

Плотностная контрастность, глубинное строение, реология и металлогения земной коры и верхней мантии Верхояно-Колымского региона

А. М. Петрищевский, Ю. П. Юшманов

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, 697016, г. Биробиджан,
ул. Шолом-Алейхема, 4, e-mail: petris2010@mail.ru

Поступила в редакцию 05.11.2020 г., принята к печати 27.01.2021 г.

Объект исследования. Верхояно-Колымский ареал рудной минерализации в Дальневосточном регионе России. **Материалы и методы.** Использованы Минерагеническая карта Российской Федерации и сопредельных территорий масштаба 1 : 2 500 000 (2000) и Государственная гравиметрическая карта России в редукции Буге масштаба 1 : 2 500 000 (2001). Основой модельных построений является метод изучения глубинного строения земной коры и верхней мантии по аномалиям плотностной контрастности геологических сред на отрезках между центрами плотностных неоднородностей и поверхностями эквивалентных сфер. **Результаты.** Проведен анализ 3D-распределения плотностной контрастности (μ_z -параметра) в земной коре и верхней мантии Верхояно-Колымского региона, связанной с реологическими состояниями геологических сред. В гравитационных моделях, конструируемых без привлечения внешней информации, проявлены структуры надвигания, расщепления, растяжения и структуры центрального типа плюмовой природы. В региональной зоне растяжения на границе литосферных сегментов выявлены и описаны в 3D-пространстве Индигиро-Колымская и Верхоянская структуры центрального типа (СЦТ), характеризующиеся выступами астеносферы грибообразной формы и сопровождающиеся аномалиями теплового потока. Структуры различаются по глубине залегания астеносферы, возрасту и рудной специализации. Размещение рудных узлов и районов в зонах влияния СЦТ подчиняется концентрической рудно-магматической зональности, типичной для этого типа структур. Установлено, что в центральной (стволовой) зоне Индигиро-Колымской СЦТ располагаются районы с преимущественно высокотемпературным золотокварцевым типом минерализации, а на периферии, кроме золоторудных, присутствуют олововольфрамовые, оловянные рудопроявления и районы с комплексной рудной минерализацией. Большинство золоторудных месторождений с низкотемпературной золотосульфидной минерализацией, примесью олова и полиметаллов тяготеют к флангам Индигиро-Колымской СЦТ. В Верхоянской СЦТ большая часть рудных районов характеризуется полиформационным оруденением. В центральной части структуры расположены районы с преимущественно низкотемпературной оловянной, ртутно-сурьмяной и золотосеребряной рудной минерализацией, а на флангах золоторудная минерализация отсутствует либо является второстепенной. **Выводы.** В результате внутренне однозначной процедуры, представляющей собой обобщение множественных элементарных решений обратной задачи гравитационного потенциала с единственным решением, определены главные черты глубинного строения Верхояно-Колымского региона. В региональной зоне растяжения на границе литосферных сегментов выявлены и описаны в 3D-пространстве Индигиро-Колымская и Верхоянская структуры центрального типа плюмовой природы, контролирующее размещение рудных месторождений.

Ключевые слова: гравитационные модели, земная кора, верхняя мантия, реология, зоны растяжения, плюмы, металлогения, Северо-Восточная Азия

Density contrast, deep structure, rheology and metallogeny of the crust and upper mantle of the Verkhoyano-Kolymsky region

Alex M. Petrishchevsky, Yurii P. Yushmanov

Institute of a complex analysis of regional problems FEB RAS, 4 Sholom-Aleikhem st., Birebidzhan 697016, Russia,
e-mail: petris2010@mail.ru

Received 05.11.2020, accepted 27.01.2021

Для цитирования: Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. (2021) Плотностная контрастность, глубинное строение, реология и металлогения земной коры и верхней мантии Верхояно-Колымского региона. *Литосфера*, 21(4), 491-516. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-4-491-516>

For citation: Petrishchevsky A.M., Yushmanov Yu.P. (2021) Density contrast, deep structure, rheology and metallogeny of the crust and upper mantle of the Verkhoyano-Kolymsky region. *Lithosphere (Russia)*, 21(4), 491-516. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-4-491-516>

Research subject. The Verkhoyano-Kolymsky areal of ore mineralization in the Far East of Russia. **Data and methods.** We used the state metallogenic map of Russia, Sc. 1: 2 500 000 (2000) and the gravity map of Russia Sc. 1: 2 500 000 (2001). Modeling was conducted by studying the deep structure of the earth's crust and upper mantle from the anomalies of the density contrast of geological media in the intervals between the centers of density inhomogeneities and the surfaces of equivalent spheres. **Results.** 3D-distributions of density contrast (μ_z -parameter) in the crust and upper mantle of the Verkhoyano-Kolymsky region related to the rheological properties of geological media were analyzed. In the gravity models designed without attraction of external information, the structures of thrust, splitting, stretching, as well as the structures of central type (CTS) of the plume nature, were identified. In the regional stretching zone, at the border of lithospheric segments, the revealed Indigiro-Kolymsky and Verkhoyansk CTSs were described in 3D space. These structures are characterized by a mushroom-like upwelling of the asthenosphere, associated with heat flow anomalies. The identified structures differ in terms of asthenosphere depth, age and ore mineralization. The location of ore clusters and regions in the zones of CTS obeys concentric ore-magmatic zoning, typical for this type of structures. The central (trunk-like) zone of Indigiro-Kolymsky CTS features mainly high-temperature gold-quartz mineralization. On the periphery, along with gold areas, there are tin-tungsten, tin and complex ore mineralization areas. The majority of gold fields with low-temperature gold-sulfide, tin and polymetallic mineralization are attributed to the flanks of Indigiro-Kolymsky CTS. In the Verkhoyansk CTS, the majority of ore regions are characterized by multi-formation ore mineralization. In the central part of this structure, areas with mainly low-temperature tin, mercury-antimony and gold-silver ore mineralization are located. On the flanks, gold mineralization is either absent or subsidiary. **Conclusions.** As a result of a simple procedure, implying generalization of multiple decisions of the elementary inverse problem of gravity potential, main features of the deep structure of the Verkhoyano-Kolymsky region were defined. In the regional stretch zone, at the boundary of lithospheric segments, the Indigiro-Kolymskaya and Verkhoyanskaya CTSs of the plume nature that control the location of ore deposits were identified and described in 3D space.

Keywords: gravity models, crust, upper mantle, rheology, stretching zones, plumes, metallogeny, North-East Asia

Acknowledgements

The authors are deeply grateful to Academician N.L. Dobretsov for a positive assessment of the article, editing and valuable comments that contributed to a clearer presentation of the results of the work, as well as to the referee for a careful reading of the manuscript.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Бассейны рек Яна, Индигирка и Колыма на Северо-Востоке России привлекают внимание исследователей высокой концентрацией рудных месторождений (рис. 1). Этот регион является одной из главных минерально-сырьевых баз Российской Федерации и одной из крупнейших золотосодержащих провинций мира (Горячев, 1998). За период его промышленного освоения здесь добыто около 6 тыс. т золота, в том числе 4 тыс. т – из россыпей. Однако из-за удаленности и труднодоступности изучение глубинного строения этого региона и связи рудных месторождений с глубинными структурами земной коры и верхней мантии развивается медленными темпами.

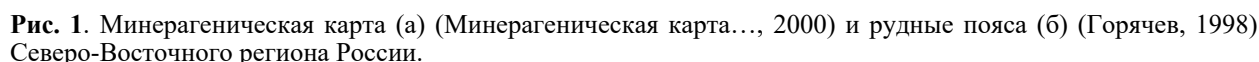
На рассматриваемой территории (см. рис. 1) существуют только три профиля ГСЗ (Кашубин и др., 2018), глубинность которых ограничена земной корой, а сеть магнитотеллурических зондирований неравномерна и содержит “белые пятна” размером от 350 до 500 км (Вашилов и др., 2003). В этих условиях основное внимание при изучении глубинного строения региона уделяется гравиметрическим данным.

Наибольший вклад в изучение глубинного строения Северо-Востока России по гравиметрическим данным внесли работы Ю.Я. Вашилова (1993, 1995; Вашилов и др., 2003), модели которого основаны на представлениях о блоково-слоистом строении земной коры и верхней мантии. В результате этих исследований для территории Северо-

Восточной Азии составлены схемы рельефа подошвы гранитно-метаморфического слоя, земной коры и литосферы, а также схемы-срезы латеральной плотностной неоднородности литосферы на глубинах 10, 20, 30, 40 и 60 км (Вашилов, 1993, 1995). Однако связи рудных месторождений с моделями Ю.Я. Вашилова детально не изучены.

Другой, традиционный, подход к интерпретации гравитационных аномалий реализовали Г.А. Стогний и В.В. Стогний (2000, 2009, 2011), исследования которых основывались на связи трансформант аномального гравитационного поля с глубинными плотностными неоднородностями и тектоническими структурами. Изучалась также связь проекций плотностных неоднородностей на поверхность геоида с размещением приповерхностных рудных месторождений (Стогний, 2011).

По совокупности имеющихся данных (Горячев, 1998; Г.А. Стогний, В.В. Стогний, 2011; Хасанов, Шарафутдинов, 2011; Аристов, 2019), размещение рудных месторождений в Верхояно-Колымском регионе контролируется приуроченностью рудных месторождений к очаговым структурам разного ранга, гранитоидным поясам и зонам глубинных разломов. По данным магнитотеллурического зондирования разломы сопровождаются зонами повышенных градиентов аномалий Буге и высокой проводимости. Размещение месторождений связывается также с существованием метаморфических поясов с черносланцевыми толщами и гранитоидными куполами (Горячев, 1998; Г.А. Стогний, В.В. Стогний, 2004), распространенных пре-



Наименование рудных узлов и районов: ББ – Береляхский, ВГ – Верхнеортуканско-Гербенский, ВИ – Верхне-Индибирский, ВВ – Восточно-Верхоянский, Д – Депутатский, Дж – Джуптанганский, Ды – Дыбинский, ДО – Дьянди-Олонойский, ЗВ – Западно-Верхоянский, Ка – Карамкенский, Ку – Куларский, Ом – Омчакский, Ос – Омсукчанский, С – Сергеевский, СЯ – Северо-Янский (Полосуный), Т – Теньковский, Тк – Таскыстабытский, Хк – Хаканджинский, Хл – Холдинский, ЦЯ – Центрально-Янский, ШС – Шамано-Столбовской, Э – Эвенский, ЭА – Эльги-Адычанский, ЮВ – Южно-Верхоянский (Аллах-Юньский), ЮЯ – Южно-Янский.

1-11 – deposits and ore displays with predominant mineralization: 1 – gold-quartz (a – unicum, б – large, в – middle, г – ore displays and its numbers), 2 – gold-sulfide, 3 – gold-silver epithermal, 4 – tin, 5 – tin-silver, 6 – molybdate, 7 – cuprum, 8 – tungsten, 9 –

stibium, 10 – mercury, 11 – polymetallic, 12 – counter of the Verkhoyansk astenospheric lens (G.A. Stognii, V.V. Stognii, 2009). Deposits: 1 – Natalka, 2 – Nezhdaninskoe, 3 – Kyuchus, 4 – Dukat, 5 – Degdekan, 6 – Igumenovskoe, 7 – Shkol'noe, 8 – Vetreenskoe, 9 – Shturmovskoe, 10 – Utinoe, 11 – Svetloe, 12 – Cheban'ya, 13 – Maltan, 14 – Sarilakh, 15 – Badran, 16 – Sentachan, 17 – Zolotaya Gorka, 18 – Khakandzhinskoe, 19 – Karamken, 20 – Kodixhak, 21 – Bogatir, 22 – Deputatskoe, 23 – Ege-Khaya, 24 – Mangazeiskoe, 25 – Verkhne-Menkechenskoe, 26 – Dibinskoe, 27 – Ekmir-Ganskii, 28 – Yur, 29 – Duet, 30 – D'yandi, 31 – Burgagan. Accompanying elements into deposits are written by letters.

Signations of ore regions and knots: Be – Berelyakhskii, BG – Verkhneortukansko-Gerbinskii, BI – Verkhne-Indigirskii, BB – Vostochno-Verkhoyanskii, D – Deputatskii, DJ – Dzhuhtanganskii, DY – Dybinskii, DO – D'yandi-Olonoiiskii, ZB – Zapadno-Verkhoyanskii, Ka – Karamenskii, Ky – Kularskii, OM – Omchakskii, OC – Omsukchanskii, C – Sergeevskii, CY – Severo-Yanskii (Polousnii), T – Ten'kovskii, TK – Taskistabytskii, XK – Khakandzhinskii, XL – Kholdinskii, CY – Tsentral'no-Yanskii, SHC – Shamano-Stolbovskii, E – Evenskii, EA – El'gi-Adychanskii, YOB – Yuzhno-Verkhoyanskii (Allakh-Yun'skii), YUY – Yuzhno-Yanskii.

имущественно в западной части рассматриваемой территории. Главной рудоконтролирующей структурой является Верхоянская астенотлинза – “палеоплюм” (Г.А. Стогний, В.В. Стогний, 2009; Стогний, 2011), выраженная широким гравитационным минимумом, в область которого проектируется 90% месторождений Верхояно-Колымского региона (см. рис. 1).

Модель синаккреционной и постаппаккреционной металлогении и магматизма предложена В.И. Шпикерманом и Н.А. Горячевым (1996). В.И. Алексеевым (2016) выделены четыре этапа эволюции тектоносферы Дальнего Востока России: юрско-раннемеловой коллизионный, раннемеловой надсубдукционный, поздне-меловой надсубдукционно-трансформный и поздне-меловой – палеогеновый рифтогенный. По Н.П. Митрофанову (2005), месторождения олова здесь связаны с раннемеловой коллизией и мел-палеогеновой окраинно-континентальной субдукцией. Участие мантийных флюидов в рудоносных системах, формирующих месторождения золота Северо-Востока России, отмечают А.Э. Изох с соавторами (2011) и Н.А. Горячев (2014).

Н.П. Митрофановым (2005, 2018) на основе анализа геодинамики и металлогении в Северо-Восточном секторе Тихоокеанского рудного пояса выявлены общие закономерности размещения месторождений Sn, W, Mo в разных геодинамических обстановках. Он предлагает сосредоточить внимание на изучении прерудного, рудного и пострудного этапов формирования месторождений. Каждому этапу соответствуют свои геодинамические обстановки: экзо-эндогенные базовые для источников рудного вещества, рудогенерирующие эндогенные и эндо-экзогенные формирующие россыпные месторождения. Золоторудный потенциал Верхояно-Колымского региона связывается с коллизионным этапом эволюции тектоносферы, в течение которого происходило проявление высокотемпературной золотокварцевой минерализации (Горячев, 1998). В настоящее время большинство исследователей (Сидоров, Волков, 2015; Проккопьев и др., 2018) продолжает связывать образование и размещение рудных месторождений с этапами тектонической эволюции региона: коллизионным, аккреционно-коллизионным и аккрецион-

ным, при этом возраст оруденения укладывается в интервал 95–145 млн лет.

Рассмотренные данные характеризуют сложность происхождения и эволюции рудно-магматических систем Верхояно-Колымского региона и связи их пространственного размещения с глубинными геологическими структурами и процессами, на что неоднократно обращали внимание многие исследователи (Хомич и др., 2008; Некрасов, 2017; Аристов, 2019).

Проблемы, осложняющие металлогенические исследования в рассматриваемом регионе, обусловлены: 1) мультитадийностью рудообразования; 2) совмещенностью в пространстве рудных ассоциаций разного генезиса и специализации; 3) конвергентностью (сходством) вещественного состава руд разного происхождения (связи с разломами, гранитами, региональным метаморфизмом, тектономагматическими структурами центрального типа); 4) трудностями отделения рудных фаз от до- и пострудных тектономагматических процессов; 5) горизонтальными перемещениями приповерхностных комплексов и руд от мест их первичного образования.

Сложность геологического строения, происхождения и эволюции тектонических комплексов, полиформационность и полистадийность рудообразования, неопределенность глубинных границ тектонических структур в сочетании с труднодоступностью Северо-Восточного региона для целенаправленных и широкомасштабных полевых исследований вынуждают искать новые источники информации о геологическом строении этого региона. Такой источник мы находим в гравиметрических наблюдениях, сеть которых несоизмеримо более представительна (кондиционна) по сравнению с редкими сейсмическими (ГСЗ) и магнитотеллурическими (МТЗ) данными. Однако реализуемый нами подход к интерпретации гравитационных аномалий отличается от традиционного тем, что гравитационные модели не используют априорно предшествующие данные о других геофизических аномалиях, строении тектонических структур и плотности горных пород, а представляют собой независимые от внешней информации распределения глубинных плотностных неоднородностей, получаемые на основе

обратных задач с единственным (в математическом смысле) решением и их последующей статистической обработкой. Эти распределения сопоставляются с известными геолого-геофизическими данными уже после составления моделей. Идеологической основой моделирования являются представления не о блоково-слоистой (более привычной), а о микститовой среде.

