

## СТРОЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ЗОЛОТОНОСНОСТЬ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКИ

©2023 А.Г. Нурмухамедов, М.Д. Сидоров

*Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, Россия, 683002; e-mail: nurmukhamedov1949@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.01.2023 г.; после доработки 26.05.2023 г.; принята в печать 26.09.2023 г.

Начиная с восьмидесятих годов прошлого столетия и по настоящее время на юго-востоке Камчатки реализован комплекс геофизических методов, включающий в себя метод обменных волн землетрясений, магнитотеллурического зондирования, гравиметрии, магнитометрии и сейсмологический. На основе комплексной интерпретации полученных данных построена геолого-геофизическая модель земной коры и верхней мантии вдоль профиля бух. Ходутка — с. Николаевка. Установлена генетическая связь между активными участками земной коры с месторождениями золота. Высказана гипотеза о разделении ранее единого ксеноблока на два отдельных фрагмента под воздействием сдвигов вдоль Начикинской зоны поперечных дислокаций. Южный фрагмент представлен Прибрежным террейном. К западу от террейна находится проницаемая зона, в которой проявлен современный вулканизм. Внедрение в верхние слои коры магмы и высокотемпературных флюидов, обогащенных растворами благородных металлов, происходит по магмоводу, сформированному в зоне палеосубдукции.

*Ключевые слова: Палео-Камчатка, земная кора, верхняя мантия, субдукция, террейн, рудопроявление.*

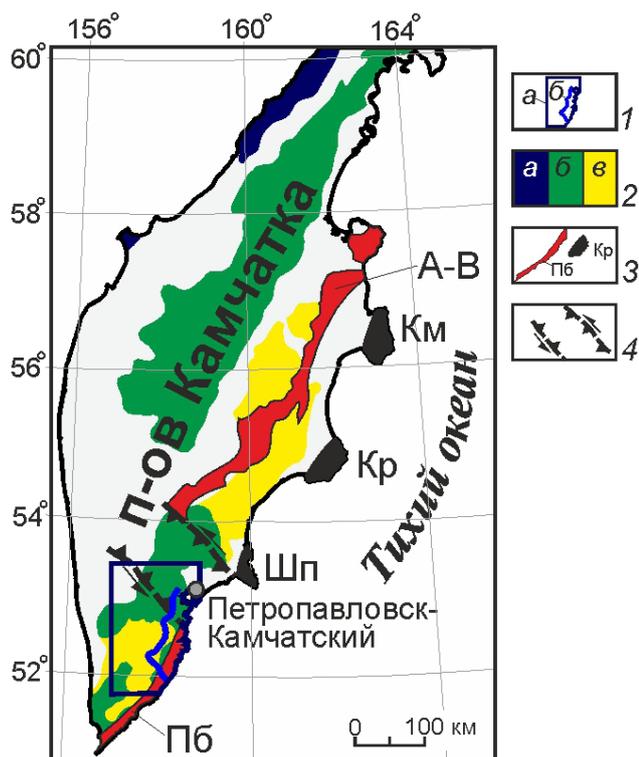
### ВВЕДЕНИЕ

Решение проблем структурной позиции золоторудных месторождений в области современного вулканизма является одной из приоритетных задач учёных Камчатки (Петренко, 1999). В связи с чем, большой интерес представляют результаты глубинных геолого-геофизических исследований, проведенных ОАО (ПГО) «Камчатгеология» вблизи известных месторождений и рудопроявлений золота, находящихся в зоне активного вулканизма (Нурмухамедов и др., 2020; Нурмухамедов, Сидоров, 2022; Nurmukhamedov, Sidorov, 2019a). Важность таких исследований заключается в том, что они дают возможность выявить генетические связи месторождений с глубинными особенностями строения литосферы и прогнозировать наличие новых рудоносных участков в других частях региона.

Камчатка расположена в северо-восточной части Евразии, и ее территория обладает характерными признаками активных континентальных окраин. Строение литосферы Юго-Восточной

Камчатки, как и во всей Восточной Камчатке, определяется субдукцией океанической литосферной плиты под краевую часть континентальной. Это одно из немногих мест, где несколько месторождений и рудопроявлений золота расположено непосредственно в зоне современного активного вулканизма (Петренко, 1999).

В металлогении в Тихоокеанской зоне перехода континент-океан решающее значение имеют зоны взаимодействия погружающейся океанической литосферы с континентальной (Зоненшайн и др., 1973; Смирнов, 1974; Петренко, 1999). Такое взаимодействие приводит к интенсивному освобождению эндогенной энергии вдоль протяженных зон в виде вулканических поясов (рис. 1). Исследуемая территория относится к южной ветви Центрально-Камчатского вулканического пояса (ЦКВП) с наложением на него структур Восточно-Камчатского (ВКВП). Северная и южная ветви ЦКВП, принадлежащие некогда единой структуре, под влиянием левосторонних сдвиговых дислокаций разделены и разнесены вдоль Начикинской зоны



**Рис. 1.** Обзорная карта: 1 — контуры площади исследований (а), геофизический профиль бух. Ходутка — с. Николаевка (б); 2 — вулканические пояса (Петренко, 1999): Корякско-Западно-Камчатский (а), Центрально-Камчатский (б), Восточно-Камчатский (в); 3 — террейны и их обозначение: Пб — Прибрежный, А-В — Ачайваям-Валагинский (Шапиро, Соловьев, 2009), Шп — Шипунский, Кр — Кроноцкий, Км — Камчатский; 4 — Начикинская зона поперечных дислокаций (стрелками показано направление сдвиговой дислокации).

