lebedev M.M. Crystalline shists of Upper Cretaceous in Kamchatka. *Sov. geologiya*. 1967. No 4, pp. 57–69. (In Russian).

7. Lebedev M.M., Yastremskiy Yu.M., Gyziev I.S. About nature of granite-gneissic domes of Medium Kamchatka metamorphic zone. *Geology and geophysics of Pacific belt. Novo-Alexandrovsk*. 1970. Iss. 25, pp. 34–49. (In Russian).

8. Lihachev A.P. Platino-medno-nikelevye i platinovye mestorojdeniya [Platinum-copper-nickel and platinum deposits]. Moscow: Aslan. 2006. 496 p.

9. Nechaev U.V. Lineamenty i tektonicheskaya razdroblennost'. Distantionnoe izuchenie vnytrennego stroenya litosfery [Lineaments and Tectonic Fracturing: Remote Study of the Inner Structure]. Moscow: IPE RAS. 2010. 215 p.

10. Potap'ev S.V. Reconnaissance survey by a deep seismic sounding at the Western Kamchatka. *Works of Sahalin complex research Institute*. 1974. No 5. Iss. 37. Pp. 49–61. (In Russian).

11. Sidorov M.D. Geophysic criteria forecasting of nickeliferous intrusions in Kamchatka medium massif. *In memory of academician K.V. Simakov: Materials of All-Russian*

conference. 25–27 November 2009. Magadan. 2009. Pp. 92–93 (In Russian).

12. Sidorov M.D., Stepanov V.A. Geophysical fields and nickel content of Sredinny massif, Kamchatka. *Bulletin of Kamchatka regional association «Educational-Scientific centre» Earth sciences*. Petropavlovsk-Kamchatsky. 2006. No 2. Vol. 8. Pp. 140–150. (In Russian).

13. Solov'ev A.V. Izychenie tektonicheskikh processov v oblasti konvergentsii litosfernykh plit: metody trekovogo datirovaniya i stryktynnogo analiza [Investigation of the tectonic processes at the convergent settings of lithosphere plates: Fission-track dating and structural analysis]. Moscow: Nauka. 2008. 319 p. (Tr. GIN RAS; Vol. 577).

14. Trukhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D. Main features of Kamchatka nickeliferous province. *Proceedings of the VIII international conference «Modern ideas about Earth sciences»*. Moscow. 2007. Vol. 5. Pp. 268–270. (In Russian).

15. Trukhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D. The Kamchatka Nickel-Bearing Province. *Dokl. Russian Academy of Sciences*. 2008. Vol. 418. No 6, pp. 802–805. (In Russian).

16. Trukhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D., Kyngyrova V.E. Shanuch copper-nickel deposit: geological and geophysical model, composition and geochemistry of ores. *Rudy i metally*. 2009. No 5, pp. 75–81. (In Russian).

17. Trukhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D., Kyngyrova V.E. Shanuch Cu-Ni ore field (Kamchatka). *Bulletin of SVNC DVO RAN*. 2011. No 1, pp. 20–26. (In Russian).

18. Hanchyk A.I. Geology and origin of the Median Massif of Kamchatka. *Pacific Geology*. 1983. No 4, pp. 45–53. (In Russian).

19. Hanchyk A.I. Evolutsiya drevnei sialicheskoi kory v ostrovodnykh sistemah vostochnoi Azii [Evolution of ancient sialic crust in island-arc system of Eastern Asia]. Vladivostok. Scientific Centers and Institutes of the FEB RAS. 1985. 138 p.

20. Fernandes da Silva, P.C., Cripps, J.C., Wise, S.M. 2005: The use of Remote Sensing techniques and empirical tectonic models for inference of geological structures: Bridging from regional to local scales. *Remote Sensing of Environment*, vol. 96, 18–36.

Сидоров Михаил Дмитриевич – канд. геол.-минер. наук, зав. лабораторией, НИГТЦ ДВО РАН ¹. <smd52@mail.ru>

Таскин Виталий Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, НИГТЦ ДВО РАН ¹. <taskin-v@yandex.ru>

Вешняков Николай Александрович – ст. геолог, ЗАО НПК «Геотехнология». Ул. Вулканная, 48, Петропавловск-Камчатский, 683023, Россия. <gora.1946@mail.ru>

Sidorov Michail Dmitrievich – Candidate of Geological Mineralogical Sciences, Head of the Laboratory of Geoinformatics. RGC FEB RAS ¹. <smd52@mail.ru>

Taskin Vitaly Vital'evich – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Geoinformatics. RGC FEB RAS ¹. <taskin-v@yandex.ru>

Veshnyakov Nikolai Aleksandrovich – Senior Geologist. JSC SIC «Geotechnology». 48 Vylkannaya, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683023, Russia. <gora.1946@mail.ru>

¹ Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН. Северо-Восточное шоссе, 30, Петропавловск-Камчатский, 683002, Россия, а/я 56.

Scientific Research Geotechnological Centre, FEB RAS. 30, Severo-Vostochnoe Shosse, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002, Russia, P.O.B. 56.