Целью статьи является исследование связи пространственного размещения месторождений разной рудной специализации с реологическими неоднородностями в земной коре и верхней мантии, параметризуемыми послойными распределениями плотностной контрастности геологических сред (Петрищевский, 2013а, 2020а). Эти распределения характеризуются большей детальностью по сравнению с моделями предшественников (Вашилов, 1993, 1995; Г.А. Стогний, В.В. Стогний, 2009, 2011), что позволяет выявить связи приповерхностных месторождений с глубинными плотностными неоднородностями в разных диапазонах геологического пространства.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Район исследований охватывает широкую область концентрированной рудной минерализации – минерагеническую провинцию (см. рис. 1) на конвергентной границе Евразийской и Северо-Американской плит (рис. 2в). Структурами второго порядка (после литосферных плит) здесь являются Северо-Азиатский кратон, Верхояно-Колымская складчато-надвиговая система, Колымо-Омолонский супертеррейн (КОТ) и Охотско-Чукотский вулканический пояс (ОЧВП) (рис. 2б). Колымо-Омолонский супертеррейн иногда называют микроконтинентом (Оксман, 1998; Прокопьев и др., 2018), и он удовлетворяет признакам литосферной плиты второго порядка (Ханчук, Петрищевский, 2007). Восточная окраина Северо-Азиатского кратона перекрыта мезозойскими плитными комплексами, а юго-восточная – палеозойскими. Верхояно-Колымская складчато-надвиговая система ограничивается региональными надвигами и на юго-востоке разветвляется на Верхоянскую и Южно-Верхоянскую ветви.

Надвиги сконцентрировались преимущественно на восточной границе Северо-Азиатского кратона и западной границе Колымо-Омолонского супертеррейна, а сдвиги, как показано далее, – в широкой Верхоянской зоне растяжения СВ–ЮЗ простираения (см. рис. 2а). К зоне растяжения приурочен Главный гранитный пояс Верхояно-Колымского региона. Между надвигами и сдвигами наблюдается структурное несогласие, обусловленное расхождением Верхояно-Колымской складчато-надвиговой системы на две ветви (Западно-Верхоянскую и Южно-Верхоянскую) (Тектоника..., 2001) и ино-

гда разворотом (вращением) фрагментов Колымо-Омолонского супертеррейна (Бондаренко, Диденко, 1997) по внутрикоровым структурным несогласиям.

К юго-западной границе КОТ приурочен Главный гранитоидный пояс, с которым связываются многие крупные (Школьное, Наталка, Павлик, Мальдяк, Бутугычаг и др.) месторождения этого региона. Предполагается (Сидоров, Волков, 2015), что зона гранитообразования в верхоянском терригенном комплексе увеличивалась по мощности со временем, достигая 15 км в позднем мезозое, и это связывается с рифтогенезом.

В.С. Оксман (1998) предполагает развитие трех этапов позднемезозойских дислокаций на юго-западной границе КОТ, связанных с его перемещениями: на раннем этапе на этой границе образовывались покровно-складчатые дислокации, на втором этапе развивались надвиги, а на третьем – формировались разломы с преимущественно левосдвиговой кинематикой.

Сложное строение земной коры Верхояно-Колымского региона сопровождается не менее сложными его металлогеническими характеристиками. В терминах террейнового анализа месторождения и рудопроявления рассматриваемого региона подразделяются на три группы (Шпикерман, Горячев, 1996): 1) доаккреционные месторождения стратиформных полиметаллических и медных руд, относящихся к трем формационным типам: медистых базальтов, медистых песчаников и сланцев и свинцово-цинковых месторождений в карбонатных породах; 2) аккреционные месторождения Au, W, Mo, сформированные в период аккреции к Верхоянской пассивной окраине Охотского микроконтинента; 3) постааккреционные серебро-полиметаллические, оловянные и редкометалльные месторождения, связанные с формированием ОЧВП. По другим представлениям (Прокопьев и др., 2018), оруденение связывается с коллизионными и аккреционно-коллизионными процессами на конвергентных границах литосферных сегментов разного порядка.

Мезозойды Верхояно-Колымской складчатой области являются обширной металлогенической провинцией с профилирующим золотым оруденением, преимущественно относящимся к золото-кварцевому жильному типу (Горячев, 1998). Здесь выделяются три металлогенических пояса: Яно-Колымский, Верхоянский, Южно-Верхоянский (Сетте-Дабанский, Аллах-Юньский) и Куларский ареал золото-кварцевых жил (см. рис. 1б). С юго-востока к мезозоидам примыкает золотосеребряный Охотско-Чукотский вулканический пояс (Сидоров и др., 2009).

Яно-Колымский металлогенический пояс (см. рис. 1б) золото-кварцевого, оловянно-вольфрамового жильного и грейзенового, золотосеребро-

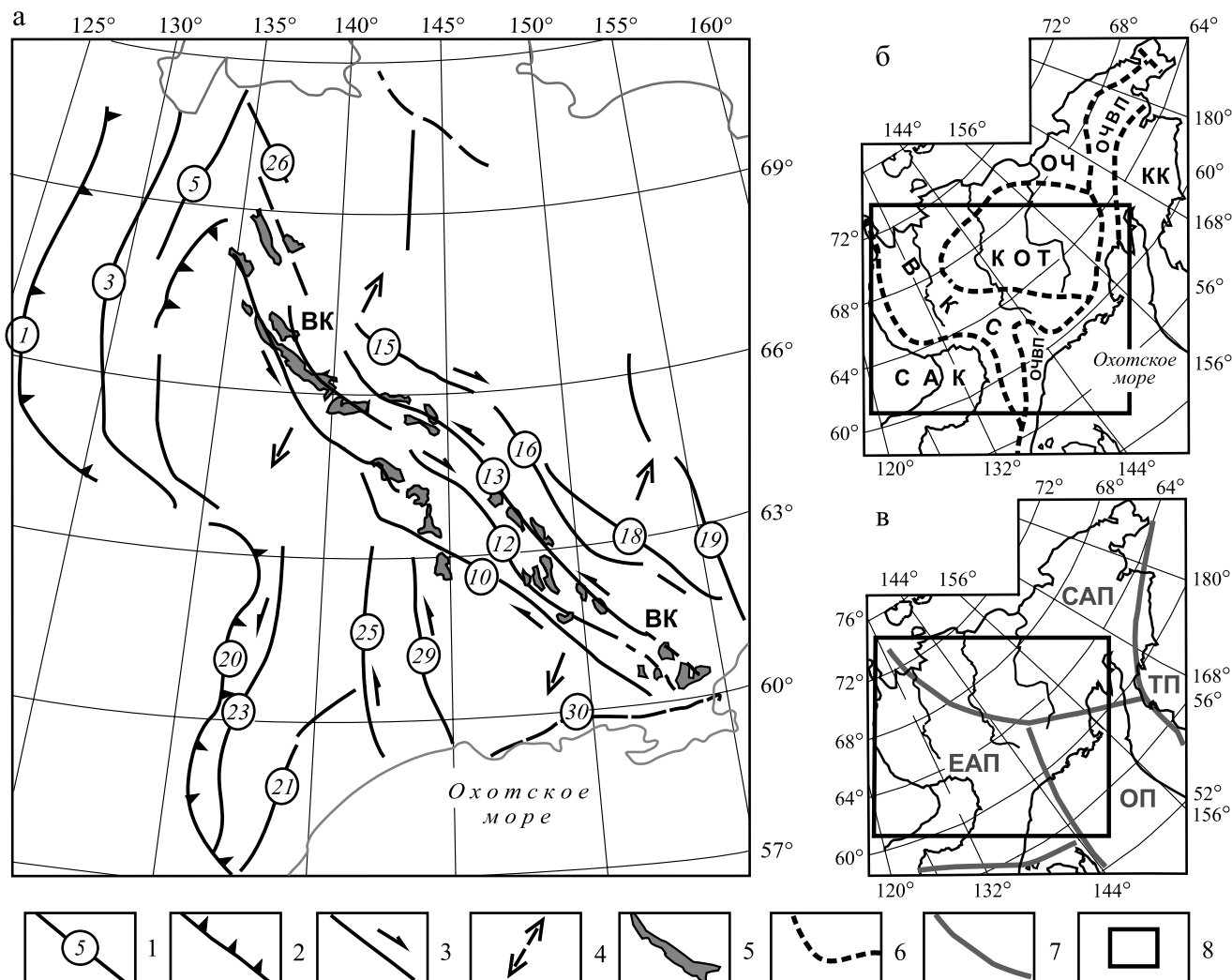


Рис. 2. Схема разломов Верхояно-Колымской складчато-надвиговой системы (а), по Г.С. Гусеву (1979) с корректировкой по (Шахтыров, 1997; Тектоника..., 2001; Geological map..., 2012), структуры (б) и плиты (в) Северо-Восточной Азии.

1–3 – разломы, в том числе надвиги (2) и сдвиги (3); 4 – Верхояно-Колымская зона растяжения-сдвига (БК); 5 – гранитоиды Главного пояса; 6, 7 – границы тектонических структур (6) и литосферных плит (7); 8 – район исследований. а – разломы (цифры в кружках): 1 – Западно-Верхоянский, 3 – Восточно-Орульганский, 5 – Омолойский, 10 – Адыча-Тенькинский, 12 – Чай-Юреинский, 13 – Иньяли-Дебинский, 15 – Иньяли-Тасский, 16 – Дاپир, 18 – Улахан, 19 – Омсукчанский, 20 – Нелькано-Кыллахский краевой шов, 21 – Билякчанский, 23 – Восточно-Сеттедабанский, 25 – Кетандинский, 26 – Казачинский, 29 – Нют-Ульбейский, 30 – Челомджа-Ямский.

б – обозначения структур: САК – Северо-Азиатский кратон, КОТ – Колымо-Омолонский супертеррейн; складчато-надвиговые системы: ВКС – Верхояно-Колымская, ОЧ – Олойско-Чукотская, КК – Корякско-Камчатская, ОЧВП – Охотско-Чукотский вулканический пояс.

в – плиты на схеме: ЕАП – Евразийская, САП – Северо-Американская, ТП – Тихоокеанская, ОП – Охотоморская.

Fig. 2. The fracture scheme of the Verkhoyano-Kolima fold-thrust system (a) by G.S. Gusev (1979) with the correction by (Shakhtyrov, 1997; Tectonics..., 2001; Geological map..., 2012), structures (б) and plates (в) of the North East Asia.

1–3 – fractures, including thrusts (2) and strike-slip faults (3); 4 – Verkhoyano-Kolyma shear-stretch zone (BK); 5 – granitoid of the Main Belt; 6, 7 – boundaries of tectonic structures (6) and lithospheric plates (7); 8 – area of the study. а – Faults (figures in circles): 1 – Zapadno-Verkhoyanskii, 3 – Vostochno-Orul'ganskii, 5 – Omoloiskii, 10 – Adycha-Ten'kinskii, 12 – Chai-Yureinskii, 13 – In'yali-Debinskii, 15 – In'yali-Tasskii, 16 – Dapir, 18 – Ulakhan, 19 – Omsukchanskii, 20 – Nel'kano-Kyllakhskii, 21 – Bilyakchanskii, 23 – Vostochno-Settedabanskii, 25 – Ketandinskii, 26 – Kazachinskii, 29 – Nyut-UI'beiskii, 30 – Chelomdza-Yamskii.

б – signations of structures: САК – North Asian Craton; КОТ – Kolyma-Omolon super terraine; fold-thrust systems: ВКС – Verkhoyano-Kolyma, ОЧ – Oloisko-Chukotskaya, КК – Koryaksko-Kamchatskaya, ОЧВП – Okhotsko-Chukotskii volcanic belt.

в – the plates on the scheme: ЕАП – Eurassian, САП – North-American, ТП – Pacific, ОП – Sea of Okhotsk. BK – Verkhoyano-Kolyma shear-stretch zone.

кварцевого оруденения, связанного с гранитоидами, и ртутно-сурьмяного оруденения в осадочных породах (Горячев, 1998) размещается в верхне-палеозойских-среднемезозойских породах Куларо-Нерского террейна и деформированной Верхоянской пассивной окраины. Вмещающие пояса толщ характеризуются широким развитием рудно-магматических сдвиговых дуплексов, контролирующих пояса гранитных интрузий (Шахтыров, 1997, 2009; Юшманов, 2019). Эти структуры формировались во время коллизии континентальных блоков в поздней юре–раннем мелу. Профилирующие рудные районы в Яно-Колымском поясе – Эльги-Адычанский, Верхне-Инди́гирский, Берелехский и Тас-Кыстабытский (см. рис. 1). Общей для них является связь с гранитоидными интрузивами, контролируемые зонами растяжения и надвигами (Архипов и др., 1981; Бахаров и др., 1997). Золото-кварцевому жильному оруденению сопутствуют редкометалльная (Берелехский район), сурьмяная (Верхне-Инди́гирский), вольфрам-оловянная (Эльги-Адычанский) и оловосеребряная (Тас-Кыстабытский) минерализации.

Типичными рудными районами *Верхоянского пояса* являются Восточно-Верхоянский, Западно-Верхоянский и Дыбинский (см. рис. 1а). Эти районы располагаются в терригенных толщах континентальной окраины Северо-Азиатского кратона. В Восточно-Верхоянском районе размещение постагрегационного оруденения контролируется линейным ртутно-сурьмяно-золоторудным поясом, расположенным в восточном крыле меридионального разлома (см. рис. 1б). Представителями этих типов оруденения являются месторождения Звездочка, Загадочное и многочисленные рудопроявления.

Западно-Верхоянский олово-серебро-полиметаллический район располагается в контурах Эчигейского гранитоидного купола (Г.А. Стогний, В.В. Стогний, 2004), пересеченного меридиональными и северо-восточными разломами.

Южно-Верхоянский (Аллах-Юньский) металлогенический пояс располагается на южном фланге Верхоянского складчато-надвигового пояса. Он сложен терригенно-карбонатными и карбонатными (рифей – нижний карбон) и терригенным (средний карбон – средняя юра) отложениями. Спецификой данного пояса являются ассоциация золото-кварцевых жил с полиметаллическими и наложение на них постагрегационного олово-серебро-полиметаллического оруденения.

Куларский ареал золото-кварцевых жил является фрагментом Верхояно-Колымской покровно-складчатой системы. Ведущую роль в металлогении Куларского золоторедкометалльного района играют граниты и адамеллиты Куларского батолита, которые генерируют группы рудных формаций, накладывающиеся друг на друга в пределах близких площадей (Ивенсен и др., 1975).

Для *Охотско-Чукотского* рудного пояса характерны Карамкенский и Хаканджинский районы, пространственное размещение месторождений в которых контролируется вулканическими структурами центрального типа (Моисеенко, Эйриш, 1996; Юшманов, Петрищевский, 2016) и зоной растяжения земной коры под вулканическим поясом, сопряженной с трансформным сдвигом (Ханчук, Иванов, 1999). Глубоко проникающие зоны растяжения служили каналами для поступления магм и рудогенных флюидов в верхние горизонты коры.

Сведения о профилирующей специализации рудных узлов и районов обобщены в табл. 1, 2. Из

Таблица 1. Профилирующая металлогеническая специализация рудных узлов и районов*

Table 1. Predominant metallogenic specialization of ore knots and districts*

Au-Q	Au-Sulfid	Sn	W, Sn	Sb, Hg	Au, Cu	Au-Ag	Au, Sn
ВИ Ве ЭА ЮВ	Ку Т	Д ЦЯ ЮЯ	Дж	ВВ Хл	ШС	С	Ка Т Э

*Здесь и в табл. 2 обозначения узлов и районов – см. рис. 1.

*Here and in Table 2 designations of ore see on Fig. 1.

Таблица 2. Районы с комплексной рудной минерализацией

Table 2. Regions with complex ore mineralization

Au, Ag, Pb- Zn	Au, Pb-Zn, Sn	Au, Sb, Hg	Sn, W, Mo, Ag, Pb, Zn	Au- Ag, Sn	Sn, W, Pb- Zn, Ag
Ом ЗВ	ВГ	Ку ВВ ДО Хл	Дж СЯ Ды	Ка Хк	Тк

рис. 1а и табл. 1, 2 следует, что золото является “сквозным” элементом в рудно-магматических системах (РМС) Верхояно-Колымского региона.

Рассмотренные данные свидетельствуют о том, что основными факторами локализации рудной минерализации в Верхояно-Колымском регионе выступают гранитоиды, разломы, сдвиго-надвиговые дислокации и структуры центрального типа, формирующие концентрическую рудную зональность.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Теоретической основой построения рассматриваемой далее гравитационной модели являются два доказательства в теоремах единственности и эквивалентности обратных задач гравитационного потенциала.