**Fig. 1.** Overview map: 1 — contours of the study area (a), geophysical profile Khodutka Bay — Nikolaevka village (b); 2 — volcanic belts (Petrenko, 1999): Koryak-West Kamchatka (a), Central Kamchatka (b), East Kamchatka (v); 3 — terranes and their designation: Пб — Coastal, А-В — Achaivayam-Valaginsky (Shapiro, Solovyov, 2009), Шп — Shipunsky, Кр — Kronotsky, Км — Kamchatsky; 4 — Nachikinskaya zone of transverse dislocations (arrows show the direction of shear dislocation).

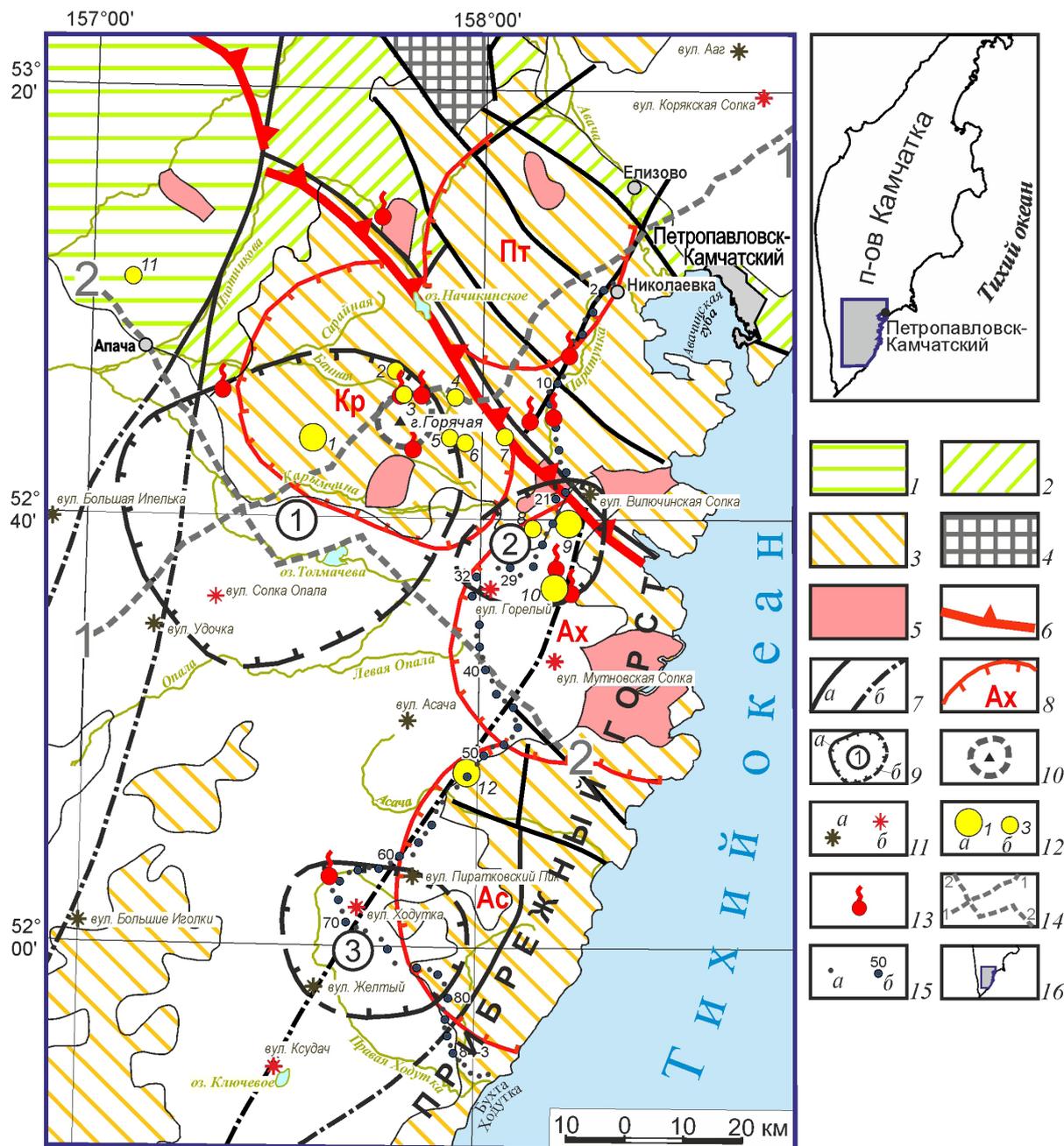
поперечных дислокаций (НЗПД). На тектонической схеме<sup>1</sup>, фрагмент которой представлен на рис. 2, южная ветвь ЦКВП и ВКВП объединены в Курило-Южно-Камчатскую островодужную вулканическую зону.

По мнению И.Д. Петренко (1999), главными структурными элементами вулканических поясов являются вулcano-тектонические структуры (ВТС). Все ВТС генетически связаны с проявлением кислого магматизма, что, вероятно, является отражением очагов гранитизации, приуроченных к долгоживущим зонам растяжения земной коры. ВТС играют главную роль в формировании залежей рудного золота и их развитие тесно связано с существованием на различных глубинах и соединенных с поверхностью периферических магматических очагов кислого-среднекислого состава. Образование и существование таких очагов сопровождается дегидратацией магмы и формированием гидротермальных систем. Основная роль в таких системах принадлежит водам метеорного происхождения. Доля же ювенильных вод в большинстве случаев не превышает 5% (Белоусов, 1978; Hedenquist, Houghton, 1987). Но, именно эта ювенильная составляющая несет главную

<sup>1</sup> Нурмухамедов А.Г. Отчет о результатах работ по объекту «Создание схемы сейсмоструктурного районирования Корякско-Камчатской складчатой области на основе обобщения глубинных геолого-геофизических работ». В 2-х книгах и 1-й папке. Книга 2. Петропавловск-Камчатский: ОАО «Камчатгеология», 2013. 252 с.

нагрузку в рудообразующих гидротермальных системах. Большинство исследователей, в том числе В.И. Белоусовым (1978) и И.Д. Петренко (1999), подтверждается связь гидротермальных полей с кислым вулканизмом.

Таким образом, можно говорить о существовании магматогенно-гидротермальных систем, в пределах которых происходит формирование месторождений и рудопроявлений золота в зоне современного вулканизма (Гончаров, 1983). Отмечено (Петренко, 1999) что на всех золоторудных объектах Юго-Восточной Камчатки верхняя граница оруденения формируется на глубине не более 100–300 м от палеоповерхности. Но, проблемы близповерхностного рудообразования невозможно решить без изучения глубиной составляющей упомянутых систем. По мнению В.И. Белоусова (1978) тепловая мощность кислых субвулканических тел недостаточна для образования долгоживущих гидротермальных систем, какие существуют в зоне современного вулканизма. Сами эти очаги могут быть источником тепла для гидротерм лишь очень непродолжительное время, а при отсутствии поступления тепла извне сравнительно быстро остывают. Кислый вулканизм и активная гидротермальная деятельность в таких местах возникают под воздействием более глубинного процесса, такого как базальтовый магматизм. Здесь передача энергии осуществляется путем внедрения по ослабленным зонам в верхние слои коры магматических расплавов и высокотемпературного водного флюида, обогащенного благородными металлами. В такой магматогенно-гидротермальной модели кислые очаги рассматриваются как аккумуляторы тепла, поступающего из глубины с базальтовыми магмами.



**Рис. 2.** Фрагмент тектонической схемы Корякско-Камчатской складчатой области (по материалам (Nurmukhamedov, Sidorov, 2019a; 2019b) с упрощениями и дополнениями): 1 — Корякско-Западно-Камчатская складчатая зона; 2 — Восточно-Камчатская подзона Олюторско-Восточно-Камчатской складчатой зоны; 3 — Курило-Южно-Камчатская островодужная вулканическая зона; 4 — допозднемиоценовые метаморфические комплексы; 5 — интрузивные образования преимущественно среднего и кислого состава; 6 — юго-западная граница Начикинской зоны поперечных дислокаций; 7 — разломы, выходящие на дневную поверхность (а) и перекрытые вышележащими образованиями (б); 8 — вулканотектонические структуры: Кр — Карымшинская, Пт — Плотниковская, Ах — Ахомтенская, Ас — Асачинская; 9 — границы уверенные (а), предполагаемые (б) коровых и коромантийных аномалий электропроводности, сформированных в зоне Толмачевского активного магматического центра (1), в районе вулканов Горелый, Мутновская и Вилючинская сопки (2), вулканов Ходутка, Пиратовский Пик и Желтый (3); 10 — контуры палеовулкана сопки Горячей; 11 — вулканы потухшие (а) и действующие (б); 12 — месторождения (а) и рудопроявления (б) золота: 1 — Порожистое, 2 — Ягодка, 3 — Банное, 4 — Верхне-Быстринское, 5 — Геофизическое, 6 — Карымшинское, 7 — Верхнекарымшинское, 8 — Рогатка и Быстринское, 9 — Родниковое, 10 — Мутновское, 11 — Гольцовское, 12 — Асачинское; 13 — источники и месторождения термоминеральных вод; 14 — линии геофизических профилей МОВЗ-МТЗ: г. Опала — р. Вахиль (1-1) и п. Апача — бух. Мутная (2-2); 15 — точки наблюдений на профиле бух. Ходутка — с. Николаевка: АМТЗ, МТЗ и ГМТЗ (а), совмещенные точки МОВЗ-МТЗ (б) и их номера; 16 — площадь исследований.

Подобные модели с различными структурными типами гидротермальных систем рассматриваются и в Южно-Камчатском рудном районе (Петренко, 1999). Верхняя часть этих моделей разработана на основе материалов геологических, гидрогеологических съемок различного масштаба, а также геофизических работ, выполненных в районе месторождений золота. Максимальная глубинность таких исследований не превышает первых сотен метров. Информация о глубинных частях магматогенно-гидротермальных систем почерпнута И.Д. Петренко (1999) из различных опубликованных источников, часто не относящихся к исследуемой территории, и носит схематичный характер. Так, например, в монографии (Петренко, 1999) не отражены результаты глубинных геофизических исследований, выполненных в 1980–1990 гг. вдоль профилей г. Опала — р. Вахиль и п. Апача — бух. Мутная (рис. 2). Профили пересекают Толмачевский активный магматический центр (ТАМЦ), в ареале которого находятся месторождение золота Порожистое и несколько рудопроявлений Карымшинского рудного узла (рис. 2).

Эта статья призвана дополнить информацию о глубинном строении динамически активного района Юго-Восточной Камчатки и о предполагаемой генетической связи месторождений золота с особенностями строения литосферы в зоне современного вулканизма. Представленные результаты основаны на материалах метода обменных волн землетрясений (МОВЗ), нескольких модификаций метода магнитотеллурического зондирования (МТЗ), гравиразведки, магниторазведки, сейсмологии и геологических данных, полученных в 1980–2013 гг. ОАО (ПГО) «Камчатгеология». Анализируются материалы геофизических исследований, выполненных вдоль профиля бух. Ходутка — с. Николаевка. Профиль проходит вдоль гряды действующих (Ходутка, Мутновская сопка, Горелый) и потухших (Пиратковский, Асача, Вилучинская сопка)

вулканов (рис. 2–5) и пересекает рудные поля Асачинского, Мутновского и Родникового месторождений золота.