1. Для всякого тела с переменной плотностью существует эквивалентное тело с постоянной плотностью, а потенциалы системы (множества) источников и эквивалентного односвязного звездного источника равны, если их массы и расположение центров масс совпадают (Иванов, 1956; Прилепко, 1970; Цирульский, Никонова, 1975).

2. Потенциалы объемного и сферического источников с общим центром тяжести равны, следствием чего является прием выметания объемных масс на поверхность эквивалентных сфер, впервые предложенный А. Пуанкаре (Evans, 1933).

Метод, результаты реализации которого рассматриваются далее, оперирует не конечно-метрическими геологическими телами, а эквивалентными областями, число и пространственное расположение элементарных плотностных неоднородностей внутри которых неизвестно (микститовая среда). Расчетные пересечения эквивалентных областей являются случайными, поэтому результаты расчетов трактуются как вероятностно-детерминированные.

Носителем информации о плотностной контрастности геологических сред между центрами эквивалентных квазиизометричных плотностных неоднородностей (Z_0) и поверхностями (H_c), на которые вымечаются, по А. Пуанкаре, их аномальные массы, является μ_z -параметр (Петрищевский, 2013а, 2020а):

$$\mu_z = \frac{VzmZ_0}{4\pi G(Z_0 - H_c)^2}, \quad (1)$$

где Vzm – амплитуда соответствующей гравитационной аномалии, G – гравитационная постоянная. Поверхности H_c всегда располагаются выше кровли соответствующих слоев, чтобы μ_z -параметр не обращался в ноль, а полученные значения сглаживаются.

Параметр μ_z характеризует плотностную контрастность сред на отрезках между центрами плот-

ностных неоднородностей и поверхностями эквивалентных сфер, другими словами, нормированную по глубине центра масс поверхностную плотность сферы. Вычисления ведутся на параллельных профилях, оптимально (вкрест преобладающего простирания гравитационных аномалий) пересекающих район исследования, и на каждом профиле определяются кажущиеся глубины залегания центров масс плотностных неоднородностей с предположительно изометричным (компактным) поперечным сечением. Критерии компактности рассмотрены в работах (Петрищевский, 2013а, 2020а). Точность определения центров масс составляет $\pm 10\%$ для элементарных неоднородностей, удовлетворяющих условиям: $Z > 0.5D$ и $2 > \Delta h/D > 0.5$, где Z – глубина залегания поверхности источника, D – его горизонтальные размеры, Δh – его вертикальные размеры. При понижении точности до $\pm 30\%$ пределы эквивалентности расширяются до диапазона $5 > \Delta h/D > 0.1$.

На исследуемой территории использованы две системы расчетных профилей: ЮЗ–СВ и СЗ–ЮВ, результаты вычислений по которым суммированы. Общее число единичных определений μ_z -параметра составило 2150 расчетных точек. Графики аномального поля на расчетных профилях последовательно сглаживались, чтобы охватить вычислениями аномалии всех видимых пространственных классов. Такая процедура близка к процедурам локализации сингулярных (особых) точек плотностных неоднородностей методами отношения производных (Трошков, 1994; Блох, 1998) и деконволюции Эйлера (Zhang et al., 2000), однако преимуществом нашего метода (Петрищевский, 2013а, 2020а) является интерпретация элементарных гравитационных возмущений в явном виде (рис. 3), что позволяет измерить их амплитуды и в результате исследовать вещественные свойства плотностных неоднородностей в широком пространственном диапазоне.

На первом этапе расчетной процедуры формируется цифровой массив Z_0 , $Vzm(x, y)$. На втором этапе исследуемое геологическое пространство разбивается на слои и источники каждого слоя вымечаются на ближайшие поверхности H_c , касательные к поверхностям слоев. Далее по алгоритму (1) вычисляются значения μ_z -параметра для источников, заключенных в данном слое. Выполняется условие $Z_0 > H_c$. Конечным результатом вычислений является цифровой массив $\mu_z(x, y, H_c)$, который служит основой для построения распределений плотностной контрастности в горизонтальных срезах и разрезах $\mu_z(x, y, H_c)$ -модели. Земная кора и верхняя мантия были подразделены на 15 слоев (табл. 3). С более подробным описанием методики и результатами ее тестирования можно познакомиться в работах (Петрищевский, Юшманов, 2011, 2014; Петрищевский, 2013а, б, 2016, 2020а).

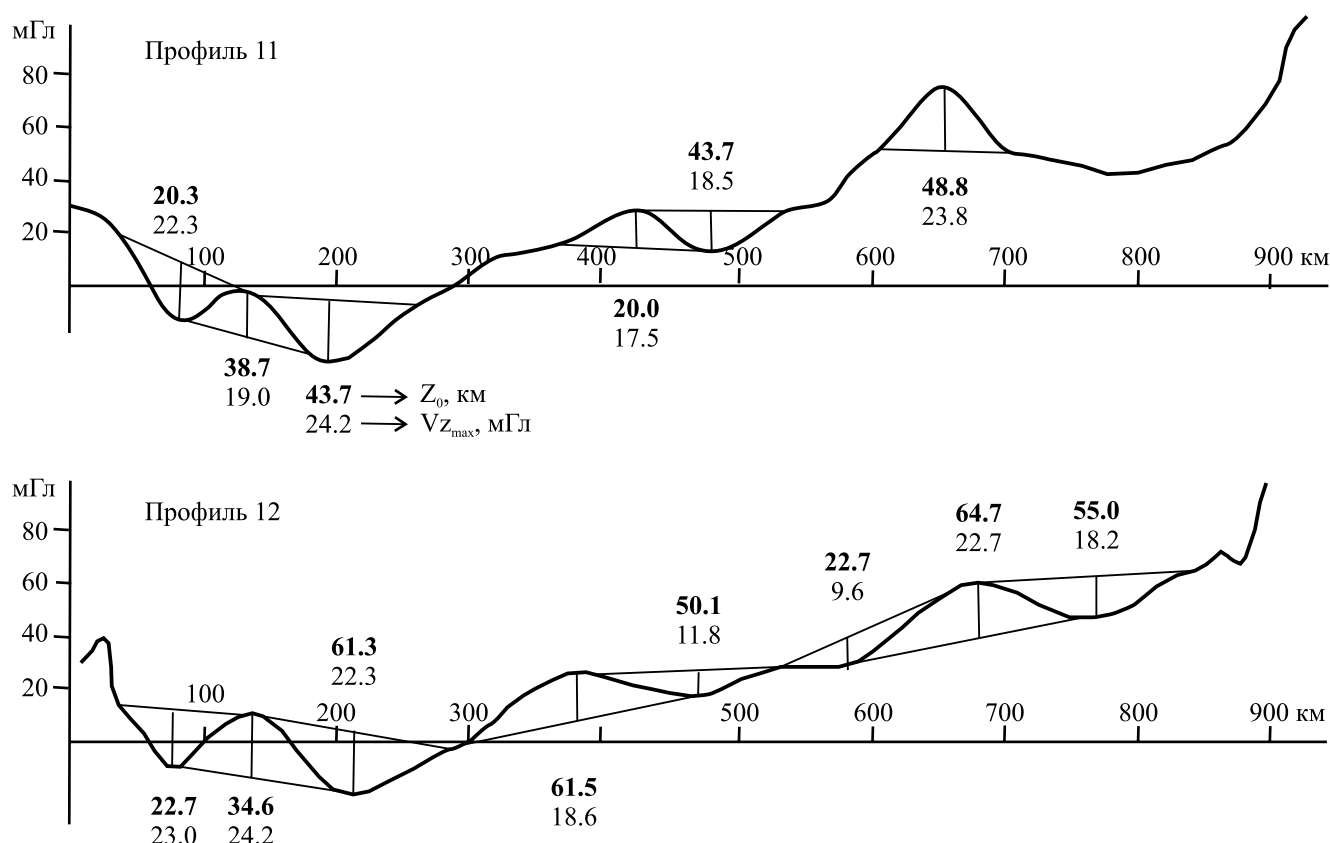


Рис. 3. Пример интерпретации локальных гравитационных возмущений.

Fig. 3. The interpreting example of local gravity disturbances.

Таблица 3. Параметры разбиения разреза тектоносферы на слои

Table 3. Division of the tectonosphere on layers

Слой, км	11–20	16–25	21–30	27–40	32–45	37–50	42–60	52–70
Нс, км	10	15	20	25	30	35	40	50
Слой, км	62–80	72–100	82–110	95–120	105–150	125–200	155–250	
Нс, км	60	70	80	90	100	120	150	

Методика моделирования плотностной контрастности протестирована в 12 районах Дальневосточного региона России (Петрищевский, 2008, 2013а, б; Юшманов, Петрищевский, 2016; Петрищевский, Юшманов, 2011, 2014), в Западной Сибири (Петрищевский, Исаев, 2017), Восточном Китае (Петрищевский, 2019, 2020б), Австралии (Петрищевский, 2016, 2019) и на Северо-Западе США (Петрищевский и др., 2020). Результаты тестирования показали, что плотностная контрастность геологических сред, описываемая μ_z -параметром, является индикатором их реологического состояния. Высоким и повышенным значениям μ_z -параметра соответствуют древние жесткие метаморфические блоки кратонов и террейны кратонного типа, низким и пониженным значени-

ям – зоны дробления и трещиноватости, аккреционные призмы и турбидитовые террейны, а также зоны флюидно-гидротермальной проработки в разломах и надкупольных зонах структур центрального типа разного ранга. В разрезах тектоносферы максимальным значениями плотностной контрастности повсеместно соответствуют гранитно-метаморфический и нижнекоровый мафический слои земной коры, разделяемые тонким слоем пониженной вязкости. В верхней мантии высоким значениям μ_z -параметра отвечает нижний жесткий слой литосферы. Низкие значения μ_z -параметра повсеместно совпадают с зонами пониженных скоростей сейсмических волн и удельных электрических сопротивлений (Петрищевский, 2008, 2013б, 2016). Совпадения минимумов плотностной контрастности

сти с максимумами теплового потока и температуры во многих случаях свидетельствуют о существовании расплавленных магм в переходном слое кора–мантия и астеносфере (Петрищевский, 2008, 2019; Петрищевский, Юшманов, 2014; Петрищевский, Исаев, 2017).

РЕОЛОГИЧЕСКАЯ ГРАВИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОГО РЕГИОНА

В распределениях плотностной контрастности (μ_z -параметра) проявлены два типа аномалий: протяженные линейные зоны минимумов ($\mu_z < 15$ ед.) и квазиизометричные минимумы, часто обрамляемые концентрически расположенными максимумами. Первые связываются с зонами растяжения, а вторые – с тектономагматическими структурами центрального типа.

В верхнем слое земной коры на глубине среза 10 км (рис. 4а) четко проявлен глубинный разлом – зона растяжения на глубинной границе Северо-Азиатского кратона с Колымо-Омолонским супертеррейном, северный отрезок которой проходит параллельно Адыча-Тенькинскому разлому (см. рис. 2а), а южный – Нют-Ульбейскому разлому (см. рис. 2а). Субширотная зона растяжения (около 64° с. ш.) тоже совпадает с границей кратона (см. рис. 2б). Еще две зоны растяжения (глубинные разломы) на юго- и северо-востоке региона находят подтверждение на тектонических схемах, где они служат восточными границами соответственно Охотского и Приколымского террейнов кратонного типа.

Центральным объектом на рассматриваемой территории является Индигиро-Колымская концентрически-зональная аномалия плотностной контрастности, в центре которой располагается минимум, а на периферии – цепочка максимумов, ориентированных по круговому контуру (см. рис. 4а). Такое расположение μ_z -аномалии и ее горизонтальные размеры (750–800 км) типичны для структур центрального типа плюмовой природы (Добрецов и др., 2006; Saunders et al., 2007; Петрищевский, Юшманов, 2011, 2014). Индигиро-Колымская СЦТ хорошо видна на космическом снимке (Космогеологическая карта..., 2017) и вписывается в региональный максимум теплового потока (см. рис. 4г).

Еще одна структура центрального типа меньших размеров располагается в низовье р. Яна, где она контролирует расположение Куларского, Депутатского и Северо-Янского рудных узлов (рис. 5а) с преимущественно золото-олово-серебряной и редкометалльной минерализацией. Сопутствующие элементы – полиметаллы, сурьма и ртуть. Эта структура располагается в той же зоне растяжения,

что и Индигиро-Колымская (см. рис. 4в, г), и обе эти структуры находятся в области высокого теплового потока (см. рис. 4б).

В срезе на глубине 20 км (см. рис. 4б) Индигиро-Колымская СЦТ увеличивается в диаметре до 1200 км и в зоне ее влияния оказывается Южно-Верхоянский (Аллах-Юньский) золоторудный район с крупнейшим Нежданинским месторождением (см. рис. 1а). Зоны растяжения СЗ-простираения в этом срезе смещаются на северо-восток, что соответствует их наклонному положению, читаемому в разрезе 4–4 (см. рис. 5в). В этом разрезе проявлены: надвигание КОТ на нижний слой литосферы Северо-Азиатского кратона, расщепление Северо-Американской плиты и пододвигание ее нижней литосферы под Колымо-Омолонский супертеррейн. При этом нижний слой литосферы САК прослеживается под Верхояно-Колымской складчатонадвиговой системой и выклинивается под юго-западным флангом КОТ. Те же особенности реологического расслоения тектоносферы читаются и в разрезе 1–1 (см. рис. 5в).

В коровом диапазоне глубин (0–50 км) Индигиро-Колымская СЦТ выражена куполообразным поднятием жесткого нижнекорового слоя, подстилаемого вязким подкоровым слоем (см. рис. 4д). Астеносферная линза в зоне Индигиро-Колымской СЦТ имеет размеры (см. рис. 4д, 5в), типичные для плюмов (Добрецов и др., 2006; Saunders et al., 2007). В разрезе 3–3 (см. рис. 5в) астеносфера сливается с подкоровым вязким слоем и приближается до глубины 50 км от поверхности Земли. В геоэлектрической модели (Вашилов и др., 2003) кровля астеносферы в центре Индигиро-Колымской СЦТ залегает на глубине менее 65 км.

В подлитосферном срезе на глубине 120 км (см. рис. 5а) проявлена еще одна – Верхоянская – СЦТ, которая тоже характеризуется концентрической зональностью: максимумами плотностной контрастности на периферии и минимумом в центре. Горизонтальные размеры структуры составляют 1000 км. Таким образом, вместо одной ранее предполагаемой (Г.А. Стогний, В.В. Стогний, 2009) астенолинзы в Верхояно-Колымо-Индигирском регионе, вероятно, существуют две плюмоподобные структуры, которые вписываются в региональный максимум теплового потока (см. рис. 4б). Эти структуры различаются по гипсометрическому положению кровли астеносферы и возрасту. Абсолютный возраст магматических пород и руд в Верхоянской СЦТ составляет 67–115 млн лет, а в Колымо-Индигирской – 134–151 млн лет (Геология..., 1986; Сухов и др., 2000; Прокопьев и др., 2018). Поскольку оруденение в исследуемом регионе, очевидно, связано с влиянием мантии (см. рис. 1а) и это подтверждают петрологические исследования (Изох и др., 2011; Горячев, 2014), то следует вывод, что Верхоянская СЦТ моложе Индигиро-

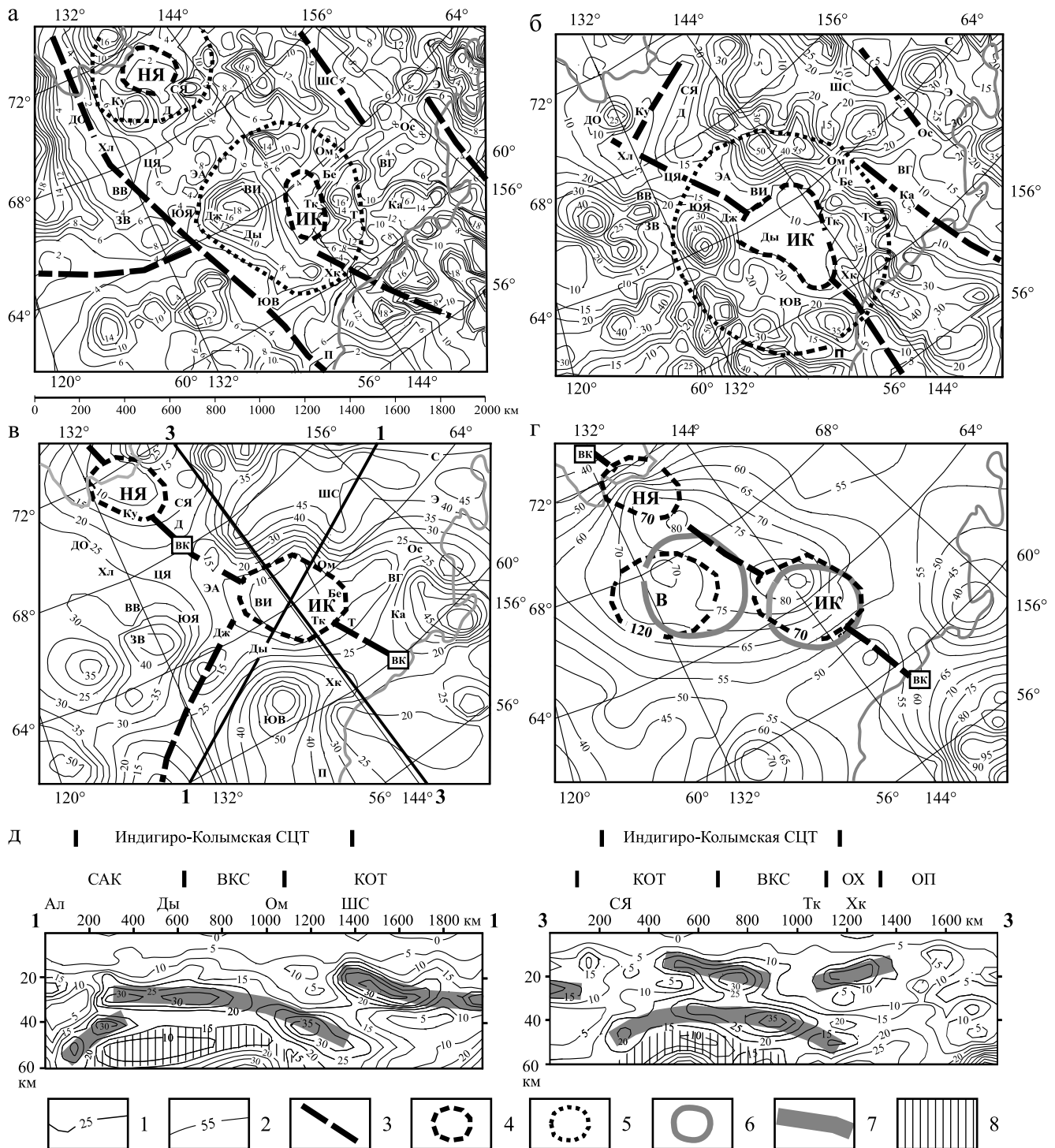


Рис. 4. Распределения плотностной контрастности на глубинах 10 км (а), 20 км (б), 70 км (в) и карта теплового потока (г) с разрезами μ_z (х, у, Нс)-модели (д).

1 – изолинии плотностной контрастности (1 ед. = 10^{-2} кг/м³/км); 2 – изолинии теплового потока осредненного в радиусе 50 км, построены по (Горнов, 2015); 3 – оси зон растяжения; 4, 5 – контуры внутренней (4) и внешней (5) зон в структурах центрального типа; 6 – структуры центрального типа на космогеологических снимках (Космогеологическая карта..., 2017); 7 – жесткие (высокая вязкость) слои; 8 – астеносфера.

а-г – структуры центрального типа на схемах: В – Верхоянская, ИК – Индигиро-Колымская, НЯ – Нижне-Янская. Обозначения рудных узлов и районов над разрезами соответствуют таковым на рис. 1.

д – структуры: САК – Северо-Азиатский кратон, ВКС – Верхояно-Колымская складчато-надвиговая система, КОТ – Колымо-Омолнский супертеррейн, ОП – Охотоморская плита, Ох – Охотский массив.

Fig. 4. Map-slices of the density contrast at the depth of 10 km (a), 20 km (б), 70 km (в) and the heat flow map (г) with sections of μ_z (x, y, Hc)-model (д).

1 – isolines of the density contrast (10^{-2} kg/m²/km); 2 – isolines of the heat flow smoothing by radius 50 km, remake from (Gornov, 2015); 3 – axis of stretching zones; 4, 5 – counters of inner (4) and outward (5) zones in the central type structures; 6 – central type structures on cosmic photos (Cosmic-geological map..., 2017); 7 – hard (high viscosity) layers; 8 – asthenosphere.

а–г – structures of the central type on schemes: В – Verkhoyanskaya, ИК – Indigiro-kolimskaya, НЯ – Nizhne-Yanskaya. Names of ore regions and knots are shown in Fig. 1.

д – structures: САК – North Asian Craton, КОТ – Kolima-Omolon super terrane, ВКС – Verkhoyano-Kolimskaya fold-thrust system, ОП – Sea of Okhotsk Plate, Ох – Okhotskii Massif.

Колымской на 30–40 млн лет и кровля астеносферы в первой располагается на большей глубине (см. рис. 4а–в; рис. 5а, б). Верхоянская СЦТ, по видимому, еще не достигла полного развития, и воздымание литосферы под давлением астеносферы в структуре продолжается в настоящее время. Это может оказать влияние на размещение малоизученных кайнозойских рудных проявлений.

В разрезах μ_z -модели (см. рис. 5в) Верхоянская, как и Индигиро-Колымская СЦТ, характеризуется куполообразным воздыманием нижнекорового слоя над астеносферной линзой, имеющей грибообразную форму. Кровля линзы располагается на глубине 80–90 км. С увеличением глубины среза контуры астеносферных центров обеих СЦТ сужаются до диаметра 500 км. В Индигиро-Колымской СЦТ это происходит на глубине 70 км (см. рис. 4в), а в Верхоянской – 150 км (см. рис. 5б). Различие в глубине залегания кровли астеносферы в этих структурах проявлено и в аномалиях теплового потока (см. рис. 4г). В Верхоянской СЦТ он понижен на 15 мВт/м².

В Охотско-Чукотском вулканическом поясе тоже существуют структуры центрального типа, одна из которых – Хаканджинская (Юшманов, Петрищевский, 2016) – располагается на юго-восточном продолжении СЗ–ЮВ глубинных разломов Верхояно-Колымского региона. Эта структура находится в области разветвления Верхояно-Колымской складчато-надвиговой системы на Западно-Верхоянскую и Южно-Верхоянскую ветви (см. рис. 2б), в месте сочленения ЕАП, САК и ОП. Поле вулканических пород в зоне влияния Хаканджинской СЦТ увеличивается в горизонтальных размерах (Тектоническая карта..., 2005). В разрезе этого поля установлены высокие содержания позднемеловых базальтов, андезито-базальтов и андезитов (Тектоническая карта..., 2005). В коровых срезах Хаканджинская СЦТ имеет размеры около 300 км в диаметре (Юшманов, Петрищевский, 2016), в подлитосферном слое астеносфера растекается в окружности диаметром 800 км (см. рис. 5а), а в подастеносферном слое подводящий канал (мантийная струя) структуры сужается до 500 км в диаметре (см. рис. 5б).

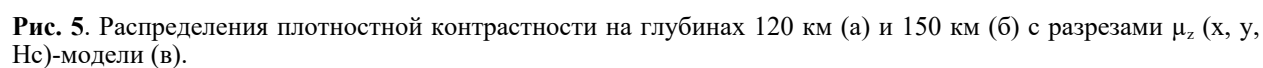
СВЯЗИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С РЕОЛОГИЧЕСКИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

Пространственное размещение рудных узлов и районов в Верхояно-Колымском регионе контролируется двумя структурными факторами: линейными зонами растяжения (табл. 4) и структурами центрального типа (табл. 5). Связи между глубинными плотностными неоднородностями и рудными месторождениями дискретны. Наилучшая корреляция рудных узлов и районов с линейными зонами растяжения наблюдается на трех глубинных уровнях: 10–20, 40–50 и 70–80 км (см. табл. 4, 5; рис. 6а). Первый соответствует структурному несогласию на границе гранитно-метаморфического и нижнекорового мафического (базальтового) слоев, второй – подкоровому вязкому слою, третий – кровле астеносферы.

В линейных зонах растяжения большинство (21) рудных районов характеризуется связью рудной минерализации с подкоровым вязким слоем (см. табл. 4, рис. 4). Второй уровень реологических разуплотнений на глубине 70–80 км имеет меньшее отношение к размещению рудных районов, однако с ним тоже связаны 17 рудных районов (см. табл. 4).

Рудные районы в коровых зонах растяжения (интервал глубин 10–40 км) характеризуются развитием высоко- и среднетемпературного оруденения (Sn, Sn–W, Sn–Ag, Sn–W–Mo, Pb–Zn–Ag), связанного с кислой и умеренно-кислой гранитной магмой. В мантийных зонах растяжения (интервал глубин 70–80 км) располагаются низкотемпературные месторождения Au–Sb, Au–Sb–Hg, Au–Hg, Sb, Hg, связанные с зонами глубинных разломов, имеющих отдаленную парагенетическую связь с производными глубинных подкоровых очагов базальтовой магмы. На это указывает присутствие на месторождениях даек основного состава.

На основе изотопно-хронологических исследований установлено, что возраст гранитоидов Главного батолитового пояса, совмещенного с региональной зоной растяжения-сдвига (см. рис. 2а), составляет 156–140 млн лет, поперечных гранитных поясов – 139–98, гранитов Южного Верхоянья – 125–120 и 107–95 млн лет (Борисенко и др., 2012).



1 – изолинии плотностной контрастности (1 ед. = 10^{-2} кг/м³/км); 2 – оси зон растяжения; 3, 4 – контуры внутренней (3) и внешней (4) зон в структурах центрального типа; 5 – жесткие слои в надкупольных зонах плюмов; 6 – астеносфера. Другие обозначения – см. рис. 4.

Fig. 5. Distributions of the density contrast at the depth of 120 (a) and 150 (б) km with sections of μ_z (x, y, Hc)-model (b).

1 – isolines of the density contrast (10^{-2} kg/m³/km); 2 – axis of stretching zones; 3, 4 – counters of inner (3) and outward (4) zones in the central type structures; 5 – hard (high viscosity) layers over the plume domes; 6 – asthenosphere. Others captures see in Fig. 4.

Au-месторождения ассоциируют с окисленными известково-щелочными диорит-монцититами I-типа, а Sn-месторождения – с восстановленными и более кислыми гранитоидами S-типа. Несмотря на парагенетическую связь с гранитоидным магматизмом, практически все крупные месторождения и проявления золотокварцевой формации удалены от гранитоидных массивов как по латерали, так и по вертикали.

Теснота связи рудных узлов и районов со структурами центрального типа увеличена на трех глубинных уровнях: 40–50, 70–80 и 100–150 км (см. табл. 5, рис. 6б). Первый соответствует подкоровому вязкому слою, второй – кровле астеносферы в головах плюмов, а третий – утолщениям астеносферы в центральных (стволовых) зонах СЦТ. С первым уровнем связаны 9 рудных районов, со вторым – 11, с третьим – 13. Увеличение количества рудных районов, коррелирующих с астеносферой, обусловлено растеканием астеносферы под подошвой литосферы в головах плюмов. По полученным данным (см. рис. 4, 5), СЦТ подразделяются по глубине залегания и вертикальному диапазону на литосферные (Нижне-Янская, Индигиро-Колымская) и подлитосферные (Верхоянская, Хаканджинская). Астеносферные рудно-магматические системы (ВВ, Хл, ЗВ, ЭА, Хк, СЯ, СА и Т) характеризуются присутствием в россыпях и рудах металлов платиновой группы (Буряк, 2003; Плюснина и др., 2003) и дайковыми комплексами основного состава. Здесь и далее сокращенные обозначения районов приводятся в соответствии с рис. 1. Пространственное расположение СЦТ коррелирует с широкой зоной растяжения-сдвига, проявленной в распределениях плотностной контрастности в срезах на глубинах 20 км (см. рис. 4б) и 70 км (см. рис. 4в), и аномалиях теплового потока (см. рис. 4г). Эта зона контролирует большинство золоторудных районов (До, Хл, Ку, ЦЯ, Д, ЭА, ЮЯ, Дж, Ды, ВИ, ТК, Т) и на большинстве тектонических схем показывается как граница Евразийской и Северо-Американской плит (см. рис. 2в). В разрезах μ_z (x, y, Hc)-модели зона растяжения-сдвига пересекает литосферу на всю ее мощность (см. рис. 5в).

Реологические гравитационные модели позволяют оценить вертикальные связи рудных узлов и районов с плотностными неоднородностями земной коры и верхней мантии в разных глубинных

срезах. По полученным данным (см. табл. 4) можно выделить районы с преимущественно коровым вертикальным диапазоном приразломных РМС (10–40 км), подкоровым (40–50) и астеносферным (70–80 км). К первым относятся районы ЦЯ, Ом, Дя, До, ко вторым – ЯА, ВВ, Ды, Хл, Хк, ЗВ, к третьим – ВИ, ТК, СЯ, Т (см. табл. 4). Для некоторых районов (Дж, Хл, Ку, ЭХ, ЭА, ЮВ) характерны сквозные связи приповерхностной рудной минерализации с плотностными неоднородностями земной коры и верхней мантии (см. табл. 4). В этих районах часто проявлена полиформационная и мультистадийная рудная минерализация (Гамянин и др., 1998, 2015; Гамянин, 2001, 2014; Тектоника..., 2001; Геодинамика..., 2006).

В структурах центрального типа наибольшую вертикальную протяженность рудно-магматических систем можно предполагать для рудных районов Дж, ВВ, ЗВ, ЭА, Хк, ЦЯ и ЮЯ (см. табл. 5).

Примером коровых РМС является Омудевский полиметаллический район. Здесь развиты доаккреционные стратиформные колчеданно-полиметаллические рудопроявления в вулканогенно-осадочных породах ордовика и позднеюрских–раннемеловых субвулканических и интрузивных телах разного состава с проявлением Pb-Zn-Bi минерализации (Шпикерман, 1987). В другом – Дьядинско-Олонойском – районе коровые золоторудные РМС связаны с пластовыми надвигами, региональными метаморфическими процессами и “криптоинтрузиями” гранитоидов (Фридовский, 1999). Рудные тела представлены пластовыми кварц-карбонатными жилами и секущими прожилками в складчатых структурах, не имеющих проникновение на глубину, что соответствует небольшому вертикальному диапазону РМС (см. табл. 4).

Подкоровые РМС (Sn, W, Au, Ag, Pb, Zn, Sb, Hg) связаны с зонами глубинных разломов (сдвигами) большой протяженности, контролирующими приразломные массивы гранитов. Для этих месторождений характерны смешанные корово-мантийные изотопные метки (Горячев, 1998, 2014; Изох и др., 2011; Некрасов, 2017).

Рудная минерализация в контурах СЦТ своим происхождением обязана флюидно-магматическим потокам, внедрившимся в зоны растяжения. Структуры центрального типа обычно характеризуются выгнутым или приподнятым к поверхности нижним слоем земной коры и соответствующей кон-

Таблица 4. Корреляция рудных узлов и районов с зонами растяжения в земной коре и верхней мантии
Table 4. Correlation of knots and regions with stretch zoners into the crust and upper mantle

Глубина среза, км	Рудные узлы и районы																
	Ды	ВИ	Дж	Тк	ВВ	ВГ	Ка	Ве	Дя	Хл	Ку	ЗВ	ЯА	Ом	ЭХ	ЭА	Хк
10																	
20	+		+		+		+		+	+	+		+		+		+
30												+					
40	+		+		+		+		+	+	+	+	+		+		+
50	+		+							+	+		+				
60					+					+	+	+					
70		+		+		+				+	+						+
80	+		+	+			+			+	+						
90																	
100																	
120																	
150																	

Примечание. Обозначения рудных узлов и районов соответствуют таковым на рис. 1.

Note. Designations of ore knots and districts follow Fig. 1.