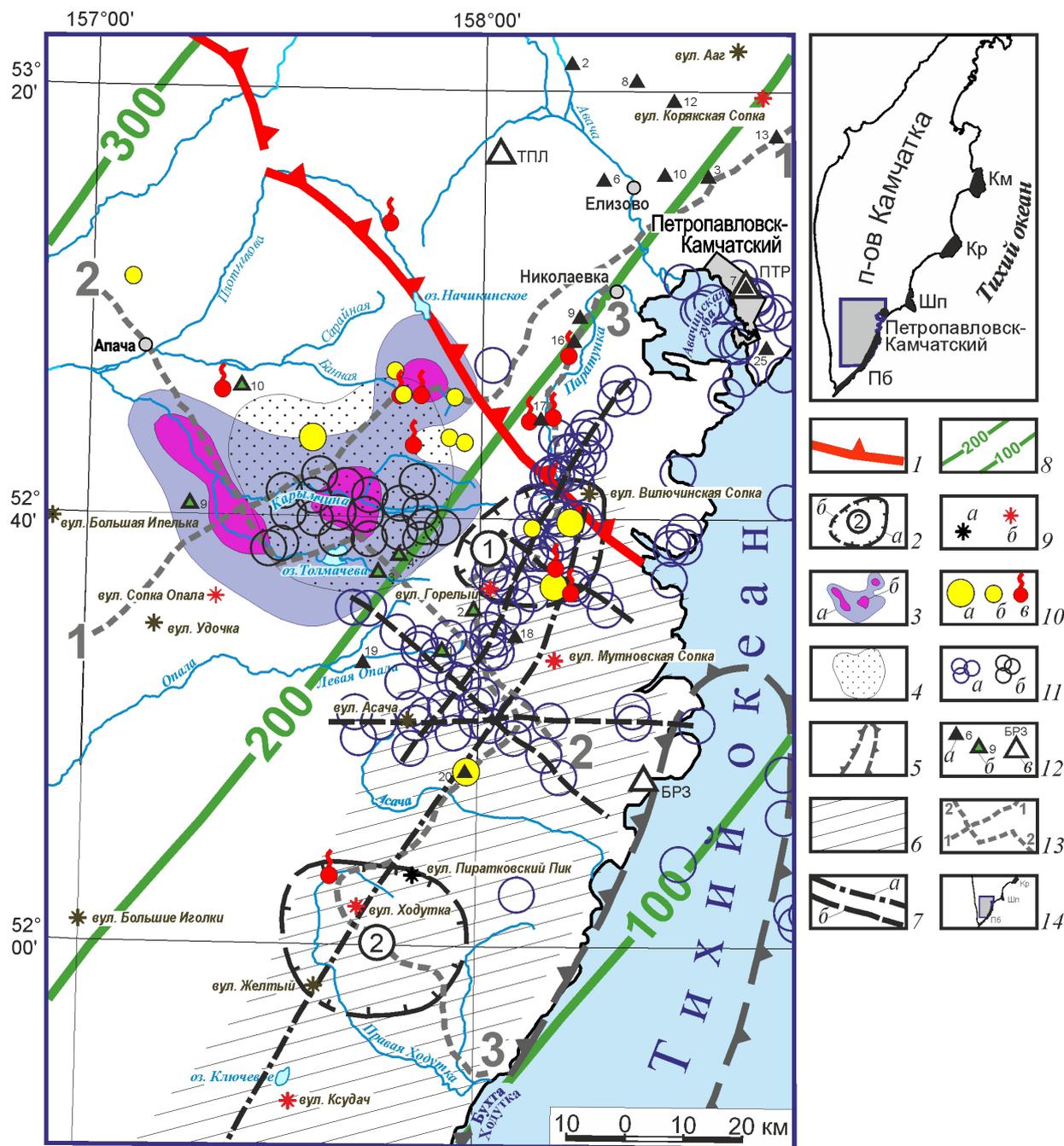
## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

К настоящему времени в исследуемом районе проведен широкий комплекс геолого-геофизических работ различного масштаба, обзор и анализ которых изложен в публикациях (Нурмухамедов, 2017; Nurmukhamedov, Sidorov, 2019a, 2019b). Профиль бух. Ходутка — с. Николаевка пересекает территорию, на которой ПГО «Камчатгеология» проведены гравиметрическая, аэромагнитная съемки масштаба 1:200 000, а на отдельных участках аэромагнитная съемка м-ба 1:50 000. На основе полученных данных построено несколько разномасштабных геологических карт на всю территорию Камчатки, в том числе, геологическая карта м-ба 1:1 500 000 (Геологическая..., 2005).

В 2007–2010 гг. предприятием ОАО «Камчатгеология» совместно с филиалом АО «ВНИИГеофизика» — Центр «ГЕОН» и ООО «Северо-Запад» был реализован комплекс глубинных исследований МОВЗ-МТЗ вдоль транскамчатского (1300 км) профиля, южным фрагментом которого является профиль бух. Ходутка — с. Николаевка<sup>2</sup> (рис. 1, 2). Его протяженность составляет ~170 км. Профиль в ССВ направлении пересекает районы золоторудных месторождений Родниковое, Мутновское, Асачинское, проходит восточнее рудопроявлений Карымшинского золоторудного узла (рис. 2). К настоящему времени добыча

<sup>2</sup> Нурмухамедов А.Г. Отчет о результатах работ по объекту «Разработка геолого-геофизической модели глубинного строения Корьякско-Камчатской складчатой области (Региональный узелочный профиль МОВЗ-МТЗ мыс Лопатка — с. Хаилино)». В 4-х книгах и 1-й папке. Книга 1. Петропавловск-Камчатский: ОАО «Камчатгеология», 2010. 274 с.