Таблица 5. Корреляция рудных узлов и районов со структурами центрального типа в земной коре и верхней мантии
Table 5. Correlation of knots and regions with the central type structures into the crust and upper mantle

Глубина среза, км	Рудные узлы и районы																
	Ды	ВИ	Дж	Тк	ВВ	ВГ	Ка	Ве	Дя	Хл	Ку	ЗВ	ЯА	Ом	ЭХ	ЭА	Хк
10	+		+														
20																	
30																	
40								+									
50		+	+	+				+						+	+		
60																	
70		+	+	+							+						
80	+																
90																	
100					+					+							
120																	
150			+		+							+					

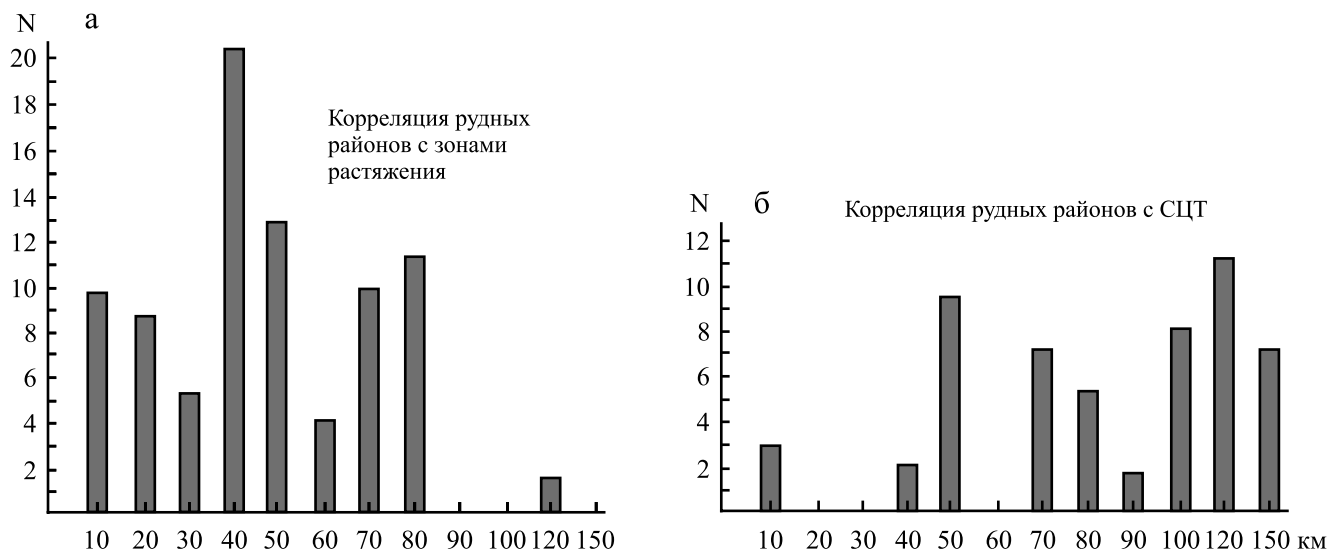


Рис. 6. Гистограммы связи рудных районов Верхояно-Колымского региона с зонами реологического разуплотнения в земной коре и верхней мантии.

Fig 6. Histograms of the connection of ore regions with the lower viscous zones into the crust and upper mantle.

центрической металлогенической зональностью (Петрищевский, Юшманов, 2011; 2014; Петрищевский и др., 2020). В Верхояно-Колымском регионе (см. рис. 4д; 5а, в) горизонтальные размеры литосферных СЦТ расширяются до 900–950 км в средней части коры, а у подошвы литосферы – резко сужаются до диаметра 300–450 км, что отвечает типичным параметрам плюмов (Добрецов и др., 2006; Burov et al., 2007). Аналогичным образом размеры астеносферных СЦТ увеличены в кровле астеносферы и уменьшены в подастеносферной мантии (см. рис. 5а, б).

В центральной (стволовой) зоне **Индиголо-Колымской СЦТ** расположены золоторудные районы с преимущественно высокотемпературным золотокварцевым типом минерализации (ВИ, Ве), а на периферии, кроме золоторудных, – олововольфрамовые (Дж), оловянные (ЮЯ) и районы с комплексной рудной минерализацией (Ом, СЯ). Большинство золоторудных месторождений с низкотемпературной золотосульфидной минерализацией (Т), примесью олова (ЮЯ, Дж, Т) и полиметаллов (Ом, Тк) тяготеют к флангам Индиголо-Колымской СЦТ.

Нижне-Янскую СЦТ по размерам, вертикальному диапазону и рудной специализации, по существующей классификации, можно отнести к горячим точкам, мигрирующим от центров плюмов по зонам глубинных разломов. Примеры такой миграции описаны многократно, в частности в районах влияния Хангайского (Ярмолук и др., 2007) и Йеллоустонского (Saunders et al., 2007; DeNosaquo et al., 2009) плюмов. Нижне-Янская СЦТ не имеет астеносферных корней, и ее образование связано с флюидно-магматической активностью Верхояно-

Колымской зоны растяжения-сдвига (см. рис. 4в, г). Рудные районы в зоне влияния этой структуры (Ку, Д, СЯ) расположены на ее периферии и коррелируют с концентрическими аномалиями плотностной контрастности на глубинах 10 и 70 км (рис. 4а, в). В этих районах преимущественно распространены золотосульфидная (Ку), оловянная (Д) и комплексная минерализация с золотом, молибденом, сурьмой и ртутью (СЯ). Возраст оловорудной минерализации во всех районах Куларского ареала близок к интервалу 70–115 млн лет, а золоторудные проявления имеют возраст 106–113 млн лет (Константинов и др., 2013; Прокопьев и др., 2018). Судя по определениям абсолютного возраста, Нижне-Янская СЦТ сформировалась позже Индиголо-Колымской на 40–50 млн лет, что типично для горячих точек на флангах плюмов (DeNosaquo et al., 2009).

Для рудных районов Нижне-Янской СЦТ характерна комплексная минерализация с участием Pb-Zn-Ag, W, Sb, Hg, Au. На ранних фазах оруденение представлено золото-редкометалльно-кварцевой и кассетерит-кварцевой формациями, а на поздних – золото-сурьмяно-ртутной (Куларский район). Структурные (см. рис. 4а, в) и металлогенические характеристики Нижне-Янской СЦТ свидетельствуют о том, что эта структура является сателлитом Индиголо-Колымского плюма. Ее образование обусловлено миграцией рудогенных магм и флюидов по региональному разлому на границе Евразийской плиты с Колымо-Омолонским супертеррейном.

В **Верхоянской СЦТ** большая часть рудных районов характеризуются оловянным и полифор-

мационным оруденением (см. рис. 1а, 4а). В центральной части структуры расположены районы с преимущественно низкотемпературной оловянной (ЦЯ), ртутно-сурьмяной (ВВ) и золотосеребряной (ЮЯ, ЗВ) рудной минерализацией. Возможно, это объясняется глубоко располагающимся астеносферным “корнем” этой структуры. Исключением в этой зоне является Эльги-Адычанский район с золотокварцевой минерализацией, для которого установлена отчетливая связь с Чаркынским надвигом (Парфенов и др., 1989), экранирующим глубинные флюидные потоки в зоне коллизии Колымо-Омолонского супертеррейна с Северо-Азиатским кратоном (Горячев, 2000). Как это обычно бывает в структурах центрального типа (Петрищевский, Юшманов, 2011, 2014), возраст рудной минерализации омолаживается в направлении от флангов к центру структуры (млн лет): 122–150 (Ды) → 110–122 (Ку) → 70–115 (Д) → 85–105 (ЗВ) → 67 (ЮЯ, ЦЯ).

Юго-западный фланг Верхоянской СЦТ пересекается с Индигиро-Колымской (см. рис. 4а, б; 5а), поэтому, вероятно, в зоне их пересечения наблюдается полиформационное Sn-W-Mo-Ag-Pb-Zn оруденение (Дж, Ды).

Хаканджинская СЦТ расположена на пересечении Верхояно-Колымской зоны растяжения-сдвига и Охотско-Чукотского рифтогенного вулканического пояса (см. рис. 2а, б; 4а, б). Как и в большинстве других рифтогенных структур на Востоке Азии (Байкальской, Южно-Якутской, Танлу, Шанси, Япономорской), в Охотско-Чукотском поясе тоже присутствует сдвиговая составляющая (Ханчук, Иванов, 1999). В зоне влияния Хаканджинской СЦТ совмещены месторождения и рудопроявления Au, Ag, Pb, Zn, Sn, W, Mo, Cu, Sb, Hg, относящиеся к различным рудным формациям. Как и в других районах Охотско-Чукотского вулканического пояса (Ка, ВГ, ОС, Э, С), преимущественным распространением в Хаканджинской СЦТ пользуются золотосеребряные и полиметаллические месторождения (см. рис. 1а).

Хаканджинская СЦТ более детально рассмотрена нами ранее (Юшманов, Петрищевский, 2016). По полученным данным, глубоко проникающие в кору и подкоровую мантию магмоконтролирующие разломы (сбросы, сбросо-сдвиги, раздвиги) северо-западного направления являются продолжением Верхояно-Колымской зоны растяжения-сдвига, а синвулканические дизъюнктивы северо-восточного простирания наложены на них. В относительном расположении рудных узлов и химическом составе рудных парагенезов проявлена отчетливая концентрическая зональность. Просматривается два концентрических пояса рудной минерализации. Первый окаймляет центр структуры, а второй проявлен на удалении 240–280 км от центра структуры. В первом поясе концентрируют-

ся преимущественно золотосеребряные месторождения (Хаканджинское, Чачика, Юрьевское), а во втором вместе с золотосеребряной минерализацией присутствуют месторождения и проявления W, Mo, Cu, Pb, Zn и Sn.

Приводимые материалы показывают, что во всех СЦТ, связанных с палеоочагами подкоровых или астеносферных магм, размещение рудных месторождений характеризуется концентрической зональностью, а возраст рудной минерализации омолаживается в направлении от флангов к центрам СЦТ. В зависимости от глубины залегания рудогенных магм в центрах структур располагаются высокотемпературные золотокварцевые месторождения (Колымо-Индигирская СЦТ) либо низкотемпературные золотосульфидные с оловом, серебром и сурьмой (Верхоянская СЦТ). Как и в других районах Дальнего Востока России (Петрищевский, Юшманов, 2011, 2014), золото, благодаря высокой подвижности в расплавах и способности к многократной регенерации (Буряк, 2003), является “сквозным” элементом в рудно-магматических системах структур центрального типа (см. рис. 1а; табл. 2, 3).

Кроме реологических факторов, влияющих на размещение рудных месторождений в Верхояно-Колымском регионе, важное значение имеют кинематические характеристики рудоконтролирующих разломов, которым подчиняются структуры рудных полей в приповерхностном слое земной коры. Структурный контроль эндогенного оруденения в верхних горизонтах земной коры определяется его приуроченностью к сдвиговым и надвиговым транспрессионным зонам, а в их пределах – к дуплексам растяжения, благоприятным для проникновения магмы и рудных флюидов. Эти зоны имеют значительную горизонтальную протяженность (сотни километров) и проникают до глубины 70–80 км (см. рис. 4в; табл. 4). Горизонтальные смещения по Верхояно-Колымской системе сдвигов происходили в интервале от верхней юры до середины конца палеогена (Гусев, 1979; Шахтыров, 1997, 2009).

Металлогеническое значение глубинных сдвигов отчетливо отражено в Верхояно-Колымской зоне растяжения-сдвига (см. рис. 2а), проявленной в распределениях плотностной контрастности в срезах на глубинах 20 км (см. рис. 4б) и 70 км (см. рис. 4в) и контролирующей золоторудные районы (До, Хл, Ку, ЦЯ, Д, ЭА, ЮЯ, Дж, Ды, ВИ, ТК, Т). На большинстве тектонических схем эта зона считается границей Евразийской и Северо-Американской плит (см. рис. 2в).

В Верхояно-Колымской зоне растяжения-сдвига располагаются очаговые СЦТ (см. рис. 4б, в) и аномалия теплового потока (см. рис. 4г). Горизонтальная протяженность зоны в приповерхностном слое оставляет около 900 км, а на глубине – более 1600 км (см. рис. 4в, г). Судя по распределениям

плотностной контрастности в разрезах 1–1 и 4–4 (см. рис. 5в), сдвиги сопряжены с чешуйчатым надвигом со стороны Колымо-Омолонского супертеррейна, вследствие чего в верхнекоровом срезе (см. рис. 4а) этот разлом смещен к юго-западу относительно среднекорового (см. рис. 4б) и нижнего литосферного (см. рис. 4в) его положений. Верхояно-Колымская зона растяжения-сдвига характеризуется развитием крупных золотокварцевых месторождений (Наталка, Павлик) и рядом средних и мелких месторождений: золото-редкометалльно-кварцевых, олововольфрамовых, оловосеребряных и полиметалльно-серебряных (Школьное, Бутугычаг, Валунистое и др.) в местах повышенной концентрации гранитных магм. Северо-западный фланг зоны отличается присутствием наложенной палеогеновой Au-Sb (Сарылах, Малтан, Сенточан) минерализации. С зоной растяжения-сдвига парагенетически связан Чаркынский надвиг (Архипов и др., 1981; Парфенов и др., 1989) – тектонический срыв между триасовыми и юрскими отложениями, к которому приурочено большинство месторождений и рудопроявлений в его фронтальной части и непосредственно в самой зоне надвига (Имтачан, Туманное, Учуйское и др.).

Совмещение СЦТ с зоной растяжения и верхнекоровыми сдвигами рассматривается далее на примере Верхне-Индибирского золоторудного района (рис. 7), который расположен в контурах Адыча-Тарынского трансенсивного сдвигового дуплекса и ротационной структуры центрального типа (см. рис. 7). Горизонтальные перемещения приповерхностных тектонических масс в голове Индибир-Колымского плюма были возможны благодаря существованию зон пониженной вязкости в среднем слое земной коры (см. рис. 4б) и подошве литосферы (см. рис. 4в).

Структурная позиция Верхояно-Индибирского рудного района определяется сдвиговым дуплексом, который выделен авторами в результате анализа материалов разномасштабных геологических карт и литературных данных. В основу метода положена концепция структурных рисунков, сформированных сдвиговыми дислокациями земной коры.

В терминологии А.В. Прокопьева с соавторами (2004) сдвиговый дуплекс – это сочетание двух кулисообразных левых или правых сдвигов, сомкнутых между собой системой субпараллельных дочерних опережающих разрывов. Выделяются присдвиговые транспрессивные и трансенсивные структурные ассоциации, которые называются сдвиговым дуплексом сжатия и растяжения соответственно.

Дуплексы структур растяжения характеризуется широким развитием сбросов, сдвига-сбросов и раздвигов, дуплексы сжатия – развитием надвигов, взбросов, сдвига-надвигов, сдвига-взбросов. Модели формирования сдвиговых рудно-магматических

дуплексов на примере Казахстана, Якутии и Приморья изложены в работах (Твелев, Твелев, 1999; Прокопьев и др., 2004; Уткин и др., 2020).

Адыча-Тарынский сдвиговый дуплекс представляет собой разрывную структуру ромбовидно-линзовидной формы в плане, ограниченную с флангов двумя субпараллельными разно направленными сдвигами и диагональными разрывами. Адыча-Тарынский (Адыча-Тенькинский) взбросо-сдвиг и дуплексные разломы Брюнгандинский и Чай-Юреинский (см. рис. 6) являются фрагментами широкой зоны растяжения-сдвига (см. рис. 2, 4в). Центральную часть дуплекса занимает Z-образный раздвиг, вмещающий Нельканский адамелит-гранитный плутон, Тарынский дацитовый субвулкан и сателлитные мелкие штоки. По данным (Тектоника..., 2001), U-Pb датировки свидетельствуют о возрасте кристаллизации дацитов 149.0 ± 1.2 млн лет. Дацинты прорываются риолитовым комплексом с возрастом 134–138 млн лет (Шкодзинский и др., 1992). Здесь установлены три типа золоторудных месторождений: золотокварцевые, золоторедкометалльные и золотосурьмяные при их последовательном формировании (Гамянин, 2001). В золотосурьмяных месторождениях, расположенных в зоне Адыча-Тарынского глубинного разлома (взбросо-сдвига), было установлено наложение сурьмяного оруденения на золотокварцевое.

О приуроченности Верхне-Индибирского рудного района к центральной (стволовой) зоне Индибир-Колымского плюма свидетельствует палеогеновый возраст (57–37 млн лет) Сарылахского золотосурьмяного месторождения по гидромусковиту (Гамянин, 2001). Предполагается связь Sb с глубинными источниками рудного вещества (мантийными или нижнекоровыми). По отношению к центральной батолит-субвулканической Z-образной раздвиговой структуре хорошо выражена латеральная рудно-магматическая зональность золотого и редкометалльного оруденения. В центре Тарынского субвулкана известны проявления Mo-W, в эндоконтакте – Sn-Ag, в экзоконтакте – Au-редкометалльные и на флангах Au-кварцевые и Au-Sb в узкой полосе вдоль зоны Адыча-Тарынского разлома. Месторождения Сарылах и Малтан окаймляют пиритизированные и арсениопиритизированные березиты по песчаникам и алевролитам с высокой (от 3–4 до 20–30 г/т) золотоносностью, т. е. вмещающие породы сами являются рудными телами.

Анализ геолого-структурной обстановки в зоне правосдвигового дуплекса (см. рис. 7) показал, что его формирование происходило при региональном тангенциальном сжатии (режим косой транспрессии), ориентированном в направлении СЗ 330–340°, субпараллельно простиранию длинной оси Z-образного раздвиги, в который в режиме растяжения внедрялась гранитная магма. В резуль-

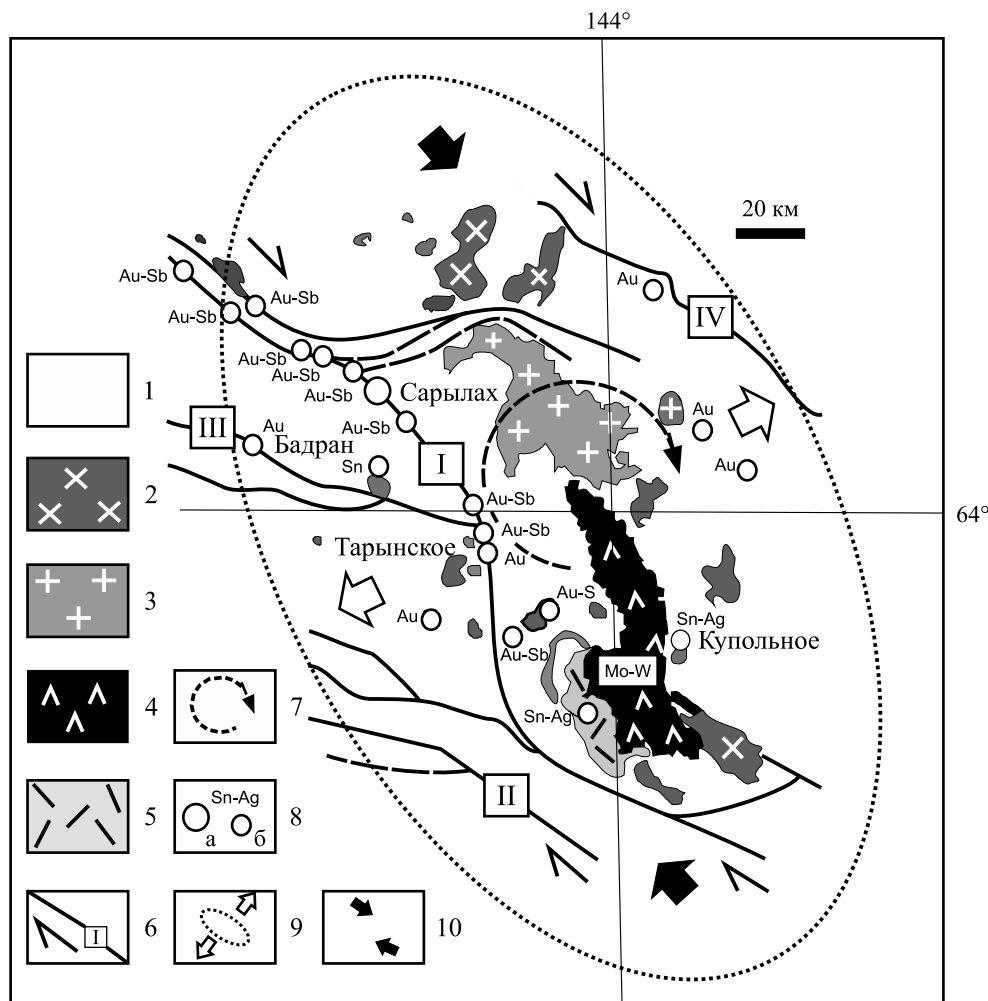


Рис. 7. Верхне-Инди́гирский рудно-магматический сдвиговый дуплекс, по А.Г. Бахарову с соавторами (1997) с дополнениями.

1 – верхоянский комплекс, представленный терригенными отложениями юры–триаса и верхней перми; 2 – гранодиориты; 3 – граниты; 4 – дациты Тарынского субвулкана; 5 – риолиты; 6 – разломы: I – Адыча-Тарынский (Адыча-Тенькинский), II – Брюнгандинский, III – Бадран-Эгеляхский, IV – Чай-Юреинский (стрелкой указан вектор горизонтального смещения крыльев); 7 – вектор вращения; 8 – месторождения (а) и рудопроявления (б) с преимущественной металлогенической специализацией; 9 – контуры присдвиговой зоны трансенсии с направлением векторов растяжения; 10 – направления векторов сжатия.

Fig. 7. The Upper-Indigirka ore-magmatic duplex by A.G. Bakharov et al. (1997) with additions.

1 – Verkhoyanskii complex, represented by terrigenous rocks of the Jurassic–Triassic and Late Permian; 2 – granite-diorites; 3 – granites; 4 – dacites of the Taryn volcanoes; 5 – rhyolites; 6 – faults: I – Adycha-Tarynskii (Adycha-Ten'kinskii), II – Bryungandinskii, III – Badran-Egelyakhskii, IV – Chay-Yureinskii (arrow shows a direction of horizontal displacement of wings); 7 – vector of rolling; 8 – deposits (a) and ore displays (b) with predominant metallogenic specialization; 9 – counter of sin-shear zone of a transtension with directions of spreading; 10 – directions of the compression vectors.

тате куполообразного воздымания магматического очага образовались кольцевая и радиальная система трещин и разломов, вмещающая мелкие штоки и дайки. Отчетливо выделяется несколько стадий деформационного процесса. Ранние сдвиговые деформации были связаны с развитием складчато-надвиговых структур в условиях “чистого сдвига” без вращения. При правом сдвиге на крыльях Адыча-Тарынского разлома была сформирована

северо-западная складчатость, осложненная по-слойными надвигами и взбросами. Поздние сдвиговые деформации происходили в условиях “простого сдвига” с вращением. Свидетельством ротационных процессов являются структуры закручивания в виде спиралевидных (кольцевых или дуговых) и вихревых структурно-кинематических рисунков вокруг Нельканского батолита (Константиновский, 2007). Амплитуда правого сдвига, опреде-

ляемого по мощности раздвигов без учета складчатости, составляет 20–40 км.

В постмагматический этап произошла смена ориентировки тангенциального сжатия на северо-восточное (СВ 60°) и направления сдвига с правого на левый по Адыча-Тарынскому разлому, способствовавшая миграции рудоносных флюидов в унаследованные трещины и разломы высоких порядков. На месторождении Бадран амплитуда левого сдвига Бадран-Эгеляхского северо-западного разлома составляет 600–1300 м (Фридовский, 1999). При северо-восточном сжатии дуплексный блок испытал ротацию против часовой стрелки. Во вмещающих осадочных породах возникли наложенные линейно-петельчатые структуры с крутыми шарнирами (Константиновский, 2007). Знакопеременные сдвиги происходили не вдоль одной поверхности, а в широкой зоне вязкого сдвига по многочисленным межпластовым срывам. Формирование кольцевого линеамента, читаемого на космическом снимке (см. рис. 4г), происходило в режиме сжатия, вероятно, при проседании кровли магматического очага и его ротации. Таким образом, образование рудоносной СЦТ является закономерным следствием не только вертикальной активности ниже- и подкоровых магм (см. разрез 3–3 рис. 4д, 5в), но и сдвиговой ротационной тектоники.

ВЫВОДЫ

В результате статистической обработки гравитационных аномалий и тектонической интерпретации распределений плотностной контрастности в земной коре и верхней мантии Верхояно-Колымского региона были выявлены новые особенности реологического расслоения тектоносферы до глубины 150 км, связи рудных месторождений с линейными зонами растяжения и структурами центрального типа плюмовой природы. Гравитационные модели, конструируемые без привлечения внешней (по отношению к гравиметрической) геолого-геофизической информации, подтвердили надвигание земной коры Колымо-Омолонского супертеррейна на окраину Северо-Азиатского кратона и существование последующих зон растяжения в земной коре и нижнем слое литосферы, сопряженных со сдвигами. Нижний слой литосферы САК, наоборот, пододвинут под КОТ и восточный фланг Верхояно-Колымской складчато-надвиговой системы. Таким образом, в этом регионе проявлены типичные черты двухъярусной коллизии литосферных сегментов (Петрищевский, 2013б).

В региональной зоне растяжения на границе КОТ и САК (см. рис. 4, 5) выявлены и описаны в 3D-пространстве Индигиро-Колымская и Верхоянская структуры центрального типа плюмовой природы. Они характеризуются выступами (upwellings) астеносферы грибообразной формы до глу-

бины 40 км (Колымо-Индигирская) и 80 км (Верхоянская). Различие этих структур по глубине проникновения астеносферы в верхние оболочки тектоносферы соответствует разному возрасту рудной минерализации, более молодому в Верхоянской СЦТ, где вероятно обнаружение новых кайнозойских рудных месторождений. Глубина залегания кровли астеносферы, по-видимому, определяет также рудную специализацию СЦТ: в Индигиро-Колымской СЦТ преимущественным распространением пользуется высокотемпературная золото-кварцевая минерализация, а в Верхоянской – низкотемпературная оловянная, ртутно-сурьмяная и золотосеребряная.

Размещение рудных узлов и районов в зонах влияния СЦТ характеризуется рудно-магматической зональностью, типичной для этого типа структур. В центральной (стволовой) зоне Индигиро-Колымской СЦТ располагаются районы с преимущественно высокотемпературным золотокварцевым типом минерализации, а на периферии, кроме золоторудных, – олововольфрамовые (Дж), оловянные (ЮЯ) и районы с комплексной рудной минерализацией (Ом, СЯ). Большинство золоторудных месторождений с низкотемпературной золотосульфидной минерализацией (Т), примесью олова (ЮЯ, Дж, Т) и полиметаллов (Ом, Тк) тяготеют к флангам Индигиро-Колымской СЦТ.

В Верхоянской СЦТ большая часть рудных районов характеризуются полиформационным орудением. В центральной части структуры расположены районы с преимущественно низкотемпературной оловянной (ЦЯ, ЮЯ), ртутно-сурьмяной (ВВ) и золотосеребряной (ЗВ) рудной минерализацией, что объясняется глубоко располагающимся астеносферным “корнем” этой структуры. На флангах структуры преобладают районы, в которых золото отсутствует (Д, СЯ, Дж, Хл) либо является второстепенным (ЗВ). Заметна тенденция омоложения возраста рудной минерализации в направлении от флангов к центру Верхоянской СЦТ (млн лет): 122–150 (Ды) → 110–122 (Ку) → 70–115 (Д) → 85–105 (ЗВ) → 67 (ЮЯ, ЦЯ).

Совмещение структур центрального типа с региональной аномалией теплового потока (более 70 мВт/м²) дает основание предположить, что вязкие среды в основании этих структур находятся в расплавленном состоянии.

Связи рудных узлов и районов с вязкими средами дискретны, и наилучшая корреляция рудных узлов и районов с линейными зонами растяжения наблюдается на трех глубинных уровнях: 10–20, 40–50 и 70–80 км (см. табл. 4, 5, рис. 6а). Первый соответствует структурному несогласию на границе гранитно-метаморфического и нижнекорового мафического (базальтового) слоев, второй – подкоровому вязкому слою, третий – кровле астеносферы. Теснота связи рудной минерализации со струк-

турами центрального типа увеличена на трех глубинных уровнях: 40–50, 70–80 и 100–150 км. Третий уровень соответствует утолщениям астеносферы в центральных (стволовых) зонах СЦТ.

Благодаря высокой подвижности и способности к многократной регенерации золото является сквозным и наиболее широко распространенным элементом в рудно-магматических системах Верхояно-Колымского региона (см. рис. 1), при этом самые богатые по запасам Верхне-Индиго-Колымский и Берелехский золотоносные районы располагаются в стволовой зоне Индиго-Колымского плюма (см. рис. 4а–в). В Верхоянской, преимущественно оловорудной, СЦТ Эльги-Адычанский золоторудный район тоже располагается в ее центральной зоне (см. рис. 5а, в).

Исследование связей рудных месторождений с 3D-распределениями плотностной контрастности позволили оценить вертикальную протяженность РМС. Наибольшим вертикальным диапазоном, предположительно, характеризуются золоторудные (ЭА, ЮВ, ЭА, Ку) и олововольфрамовые (Д, Дж, ЦЯ, ЮЯ) рудно-магматические системы.

Главные черты глубинного строения Верхояно-Колымского региона выявлены в результате внутренне однозначной вероятностно-детерминированной процедуры, представляющей собой обобщение множественных элементарных решений обратной задачи гравитационного потенциала с единственным решением. В отличие от общепринятого и широко распространенного физико-геологического подхода к интерпретации гравитационных аномалий реализованный метод использует априорную геолого-геофизическую информацию не в начале расчетной процедуры, а в ее конце путем сопоставления формальных распределений плотностной контрастности с тектоническими структурами, геофизическими аномалиями (геоэлектрическими, тепловыми) и размещением рудных месторождений. Удовлетворительная совместимость $\mu_d(x, y, H_s)$ -моделей с внешними геолого-геофизическими данными позволила подвести глубинную основу для предшествующих приповерхностных тектонических построений, выявить новые черты строения тектоносферы до глубины 150 км и реологических состояний глубинных геологических сред, определить новые закономерности размещения рудных месторождений.

Вместе с тем по причине наложения рудно-магматических процессов, обусловленных влиянием пересекающихся в пространстве глубинных структур разного ранга и генезиса (гранитоиды, зоны растяжения, коровые и подкоровые магматические очаги, астеносфера), и статистического характера расчетов плотностной контрастности, выявленные связи рудных месторождений с глубинными реологическими неоднородностями в земной коре и верхней мантии не могут рассматри-

ваться в качестве однозначных поисковых критериев. Они обозначают лишь вероятностные металлогенические тренды пространственного размещения рудной минерализации, которые могут быть учтены при выборе направления поисков рудных месторождений той или иной специализации. Тем не менее рассмотренные вероятностно-детерминированные модели дают начальное трехмерное представление о глубинном строении, реологии и секториально-концентрической зональности плотностных неоднородностей в земной коре и верхней мантии Верхояно-Колымского региона.

Благодарности

Авторы глубоко признательны академику Н.Л. Добрецову за положительную оценку статьи и ценные замечания, способствовавшие более ясному изложению результатов работы и Н.П. Кострову за внимательное редактирование рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.И. (2016) Тектоническое развитие и гранитодный магматизм Северо-Восточной Азии в позднем мезозое. *Записки Горного института*, **217**, 5–12.
- Аристов В.В. (2019) Закономерности размещения Золоторудных объектов Яно-Колымской провинции. *Геология и геофизика*, **60**(8), 1108–1125.
- Архипов Ю.В., Волкодав Г.Е., Камалетдинов В.А., Ян-Жиншин В.А. (1981) Надвиги западной части Верхояно-Чукотской складчатой области. *Геотектоника*, (2), 81–98.
- Бахаров А.Г., Гамянин Г.Н., Зайцев А.И. (1997) Новые данные по магматизму и металлогении серебра Верхне-Индиго-Колымской кольцевой структуры. *Геологическое строение, магматизм и полезные ископаемые Севера Восточной Азии*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 54–57.
- Блох Ю.И. (1998) Количественная интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. М.: Моск. геол.-развед. ун-т, 87 с.
- Бондаренко Г.Е., Диденко А.Н. (1997) Новые геологические и палеомагнитные данные о юрско-меловой истории Омолонского массива. *Геотектоника*, (2), 13–27.
- Борисенко А.С., Спиридонов А.М., Изох А.Э., Прокопьев А.В., Лебедев В.И., Гаськов И.В., Зорина Л.Д., Костин А.В., Наумов Е.А., Третьякова И.Г. (2012) Высокопродуктивные этапы базитового и гранитоидного магматизма Северной Азии, оценка их ресурсного потенциала, научное обоснование критериев прогноза и поисков крупных месторождений (Cu-Ni-Pt, Co, Au, Ag и редкометалльные). *Проблемы минералогии России*. Спецвып. Вестн. ОНЗ РАН. М.: ГЦ РАН, 237–252. DOI: 10.2205/2012mineralogy
- Буряк В.А. (2003) Основы минералогии золота. Владивосток: Дальнаука, 262 с.
- Вашилов Ю.Я. (1993) Глубинная структура, геодинамика и геокинематика Северо-Востока России. *Структура и геокинематика литосферы Востока России*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 5–19.
- Вашилов Ю.Я. (1995) Гравиметрическая томография – новое направление изучения твердой оболочки Зем-