**Fig. 2.** Fragment of the tectonic scheme of the Koryak-Kamchatka folded area (based on materials (Nurmukhamedov, Sidorov, 2019a; 2019b) with simplifications and additions): 1 — Koryak-West-Kamchatka folded zone; 2 — East-Kamchatka subzone of the Olyutorsko-East-Kamchatka folded zone; 3 — Kuril-South-Kamchatka island-arc volcanic zone; 4 — Pre-Late Cretaceous metamorphic units; 5 — intrusive and subvolcanic bodies of predominantly medium and acidic composition; 6 — southwestern boundary of the Nachikinskaya zone of transverse dislocations; 7 — faults reaching the day surface (a) and buried (b); 8 — volcano-tectonic structures: Кр — Karymshinskaya, Пт — Plotnikovskaya, Ах — Akhomtenskaya, Ас — Asachinskaya; 9 — observed (a) and inferred (b) boundaries of crustal and mantle-crust electrical conductivity anomalies formed in the zone of Tolmachevsky active magmatic center (1), in the areas of Gorely, Mutnovsky and Vilyuchinsky volcanoes (2), Khodutka, Piratkovsky Peak and Zhelty volcanoes (3); 10 — contours of Goryachaya paleovolcano; 11 — extinct volcanoes (a), active volcanoes (b); 12 — deposits (a) and ore occurrences (b) of gold: 1 — Porozhistoe, 2 — Yagodka, 3 — Bannoe, 4 — Verkhne-Bystrinskoe, 5 — Geophysical, 6 — Karymshinskoe, 7 — Verkhne-Karymshinskoe, 8 — Rogatka and Bystrinskoe, 9 — Rodnikovoe, 10 — Mutnovskoe 11 — Gol'tsovskoe, 12 — Asachinskoe; 13 — sources, and fields of thermomineral waters; 14 — lines of geophysical MOVZ—MTZ profiles: Opala Mountain — Vakhil' River (1–1) and Apache Village — Mutnaya Bay (2–2); 15 — observation points on the Khodutka Bay — Nikolaevka Village profile: AMTZ, MTZ and GMTZ (a), combined points of MOVZ-MTZ (b) and their numbers; 16 — research area.



**Рис. 3.** Карта эпицентров местных землетрясений, зарегистрированных с 1981 по 1988 гг. с использованием аппаратуры «Черепаша» (по материалам<sup>3</sup> с дополнениями): 1 — юго-западная граница Начикинской зоны поперечных дислокаций; 2 — границы уверенные (а), предполагаемые (б) коровой и коромантийной аномалий электропроводности в районе вулканов Горельий, Вилючинская и Мутновская сопки (1) и вулканов Ходутка, Пиратковский Пик, Желтый (2); 3 — контуры зоны разуплотнения в переходном слое на глубине 40 км (а), участки максимального разуплотнения в интервале глубин 35–45 км (б) (Нурмухамедов, Сидоров, 2022); 4 — интрузивный массив диорит-гранитоидного состава; 5 — гравитационный максимум; б — зона высокоградиентного поля силы тяжести — район современного активного вулканизма; 7 — разрывные нарушения, выделенные по морфологии поля силы тяжести (а) и по данным сейсмологии (б); 8 — изолинии глубин (км) до сейсмофокальной зоны (Тараканов, 1987); 9 — вулканы потухшие (а) и действующие (б); 10 — месторождения (а) и рудопроявления (б) золота, источники и месторождения термоминеральных вод (б); 11 — эпицентры землетрясений (h = 0–40 км), зарегистрированных за периоды времени 1981–1985 гг. (а) и 1987–1988 гг. (б); 12 — пункты установки аппаратуры «Черепаша» (АСС-6/12) в 1981–1985 гг. (а), 1987–1988 гг. (б) и расположение стационарных сейсмических станций Института вулканологии ДВО АН СССР (б); 13 — линии геофизических профилей: г. Опала — р. Вахиль (1–1), п. Апача — бух. Мутная (2–2) и бух. Ходутка — с. Николаевка (3–3); 14 — площадь исследований, расположение террейнов и их обозначение: Км — Камчатский, Кр — Кроноцкий, Шп — Шипунский, Пб — Прибрежный.

золота осуществляется только на Асачинском месторождении, остальные находятся на различных стадиях геологического доизучения. Все упомянутые месторождения и рудопроявления относятся к золото-серебряной формации. Основная фаза рудной минерализации в Южно-Камчатском рудном районе, куда входят и указанные месторождения, приходится на плиоцен-раннеплейстоценовое время (Петренко, 1999).

С целью изучения на юго-востоке полуострова сейсмичности выполнены сейсмологические исследования<sup>3</sup> (рис. 3). Полученные результаты дают общее представление о геодинамических и магматических процессах в недрах Юго-Восточной Камчатки.

Исследуемый район является частью Восточно-Камчатской подзоны Олюторско-Восточно-Камчатской складчатой зоны. На севере профиль пересекает структуры НЗПД. Для зоны характерны разрывные нарушения северо-западного простирания. Центральная часть профиля проходит вдоль западной границы Прибрежного горста, а южный фрагмент профиля пересекает этот горст в юго-восточном направлении. Над горстом зафиксирована положительная аномалия поля силы тяжести (рис. 4), значительная часть которой расположена в акватории Тихого океана. Западная граница горста выражена в виде вытянутой в северо-северо-восточном направлении гравита-