- ли. Докл. АН, **343**(4), 532-536.
- Ващилов Ю.Я., Гайдай Н.К., Максимов А.Е., Любому-дров В.В., Лучинина А.В., Постникова В.В. (2003) Полиастеносфера Северо-Востока России – методы изучения, структура, кинематика, динамика. *Астеносфера и литосфера Северо-Востока России (структура, геокинематика, эволюция)*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 135-142.
- Гамянин Г.Н. (2001) Минералогическо-генетические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозоид. М.: ГЕОС, 222 с.
- Гамянин Г.Н., Гончаров Н.А., Горячев Н.А. (1998) Золоторедкометалльное оруденение Северо-Востока России. *Тихоокеан. геология*, (3), 94-103.
- Гамянин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю., Бортников Н.С. (2015) Аркачан – новый золото-висмут-сидерит-сульфидный тип месторождений в оловянно-Западно-Верхоянском районе Якутии. *Геол. рудн. месторождений*, **57**(6), 513-545.
- Гамянин Г.Н., Прокопьев А.В. (2014) Мезозойская металлогения Южно-Верхоянского синклинали. *Геологические процессы в обстановке субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит*. Мат-лы II Всерос. конф. с междунар. участием. Владивосток: Дальнаука, 304-306.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. (2006) (Ред. А.И. Ханчук). Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2006, 572 с.
- Геология оловянных месторождений СССР (1986). М.: Недра. Т. 1., 332 с. Т. 2, 429 с.
- Горнов П.Ю. (2015) Сейсмичность, границы и тепловое поле литосферных плит Северо-Востока Евразии. *Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска*. Сб. мат-лов Всерос. науч. конф. Т. 2. Южно-Сахалинск: Дальнаука, 55-59.
- Горячев Н.А. (1998) Геология мезозойских золотокварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 210 с.
- Горячев Н.А. (2000) Структурно-тектоническая позиция и эволюция гранитоидных и золотокварцевых поясов мезозоид Северо-Востока Азии. *Золотое оруденение и гранитоидный магматизм Северной Пацифики. Т. 1. Геология, геохронология и геохимия*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 46-67.
- Горячев Н.А. (2014) Благоприятно-металлический рудогенез и мантийно-коровое взаимодействие. *Геология и геофизика*, **55**(2), 313-332.
- Государственная гравиметрическая карта России в редукции Буге масштаба 1 : 2 500 000 (2001).
- Гусев Г.С. (1979) Складчатые структуры и разломы Верхояно-Колымской системы мезозоид. М.: Наука, 208 с.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. (2006) Диаметр и время формирования головы плюма на подошве “тугоплавкого” слоя в литосфере. *Докл. АН*, **406**(1), 99-103.
- Иванов В.К. (1956) О разрешимости обратной задачи потенциала в конечном виде. *Докл. АН СССР*, **106**(4), 598-600.
- Ивенсен Ю.П., Амузинский В.А., Невойса Г.Г. и др. (1975) Строение, история развития, магматизм и металлогения северной части Верхоянской складчатой зоны. Новосибирск: Наука, 322 с.
- Изох А.Э., Горячев Н.А., Альшевский А.В., Акинин В.В. (2011) Сохатинский дифференцированный габбро-монцодиоритовый интрузив как пример синбатолитовых габброидов Яно-Колымской системы. *Докл. АН*, **444**(2), 180-183.
- Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Кудрявцев И.В., Андросов Е.А., Винокуров И.Ю., Тарасова О.А., Эринчек Ю.М. (2018) Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Евразии. *Регион. геология и металлогения*, **70**, 9-24.
- Константинов М.М., Константиновский А.А., Наталенко М.В. (2013) Типизация золоторудных районов в терригенно-сланцевых поясах России. *Регион. геология и металлогения*, **54**, 75-88.
- Константиновский А.А. (2007) Структура и геодинамика Верхоянского складчато-надвигового пояса. *Геотектоника*, (5), 3-32.
- Космогеологическая карта России (2017). ВСЕГЕИ. Электронный геолого-картографический ресурс. www.vsegei.ru/info/atlas/cosmo
- Минерагеническая карта Российской Федерации и сопредельных территорий. (2000) М-б 1 : 2 500 000. (Ред. Д.С. Рундквист). М.: Аэрогеология.
- Митрофанов Н.П. (2005) Геодинамические режимы в северо-западном секторе Тихоокеанского рудного пояса на рудном этапе формирования месторождений олова. *Тихоокеан. геология*, **24**(1), 59-72.
- Митрофанов Н.П. (2018) Геодинамические проблемы металлогении олова, вольфрама, молибдена. *Отчет. геология*, (6), 3-13.
- Мойсеев В.Г., Эйриш Л.В. (1996) Золоторудные месторождения Востока России. Владивосток: Дальнаука, 352 с.
- Некрасов А.И. (2017) Типы геолого-структурных обстановок проявления золото- и сереборудной минерализации в Яно-Колымской и Западно-Верхоянской провинциях, Северо-Восток Якутии. *Руды и металлы*, (1), 5-18.
- Оксман В.С. (1998) Геодинамическая эволюция коллизийного пояса горной системы Черского (северо-восток Азии). *Геотектоника*, (1), 56-69.
- Парфенов Л.М., Оксман В.С., Прокопьев А.В., Рожин С.С., В.Ф. Тимофеев, Третьяков Ф.Ф. (1989) Детальные структурные исследования в Верхоянии, их значение для крупномасштабного геологического картирования. *Тектонические исследования в связи со средне- и крупномасштабным картированием*. М.: Наука, 1989, 109-127.
- Петрищевский А.М. (2008) Вязкий слой на границе кора-мантия на Дальнем Востоке. *Геотектоника*, (5), 37-48.
- Петрищевский А.М. (2013а) Гравитационный метод оценки реологических свойств земной коры и верхней мантии (в конвергентных и плюмовых структурах Северо-Восточной Азии). М.: Наука, 192 с.
- Петрищевский А.М. (2013б) Гравитационные модели двухъярусной коллизии литосферных плит на Северо-Востоке Азии. *Геотектоника*, (6), 60-83.
- Петрищевский А.М. (2016) Общие черты глубинного строения тектоносферы западно-тихоокеанских окраин (Северо-Восточная Азия и Австралия). *Геотектоника*, (6), 87-104.
- Петрищевский А.М. (2019) Рифтогенные структуры и нефтегазоносность в реологических гравитационных моделях земной коры. *Геофизика*, (4), 42-51.
- Петрищевский А.М. (2020а) Одно практическое след-

- ствие теорем единственности и эквивалентности обратных задач гравитационного потенциала. *Геофизика*, (4), 98-111.
- Петрищевский А.М. (2020) Новые данные о строении земной коры и верхней мантии Юго-Восточного Китая, полученные в результате статистической обработки гравитационных аномалий. *Тихоокеан. геология*, **3**(2), 29-45.
- Петрищевский А.М., Изосов Л.А., Емельянова Т.А. (2020) Реология и геометрия плюмов в литосферно-астеносферном диапазоне: результаты новых экспериментов. *Фундаментальные проблемы тектоники*. Мат-лы ЛП Тектон. совещ. Т. 2. М.: GEOS, 144-148.
- Петрищевский А.М., Исаев В.И. (2017) Глубинные источники теплогенерации и региональный прогноз нефтегазоносности Томской области. *Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*, **328**(5), 97-113.
- Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. (2011) Реология и металлогения Мая-Селемджинского плюма. *Докл. АН*, **440**(2), 207-212.
- Петрищевский А.М., Юшманов Ю.П. (2014) Геофизические, магматические и металлогенические признаки мантийного плюма в верховьях рек Алдан и Амур. *Геология и геофизика*, **55**(4), 568-593.
- Плюснина Л.П., Ханчук А.И., Гончаров В.И., Сидоров В.А., Горячев Н.А., Кузьмина Т.В., Лихойдов Г.Г. (2003) Золото, платина и палладий в рудах Наталкинского месторождения (Верхне-Колымский регион). *Докл. АН*, **391**(3), 383-387.
- Прилепко А.И. (1970) О единственности определения плотности и формы тела в обратных задачах теории потенциала. *Докл. АН СССР*, **193**(2), 288-291.
- Прокопьев А.В., Борисенко А.С., Гамянин Г.Н., Фридовский В.Ю., Кондратьева Л.А., Трунилина В.А., Васюкова Е.А., Иванов А.И., Травин А.В., Королев О.В., Васильев Д.А., Пономарчук А.В. (2018) Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования месторождений и магматических образований Верхояно-Колымской складчатой области. *Геология и геофизика*, **59**(10), 1542-1563.
- Прокопьев А.В., Фридовский В.Ю., Гайдук В.В. (2004) Разломы (Морфология, геометрия и кинематика). Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 148 с.
- Сидоров А.А., Белый В.Ф., Волков А.В., Алексеев В.Ю., Колова Е.Е. (2009) Золотосеребряноносный Охотско-Чукотский вулканогенный пояс. *Геология рудн. месторождений*, **51**(6), 512-527.
- Сидоров А.А., Волков А.В. (2015) Металлогения окраинноморской литосферы (Северо-Восток России). *Литосфера*, (1), 24-34.
- Стогний Г.А. (2011) Глубинное строение и рудоконтролирующие структуры Алдано-Становой и Верхояно-Черской золотоносных провинций. Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 40 с.
- Стогний Г.А., Стогний В.В. (2000) Строение литосферы Верхояно-Колымской орогенной области. *Отеч. геология*, (5), 41-44.
- Стогний Г.А., Стогний В.В. (2004) Гранитогнейсовые купола – рудоконтролирующие структуры Верхояно-Колымской орогенной области. *Изв. вузов. Геология и разведка*, (4), 8-12.
- Стогний Г.А., Стогний В.В. (2009) Региональные неоднородности литосферы Северо-Азиатского кратона. *Геофизика*, (6), 59-65.
- Стогний Г.А., Стогний В.В. (2011) Региональные рудоконтролирующие геодинамические системы золотого оруденения Северо-Востока России: геолого-геофизический аспект. *Современное состояние наук о Земле*. М.: МГУ, 1788-1991.
- Сухов В.И., Бакуин Ю.И., Лошак Н.П., Хитрунов А.Т., Родионова Л.Н. (2000) Металлогения Дальнего Востока России. Хабаровск: Дальневост. НИИ минерального сырья, 217 с.
- Твелев Ал. В., Твелев Арк. В. (1999) Сдвиговые магматические дуплексы. *Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма*. М.: Геос, 89-193.
- Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). (2001) (Отв. ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин). М.: Наука – Интерпериодика, 571 с.
- Тектоническая карта области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов. М-б 1 : 1 500 000. (2005) (Ред. Л.П. Карсаков, Чжао Чуньцин, Ю.Ф. Малышев, М.В. Горошко). Владивосток; Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 262 с.
- Трошков Г.А. (1994) Метод локализации сингулярных источников геопотенциальных полей в пространстве трех вещественных переменных. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, (9), 73-77.
- Уткин В.П., Митрохин А.Н., Неволин П.Л., Юшманов Ю.П. (2020) Сдвиговый тектогенез в формировании Восточно-Сихотэ-Алинского вулканоплутонического пояса: структурно-динамический анализ. *Литосфера*, (4), 528-541.
- Фридовский В.Ю. (1999) Сдвиговые дуплексы месторождения Бодран. *Изв. вузов. Геология и разведка*, (1), 60-65.
- Ханчук А.И., Иванов В.В. (1999) Мезозойская геодинамическая обстановка и золотое оруденение Дальнего Востока России. *Геология и геофизика*, (11), 1635-1645.
- Ханчук А.И., Петрищевский А.М. (2007) Астеносфера и плиты Северо-Восточной Азии. *Докл. АН*, **412**(5), 689-693.
- Хасанов И.М., Шарафутдинов В.М. (2011) Глубинная структура Юго-Востока Яно-Колымской складчатой системы по геофизическим данным и характерные особенности строения золоторудных узлов. *Уч. зап. Казанского ун-та*, **153**(3), 230-246.
- Хомич В.Г., Фатьянов И.И., Борискина Н.Г. (2008) Металлогения золота в трудах Е.А. Радкевич и проблема образования обособленных и совмещенных концентраций Au и Sn. *Тихоокеанский рудный пояс: материалы новых исследований*. Владивосток: Дальнаука, 228-245.
- Цирульский А.В., Никонова Ф.И. (1975) О разрешимости обратной задачи логарифмического потенциала в конечном виде. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, (5), 37-46.
- Шахтыров В.Г. (1997) Тенькинский глубинный разлом: тектоническая позиция, инфраструктура, рудоносность. *Геологическое строение, магматизм и полезные ископаемые Северо-Восточной Азии*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 62-64.
- Шахтыров В.Г. (2009) Верхне-Колымский золотоносный район в свете сдвиговой тектоники. *Изв. Сиб. отд. Секции наук о Земле РАЕН*, (35), 89-98.
- Шкодзинский В.С., Недосекин Ю.Д., Сурнин А.А. (1992) Петрология позднемезозойских магматических по-

- род Восточной Якутии. Новосибирск: Наука, 328 с.
- Шпикерман В.И. (1987) Полиметаллическое оруденение Омудевского поднятия (Северо-Восток СССР). Владивосток: ДВО АН СССР, 164 с.
- Шпикерман В.И., Горячев Н.А. (1996) Плиттектоническая металлогения складчатых систем аккреционного типа. *Металлогения складчатых систем с позиций тектоники плит*. Екатеринбург: УрО РАН, 64-78.
- Юшманов Ю.П. (2019) Золотоносные вихревые структуры в сдвиговых дуплексах Дальнего Востока: Центральная Колыма и Нижнее Приамурье. *Отчет. геология*, (3), 55-62.
- Юшманов Ю.П., Петрищевский А.М. (2016) Тектоника и металлогения Хаканджинского рудного района в Охотско-Чукотском вулканическом поясе. *Тихоокеан. геология*, 35(5), 24-38.
- Ярмолюк В.В., Кудряшова В.А., Козловский А.М. (2007) Позднемеловой-раннекайнозойский вулканизм Южной Монголии – след Южно-Хангайской горячей точки мантии. *Вулканология и сейсмология*, (1), 3-31.
- Burov E., Guillou-Frottier L., D'Acremont E., Le Pourhiet L., Cloeting S. (2007) Plume head-lithosphere interaction near intra-continental plate boundaries. *Tectonophysics*, 434, 15-38.
- DeNosaquo K.R., Robert B., Smith R.B., Anthony R., Lowry A.R. (2009) Density and lithospheric strength models of the Yellowstone–Snake River Plain volcanic system from gravity and heatflow data. *Volcanol. Geotherm. Res.*, 188, 108-127.
- Evans G.C. (1933) Application of Poincare's sweeping-out process. *Mathematic*, 19, 457-461.
- Geological map of Northern-Central-Eastern Asia and adjacent areas. M 1 : 2 500 000 (2012). Beijing, Geological Publishing House.
- Saunders A.D., Jones S.M., Morgan L.A., Pierce K.L., Widomson W., Xu Y.G. (2007) Regional uplift associated with continental large igneous provinces: the role of mantle plumes and the lithosphere. *Chem. Geol.*, 241, 282-318.
- Zhang C., Mushayandebvu F.M., Reid A.B., Fairhead J.D., Odegard M.E. (2000) Euler deconvolution of gravity tensor data. *Geophysics*, 65(2), 512-520.
- Bondarenko G.E., Didenko A.S.N. (1997) New geological and paleomagnetic data about Jurassic-Cretaceous history of the Omolon massif. *Geotektonika*, (2), 13-27. (In Russ.)
- Borisenko A.S., Spiridonov A.M., Izokh A.E., Prokop'ev A.V., Lebedev V.N., Gas'kov I.V., Zorina K.D., Naumov E.A., Tret'yakova I.G. (2012) High productive periods of the basalts and granites magmatism of the North Asia and evaluation resources potential of its, scientific basing of the forecast criteria and searching of grand deposits (Cu-Ni-Pt, Co, Au, Ag and rare-metals). *Problems of the Russian metallogeny (special issue of electronic journal Vestnik ONZ RAN)*, 237-252. (In Russ.) doi: 10.2205/2012miner-agency
- Burov E., Guillou-Frottier L., D'Acremont., Le Pourhiet L., Cloeting S. (2007) Plume head-lithosphere interaction near intra-continental plate boundaries. *Tectonophysics*, 434, 15-38.
- Buryak V.A. (2003) The basis of the gold metallogeny. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 262 p. (In Russ.)
- Cosmic-geological map of the Russia. (2017) *VSEGEI electronic geological-cartographic resource*. St.Petersburg, <http://www.vsegei.ru/info/atlas/cosmo> (In Russ.)
- DeNosaquo K.R., Robert B., Smith R.B., Anthony R., Lowry A.R. (2009) Density and lithospheric strength models of the Yellowstone–Snake River Plain volcanic system from gravity and heat flow data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 188, 108-127.
- Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G. (2006) Diameter and time of forming of the head plume on a bottom of the poor-melting layer of lithosphere. *Dokl. Akad. Nauk*, 406(1), 99-103. (In Russ.)
- Evans G.C. (1933) Application of Poincare's sweeping-out process. *Mathematic*, 19, 457-461.
- Fridovsky V.Yu. (1999) Shear duplexes on the Bodran deposits. *Isv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Geol. i Razvedka*, (1), 60-65. (In Russ.)
- Gamyanin G.N. (2001) Mineralogical-genetics aspects of the gold bearing of the Verkhoyano-Kolymsk Mesozoic strata. Moscow, GEOS Publ., 222 p. (In Russ.)
- Gamyanin G.N., Goncharov N.A., Goryachev N.A. (1998) Gold-rare metals ore bearing of the Far East Russia. *Tikhookean. Geol.*, (3), 94-103. (In Russ.)
- Gamyanin G.N., Prokop'ev A.V. (2014) Mesozoic metallogeny of the South Verkhoyansk sinclorium. *Geological processes in the states of subduction, collision and sliding of lithospheric plates*. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 204-306. (In Russ.)
- Gamyanin G.N., Vikent'eva O.V., Prokof'ev V.Yu., Bortnikov N.S. (2015) Arkachan – new gold-bismuth-side-rite-sulfide type of deposits in the tin-bearing district of the West-Verkhoyansk region of Yakutiya. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, 57(6), 513-545. (In Russ.)
- Geological map of Northern-Central-Eastern Asia and adjacent areas. Sc. 1 : 2 500 000. (2012) Beijing, Geological Publishing House.
- Goncharov V.I., Voroshin S.V., Sidorov A.A. (2002) Natalka ore-gold deposit. Magadan, SVKNII DVO RAN, 250 p. (In Russ.)
- Geodynamics, magmatism and metalligeny of the Russian East. (2006) (Ed. A.I. Khanchuk). Vladivostok, Dal'nauka Publ., B. 1, 572 p. (In Russ.)
- Geology of ore-tin deposits of USSR. (1986) Moscow, Nedra Publ., V. 1, 332 p., V. 2, 429 p. (In Russ.)