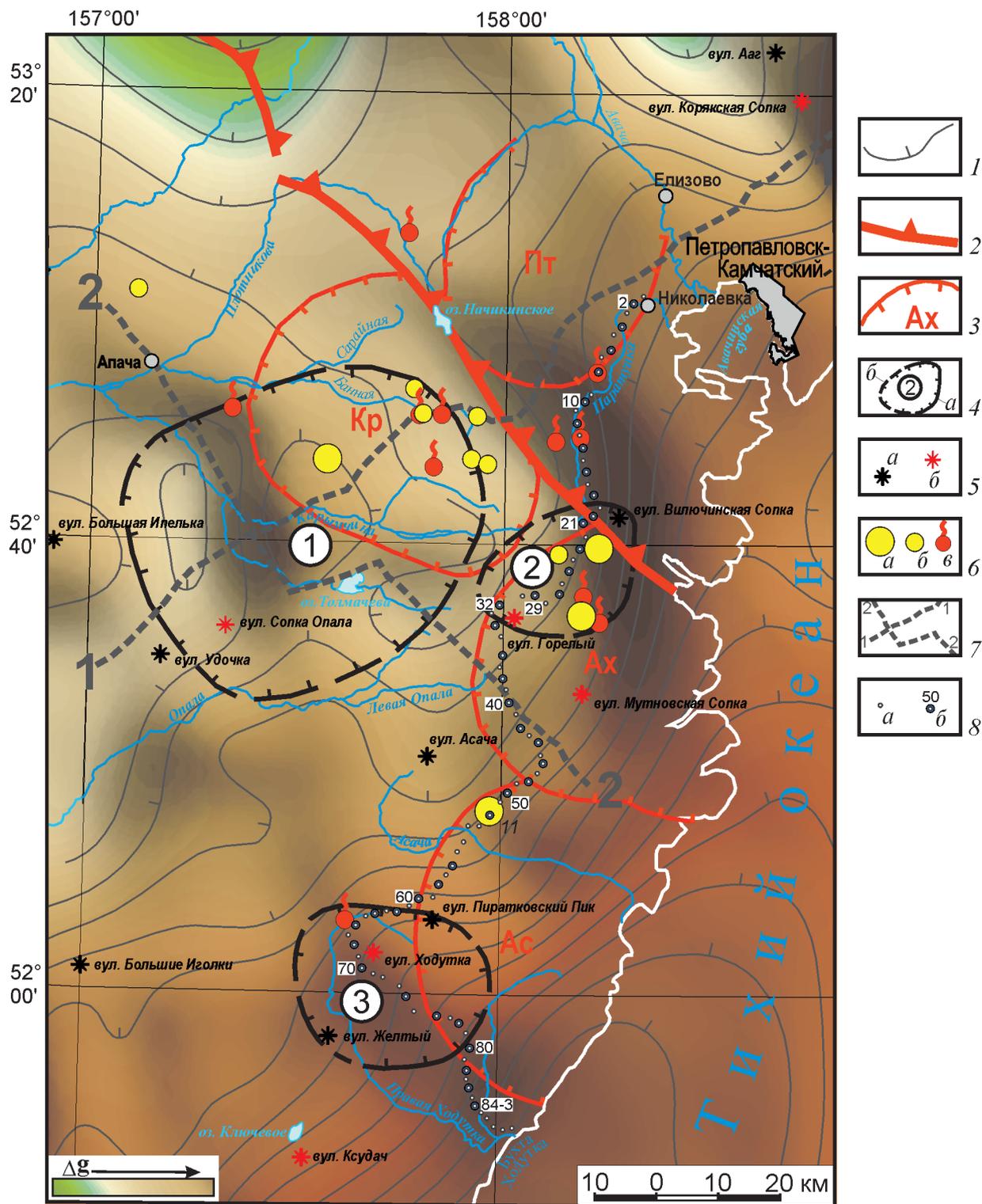
ционной ступени. В этом же месте расположен Мутновский разлом (рис. 2) такого же простирания, что и гравитационная ступень (рис. 4). Разлом перекрыт вулканогенно-осадочной толщей пород. В полосе ступени расположены действующие и потухшие вулканы, а также Ахонтенская и Асачинская ВТС.

Юго-восток Камчатки относится к регионам, где активно протекают современные геодинамические процессы. В верхнеплейстоцен-голоценовое время территория явилась участком мощного проявления ареального вулканизма. Результат вулканической деятельности представлен группами невысоких (до 100–300 м) шлаковых конусов преимущественно базальтового состава, распространенных от широты долины рек Паратунки и Карымчины на севере до мыса Лопатка на крайнем юге Камчатки (Важеевская, 1980). Площадь характеризуется знакопеременным магнитным полем ( $\Delta T$ )<sub>a</sub> с мозаичным расположением высокоградиентных локальных аномалий (рис. 5), что типично для зон ареального вулканизма. На северо-востоке площади распространение таких участков ограничено Южно-Быстринским блоком (Апрелков, Ольшанская, 1989) Начикинской зоны поперечных дислокаций, где интенсивное положительное магнитное поле ( $\Delta T$ )<sub>a</sub> характеризуется северо-западной ориентацией аномалий.

Необходимо отметить, что наиболее позднее проявление ареального вулканизма (поздний голоцен) отмечено в районе Толмачёва дола (Важеевская, 1980) — в районе одноименных озера и реки (рис. 3). Здесь, на участке пересечения профилей г. Опала — р. Вахиль и п. Апача — бух. Мутная, по геофизическим данным выделен переходный слой мощностью 10 км, который расположен между земной корой и верхней мантией (Нурмухамедов и др., 2016, 2020; Nurmukhamedov, Sidorov, 2019a, 2019b). Но результаты плотностного 3D-моделирования (Нурмухамедов, Сидоров, 2022) убедительно

<sup>3</sup> Пак Г., Смирнов В.С., Апрельков С.Е. Результаты геофизических исследований на Петропавловск-Шипунском прогностическом полигоне и региональном геофизическом профиле бух. Мутная — п. Апача. Отчёт Камчатской Комплексной Геофизической Партии региональных исследований, проведенных на Южной Камчатке по программе прогноза землетрясений и извержений вулканов в 1987-1989 годах. Листы N-57-XIX-XXII; N-57-XXV-XXVII; N-57-XXXI-XXXIII. Елизово: ЕГФЭ ПГО «Камчатгеология», 1989. 236 с.