REFERENCES

- Alekseev G.I. (2016) Tectonic evolution and the granitoid magmatism of the North East Asia in Late Mesozoic. *Zapiski Gornogo Instituta*, 217, 5-12. (In Russ.)
- Aristov V.V. (2019) Regularity of ore-gold objects disposal in the Yano-Kolima province. *Geol. Geofiz.*, 60(8), 1108-1125. (In Russ.)
- Arhipov Yu.V., Volkodav G.V., Kamaletdinov V.A., Yanzhinshin V.A. (1981) Thrusts of the West part of Verkhoyano-Chukotsk fold area. *Geotektonika*, (2), 81-98. (In Russ.)
- Bakharov A.G., Gamyanin G.N., Zaitsev A.I. (1997) New data on the magmatism and metallogeny of the Upper Indigira ring silver structure. *Geological structure, magmatism and deposits of the North East Asia*. Magadan, SVKNII DVO RAN, 54-57. (In Russ.)
- Blokh Yu.I. (1998) Quantity interpreting of gravity and magnetic anomalies. Moscow, Moscow Geol.-Prosp. Univ. Publ., 87 p. (In Russ.)

- Gornov P.Yu. (2015) Seismicity, borders and heat field of lithospheric plates of the North East Eurasia. *Geodynamics processes and nature disasters. Experience of Neftegorsk*. Magadan, SVKNII DVO RAN, 55-59. (In Russ.)
- Goryachev N.A. (1998) Geology of the Mesozoic gold-quartz vein belts of the North East Asia. Magadan, SVKNII DVO RAN, 210 p. (In Russ.)
- Goryachev N.A. (2000) Structural-tectonic position and evolution of granitoid and the gold-quartz Mesozoic belts of the Northern Pacific. *Gold bearing and granitoid magmatism of the Northern Pacific*. Magadan, SVKNII DVO RAN, 46-67. (In Russ.)
- Goryachev N.A. (2014) Precious metal ore bearing and the crust-mantle interaction. *Geol. Geofiz.*, **55**(2), 313-332. (In Russ.)
- Gusev G.S. (1979) Fold structures and fractures of the Verkhoyano-Kolyma Mesozoic system. Moscow, Nauka Publ., 208 p. (In Russ.)
- Ivanov V.K. (1956) About decision of the inverse problem of gravity potential in a finite look. *Dokl. SSSR*, **106**(4), 598-600. (In Russ.)
- Ivensen Yu.P., Amuzinskii V.A., Nevoisa G.G. et al. (1975) Structure, development history, magmatism and metallogeny of Verkhoyansk folded zone northern part. Novosibirsk, Nauka Publ., 322 p. (In Russ.)
- Izokh A.E., Goryachev N.A., Al'shevsky A.V., Akinin V.V. (2011) Sokhatyni differentiated gabbro-monzonite intrusion as example of sin-batholite gabbroid of the Yano-Kolima system. *Dokl. Akad. Nauk*, **444**(2), 180-183. (In Russ.)
- Kashubin S.N., Petrov O.V., Mil'shtein E.D., Kudryavtsev I.V., Androsova E.A., Vinokurov I.Yu., Tarasova O.A., Erinchek Yu.M. (2018) Deep structure of the crust and upper mantle of the North East Eurasia. *Region. Geol. Metallogeniya*, (70), 9-24. (In Russ.)
- Khanchuk A.I., Ivanov V.V. (1999) Mesozoic geodynamic situation and ore gold of the Far East of Russia. *Geol. Geofiz.*, (11), 1635-1645. (In Russ.)
- Khanchuk A.I., Petrishchevsky A.M. (2007) Asthenosphere and plates of Northern Asia. *Doklady Earth Sciences*, **413**(2), 220-224 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **412**(5), 689-693).
- Khasanov I.M., Sharafutdinov V.M. (2011) Deep structure of the South East of Yano-Kolima folded belt from geophysical data and special features of ore notes. *Uch. zap. Kazan. un-ta*, **153**(3), 230-246. (In Russ.)
- Khomich V.G., Fat'yanov I.I., Boriskina N.G. (2008) Metallogeny of a gold in the works of E.A. Radkevich and the nature problem of a formation of isolated and jointed concentrations of Au and Sn. The Pacific ore belt: data of new researches. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 228-245. (In Russ.)
- Konstantinov M.M., Konstantinovskiy A.A., Natalenko M.V. (2013) Typification of ore-gold regions in the terrigenous-shale belts of the Russia. *Region. Geol. Metallogeniya*, **54**, 75-88. (In Russ.)
- Konstantinovskiy A.A. (2007) Structure and geodynamics of the Verkhoyansk thrust-folded belt. *Geotektonika*, (5), 3-32. (In Russ.)
- Minerogenic map of the Russia and adjacent territories 1 : 2 500 000. (2000) (Ed. D.S. Rundkvist). Moscow, Aerogeologiya. (In Russ.)
- Mitrofanov N.P. (2005) Geodynamic regimes in the North West sector of Pacific ore belt on the ore formation of tin deposits. *Tikhookean. Geol.*, **24**(1), 59-72. (In Russ.)
- Mitrofanov N.P. (2018) Geodynamic problems of a metallogeny of the tin, tungsten, molybdate. *Otech. Geologiya*, (6), 3-13. (In Russ.)
- Moiseenko V.G., Eirish L.V. (1996) Ore-gold deposits of the East Russia. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 352 p. (In Russ.)
- Nekrasov A.I. (2017) Types of geological-structures states of a display of the gold and silver ore mineralization in the Yano-Kolima and Western Verkhoyansk provinces, North East Yakutiya. *Rudy i Metally*, (1), 5-18. (In Russ.)
- Oksman V.S. (1998) Geodynamic evolution of collision belt of the Cherskii maintain system (North East Asia). *Geotektonika*, (1), 56-69. (In Russ.)
- Parfenov L.M., Oksman V.S., Prokop'ev A.V., Rozhin S.S., Nimofeev V.F., Tret'yakov F.F. (1989) Detail structural researches in the Verkhoyan'e, its significance for the high-scaled geological mapping. *Tectonic researches in a connection with the mid and high-scaled geological mapping*. Moscow, Nauka Publ., 109-127. (In Russ.)
- Petrishchevsky A.M. (2008) Viscous layer at the crust-mantle boundary in the Far East of Russia. *Geotectonics*, **42**(5), 357-367 (translated from *Geotektonika*, **42**(6), 60-83).
- Petrishchevsky A.M. (2013a) Gravity method for evaluation of rheological properties of the crust and uppermost mantle (in the convergent and plume structures of the North East Asia). Moscow, Nauka Publ., 192 p. (In Russ.)
- Petrishchevsky A.M. (2013b) Gravity models of the two-level collision of lithospheric plates in Northeastern Asia. *Geotectonics*, **47**(6), 465-484 (translated from *Geotektonika*, **47**(5), 37-48).
- Petrishchevsky A.M. (2016) Common features of the tectonosphere deep structure in the Western Pacific Margins (Northeast Asia Region and Australia). *Geotectonics*, **50**(6), 608-623 (translated from *Geotektonika*, **50**(6), 87-104).
- Petrishchevsky A.M. (2019) Rift structures and oil-bearing in the gravity model of the crust. *Geofizika*, (4), 42-51. (In Russ.)
- Petrishchevsky A.M. (2020a) One practical consequence from theorems of uniqueness and equivalence of the inverse gravity problem. *Geofizika*, (4), 98-111. (In Russ.)
- Petrishchevsky A.M. (2020b) New data on the crust and upper mantle structure of the Southeast China obtained from statistical processing results of gravity anomalies. *Rus. J. Pacific Geology*, **14**(2), 119-134 (translated from *Tikhookean. Geol.*, **3**(2), 29-45).
- Petrishchevsky A.M., Isaev V.I. (2017) Deep sources of a heat-generation and the regional forecast of the oil-gas bearing in the Tomsk district. *Izv. Tomsk. Politechn. un-ta. Engineering of geo-recourses*. **328**(5), 97-113. (In Russ.)
- Petrishchevsky A.M., Izosov L.A., Emel'yanova T.A. (2020) Rheology and geometry of plumes in the lithosphere-asthenosphere diapason: results of new experiences. *Basic problems of the tectonics*. Data of LII Tectonic conference, **2**. Moscow, GEOS Publ., 144-148. (In Russ.)
- Petrishchevsky A.M., Yushmanov Yu.P. (2011) Rheology and metallogeny of the Maya-Selemdzha plume. *Dokl. Akad. Nauk*, **440**(2), 207-212. (In Russ.)
- Petrishchevsky A.M., Yushmanov Yu.P. (2014) Geophysical, magmatic and metallogenic manifestations of the mantle plume in the upper reaches of Aldan and Amur rivers. *Rus. Geol. Geophys.*, **55**(4), 443-462 (translated from *Geol. Geofiz.*, **55**(4), 568-593).

- Plyusnina L.I., Khanchuk A.I., Goncharov V.I. (2003) Gold, platina and palladium in ores of the Natalka deposit (Upper Kolyma region). *Dokl. Akad. Nauk*, **391**(3), 383-387. (In Russ.)
- Prilepko A.I. (1970) About of unique definition of density and shape of a body in inverse problems of the potential theory. *Dokl. AN SSSR*, **193**(2), 288-291. (In Russ.)
- Prokop'ev A.V., Fridovsky V.Yu., Gaiduk V.V. (2004) Fractures: (morphology, geometry and cinematics). Yakutsk, SB RAS, 148 p. (In Russ.)
- Prokop'ev A.V., Borisenko A.S., Gamyarin G.N., Fridovsky V.Yu., Kondrat'eva L.A., Trunilina V.A., Vasyukova E.A., Ivanov A.I., Travin A.V., Korolev O.V., Vasil'ev D.A., Ponomarchuk A.V. (2018) Times boundaries and geodynamic states at the forming of deposits and magmatic formations of the Verkhoyansk-Kolyma folded area. *Geol. Geofiz.*, **59**(10), 512-527. (In Russ.)
- Saunders A.D., Jones S.M., Morgan L.A., Pierce K.L., Widowson M., Xu Y.G. (2007) Regional uplift associated with continental large igneous provinces: the role of mantle plumes and the lithosphere. *Chem. Geol.*, **241**, 282-318.
- Sidorov A.A., Belyi V.F., Volkov A.V. (2009) Gold-silver Okhotsko-Chukotskii volcanic belt. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **51**(6), 512-527. (In Russ.)
- Shakhtyrov V.G. (1997) Ten'kinskii deep fracture: tectonic state, infrastructure, ore bearing. *Geological structure, magmatism and useful deposits of the North East Asia*. Magadan, SVKNII DVO RAN, 62-64. (In Russ.)
- Shakhtyrov V.G. (2009) The Upper-Kolima gold district in a light of the shear tectonics. *Izv. Sibirskogo otdeleniya. Sektsii nauk o Zemle RAEN*, **35**, 89-98. (In Russ.)
- Shkodzinsky V.S., Nedosekin Yu.D., Surnin A.A. (1992) Petrology of the Late Mesozoic magmatic rocks of the Eastern Yakutiya. Novosibirsk, Nauka Publ., 328 p. (In Russ.)
- Shpikerman V.I. (1987) Polymetallic ore bearing of the Omulevskii uplift (North-East of USSR). Vladivostok, DVO RAN USSR, 164 p. (In Russ.)
- Shpikerman V.I., Goryachev N.A. (1996) Plate-tectonic metallogeny of the folded systems of accretional type. *Metallogeny of the folded systems of accretional type in light of the plate tectonics*. Ekaterinburg, UrO RAN, 64-78. (In Russ.)
- Sidorov A.A., Belyi V.F., Volkov A.V., Alekseev V.Yu., Kolova E.E. (2009) Gold-silver Okhotsko-Chukotskii volcanic belt. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **51**(6), 512-527. (In Russ.)
- Sidorov A.A., Volkov A.V. (2015) Metallogeny of marginal lithosphere (North-East Russia). *Lithosphere (Russia)*, (1), 24-34. (In Russ.)
- Stognii G.A. (2011) Deep structure and the ore control structures of the Aldan-Stanovaya and Verkhoyansk-Cherskaya ore bearing provinces. Doc. geol. and min. sci. diss. Moscow, 40 p. (In Russ.)
- Stognii G.A., Stognii V.V. (2000) The lithosphere structure of the Verkhoyansk-Kolima orogenic area. *Otech. Geologiya*, (5), 41-44. (In Russ.)
- Stognii G.A., Stognii V.V. (2009) Regional lithosphere heterogeneous of the North-East Craton. *Geofizika*, (6), 59-65. (In Russ.)
- Stognii G.A., Stognii V.V. (2011) Regional ore-checking geodynamic systems of North-East Russia gold bearing: geologo-geophysical aspect. *Modern state of the Earth sciences*. Moscow, Moscow State Univ. Publ., 1788-1991. (In Russ.)
- Sukhov V.I., Bakukin Yu.I., Loshak N.P., Khitrinov A.T., Rodionova L.N. (2000) Metallogeny of the Far East of Russia. Khabarovsk, Dal'nevost. NII Mineral. Syr'ya, 217 p. (In Russ.)
- Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha republic (Yakutiya). (2001) Moscow, Nauka-Interperiodika Publ., 571 p. (In Russ.)
- Tectonic map of the joint area of the Central-Asian and Pacific belts with explanatory notes. Vladivostok; Khabarovsk, ITIG DVO RAN, 262 p. (In Russ.)
- Troshkov G.A. (1994) The localization method for singular sources of potential fields in a space of three material differences. *Izv. Ross. Akad. Nauk. Fiz. Zemli*, (9), 73-77. (In Russ.)
- Tsirul'sky A.V., Nikonova F.I. (1975) About decision of the inverse problem of a logarithmic potential in finite look. *Izv. AN SSSR. Fiz. Zemli*, (5), 37-46. (In Russ.)
- Vashchilov Yu.Ya. (1993) Deep structure, geodynamics and geo-kinematics of the Northern Far East of Russia. *Structure and geo-kinematics of the North East Russia lithosphere*. Magadan, SVKNII DVO RAN, 5-19. (In Russ.)
- Vashchilov Yu.Ya. (1995) Gravity tomography – new direction of the study of a hard Earth. *Dokl. Akad. Nauk*, **343**(4), 532-536. (In Russ.)
- Vashchilov Yu.Ya., Gaidai N.K., Maximov A.E., Lubomudrov V.V., Luchinina A.V., Postnikova V.V. Poli-asthenosphere of the North East Russia – the study methods, structure, kinematics, dynamics. *Asthenosphere and lithosphere of the North East Russia (structure, geo-kinematics, evolution)*. Magadan, SVKNII DVO RAN, 135-142. (In Russ.)
- Utkin V.P., Mitrokhin A.N., Nevolin P.L., Yushmanov Yu.P. (2020) Strike-slip tectonics at the forming of Eastern Sikhote-Alin volcanic-plutonic belt: structural-geodynamic analysis. *Lithosphere (Russia)*, **20**(4), 528-541. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-204-528-541>
- Yarmolyuk V.V., Kudryashov V.A., Kozlovsky A.M. (2007) Late Cenozoic volcanism of the Southern Mongoliya – trace of the South-Khangay hot point of a mantle. *Vulkanol. Seismol.*, (1), 3-31.
- Yushmanov Yu.P. (2019) Ore bearing vortical structures in strike-slip duplexes of the Far East: Central Kolima and Low Amur. *Otech. Geol.*, (3), 55-62. (In Russ.)
- Yushmanov Yu.P., Petrishchevsky A.M. (2016) Tectonics and the Metallogeny of the Hakandzhinsky ore region in the Okhotsk-Chukotka volcanic belt. *Tikhookean. Geol.*, **35**(5), 24-38. (In Russ.)
- Zhang C., Mushayandebvu F.M., Reid A.B., Fairhead J.D., Odegard M.E. (2000) Euler deconvolution of gravity tensor data. *Geophysics*, **65**(2), 512-520.