**Fig. 3.** Map of local earthquake epicenters recorded from 1981 to 1988 using «Tcherepakha» («Turtle») seismic stations — ASS 6/12 (based on materials<sup>3</sup> with additions): 1 — southwestern boundary of Nachikinskaya zone of transverse dislocations; 2 — observed (a) and assumed (b) boundaries of crustal and crust-mantle anomalies of the electrical conductivity in the areas of Gorely, Mutnovskaya Sopka, and Vilyuchinskaya Sopka volcanoes (1), Khodutka, Piratkovsky Peak, and Zhelty volcanoes (2); 3 — contours of the decompaction zone in the transition layer at a depth of 40 km (a), areas of maximum decompaction in the depth interval of 35–45 km (b) (Nurmukhamedov, Sidorov, 2022); 4 — intrusive massif of diorite-granitoid composition; 5 — gravitational maximum; 6 — zone of high-gradient gravity field — area of modern active volcanism; 7 — discontinuities identified by the morphology of the gravity field (a) and seismological data (b); 8 — isolines of depths (km) to the seismic focal zone (Tarakanov, 1987); 9 — extinct (a) and active (b) volcanoes; 10 — deposits (a) and ore occurrences (b) of gold, sources and deposits of thermal mineral waters (b); 11 — epicenters of earthquakes (h = 0–40 km) registered for time periods 1981–1985 (a) and 1987–1988 (b); 12 — points of installation of «Turtle» (ACC-6/12) equipment in 1981–1985 (a), 1987–1988 (b) and location of stationary seismic stations of the Institute of Volcanology, Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences (b); 13 — lines of the ECWM-MTS profiles: Opala Mountain — Vakhil' River (1–1), Apache Village — Mutnaya Bay (2–2), Khodutka Bay — Nikolaevka Village (3–3); 14 — study area, location of terranes and their designation: Км — Kamchatsky, Кр — Kronotsky, Шп — Shipunsky, Пб — Pribrezhny.



**Рис. 4.** Морфология аномалий силы тяжести в юго—восточной части Камчатки (в качестве цветной подложки на схеме использовано теневое изображение поля силы тяжести): 1 — изоаномалы силы тяжести (бергштрихи направлены в сторону уменьшения интенсивности поля); 2 — граница Начикинской зоны поперечных дислокаций; 3 — вулcano-тектонические структуры: Кр — Карымшинская, Пт — Плотниковская, Ах — Ахомтенская, Ас — Асачинская; 4 — границы уверенные (а), предполагаемые (б) коровых и коровомантийных аномалий электропроводности в зоне Толмачевского активного магматического центра (1), в районе вулканов: Горелый, Мутновская Сопка, Вилючинская Сопка (2), вулканов: Ходутка, Пиратковский Пик и Желтый (3); 5 — вулканы потухшие (а) и действующие (б); 6 — месторождения (а) и рудопроявления (б) золота, источники и месторождения термоминеральных вод (в); 7 — линии геофизических профилей МОВЗ-МТЗ: г. Опала — р. Вахиль (1-1) и п. Апача — бух. Мутная (2-2); 8 — точки наблюдений на профиле бух. Ходутка — с. Николаевка: АМТЗ, МТЗ и ГМТЗ (а), совмещенные точки МОВЗ-МТЗ (б) и их номера.

показывают, что указанный слой заключен между границей Мохоровичича краевой части континентальной литосферы и кровлей, субдущей в прошлом океанической литосферы (кровлей палеосубдукции). По отношению к океанической литосфере, плотность которой составляет  $3.2\text{--}3.3\text{ г/см}^3$ , переходный слой характеризуется пониженной плотностью:  $\leq 3.14\text{ г/см}^3$ . В самом слое в интервале глубин  $\sim 35\text{--}45\text{ км}$  выделяются локальные участки максимального разуплотнения ( $\leq 2.8\text{--}3.0\text{ г/см}^3$ ), которые авторами (Нурмухамедов, Сидоров, 2022) отождествляются с очагами плавления (рис. 3). Указанный слой характеризуется высокой проницаемостью и, как следствие, наличием аномального теплового потока (ТП). По одним данным (Смирнов, Сугробов, 1980) мощность ТП в отдельных точках достигает  $126\text{--}167\text{ мВт/м}^2$  на фоне  $67\text{--}84\text{ мВт/м}^2$  «фоновое теплового потока», по другим (Красный, 1987) измеренный ТП в пределах этой же территории составляет  $140\text{ мВт/м}^2$ . Как видим, независимые оценки ТП весьма близки.

По некоторым оценкам (Нурмухамедов, 2017) проницаемая зона формировалась на протяжении длительного периода времени — вероятно, с позднего палеогена. Очаги плавления являются источниками магмы, подъем которой привел к образованию в земной коре блока, насыщенного интрузиями основного и ультраосновного состава (Сидоров, Нурмухамедов, 2022). Под влиянием тепловых потоков и дифференциации поступающей магмы, в интервале глубин от  $8\text{--}10$  до  $30\text{ км}$ , образовался интрузивный массив преимущественно диорит-гранитоидного состава (Нурмухамедов, Сидоров, 2022) (рис. 3). От массива отходят апофизы в верхние слои земной коры, часть из которых обнажается на дневной поверхности. Район характеризуется наличием замкнутых гидротермальных систем с участием постмагматических растворов. Этим объясняется образование месторождения и рудопроявлений золота Карымшинского рудного узла (Нурмухамедов и др., 2020).

Вследствие взаимодействия океанической литосферной плиты с нависающей континентальной сформирована зона сейсмической активности — сейсмофокальная зона (СФЗ). На исследуемой территории СФЗ погружается от  $100\text{ км}$  на юго-востоке площади до  $300\text{ км}$  на северо-западе (Тараканов, 1987). Профиль бух. Ходутка — с. Николаевка проходит по участку, где глубина до СФЗ составляет  $100\text{--}200\text{ км}$  (рис. 3). Часть сейсмических событий находится на относительно малых глубинах — от первых до нескольких десятков километров — и к фокальной зоне не относится. Так, в  $1987\text{--}1988\text{ гг.}$  в районе ТАМЦ, в южном обрамлении интрузивного массива, зафиксирован рой слабых ( $M \leq 5$ ) землетрясений<sup>3</sup> (рис. 3), получивший название Толмачевской эпицентральной зоны (ТЭЗ). Рой совпадает с участком максимальной концентрации шлаковых конусов. Проявление сейсмической активности объясняется продвижением магмы по ослабленной зоне — по-периодически «оживающей» (Зобин, 1979) эруптивной трещине субширотного простирания (Нурмухамедов и др., 2020; Nurmukhamedov, Sidorov, 2019б). Землетрясения отнесены к землетрясениям I-го типа (вулканотектонические землетрясения), которые непосредственно с извержением вулканов не связаны (Чубарова, 2006).

В результате сейсмологических исследований, выполненных в  $1981\text{--}1985\text{ гг.}$ <sup>3</sup>, зарегистрирована линейно вытянутая область (рис. 3) высокой сейсмической активности, которая в плане совпадает с гравитационной ступенью (рис. 4). В самой области выделяются участки, где отмечается сгущение эпицентров. Значительная часть землетрясений здесь также отнесена к I-ому типу, природа которых обусловлена глубинными магматическими процессами<sup>3</sup>. Сейсмоактивная область практически совпадает с осью зоны повышенной сейсмичности (ОЗПС), выделенной<sup>1</sup> по материалам обновляемого каталога землетрясений, размещенного на сайте <http://www.emsd.ru/ts/>. ОЗПС уверенно прослеживается в юго-юго-западном направлении, вплоть до мыса Камбального на юге Камчатки.

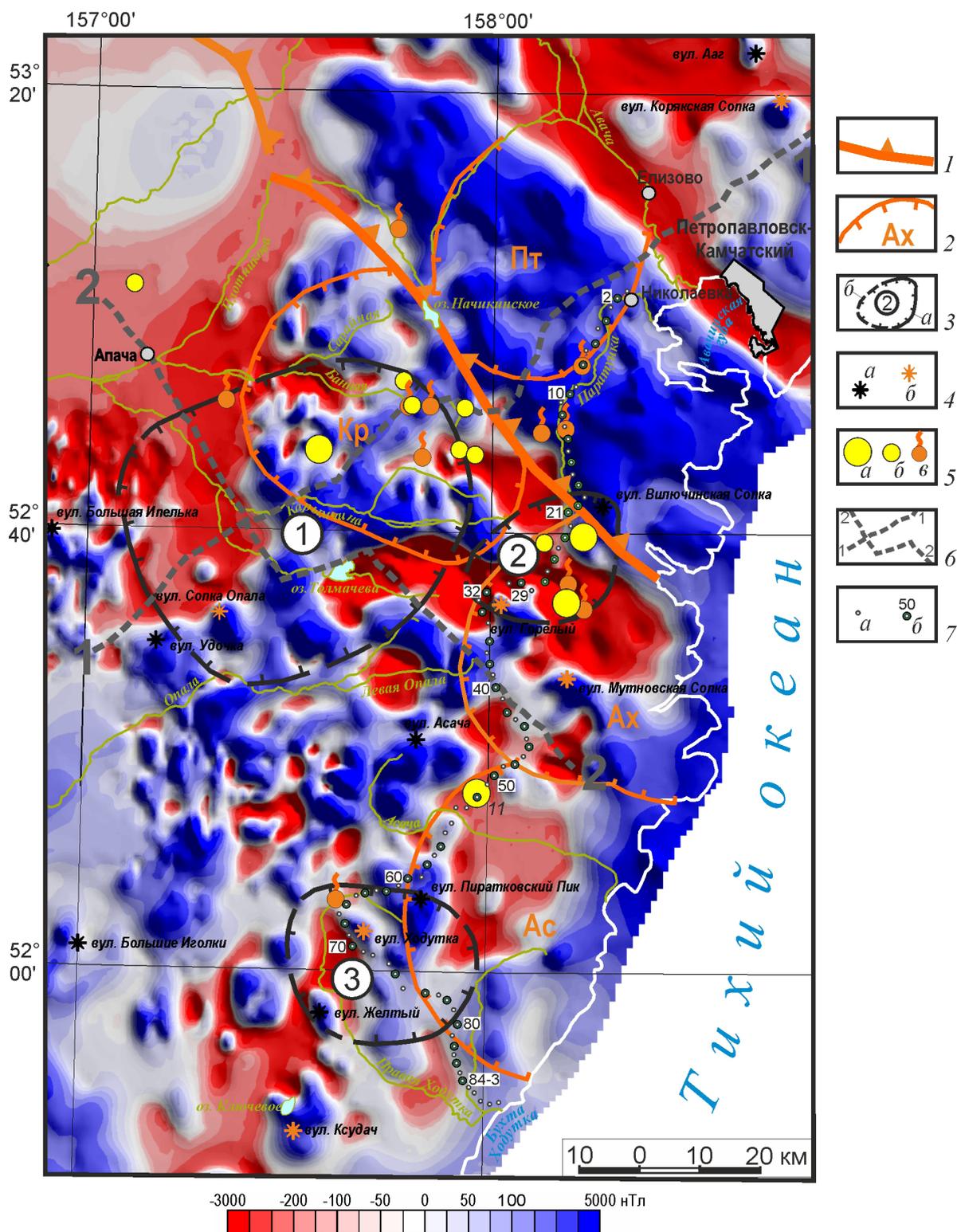
В результате сейсмологических исследований, выполненных в  $1981\text{--}1985\text{ гг.}$ <sup>3</sup>, зарегистрирована линейно вытянутая область (рис. 3) высокой сейсмической активности, которая в плане совпадает с гравитационной ступенью (рис. 4). В самой области выделяются участки, где отмечается сгущение эпицентров. Значительная часть землетрясений здесь также отнесена к I-ому типу, природа которых обусловлена глубинными магматическими процессами<sup>3</sup>. Сейсмоактивная область практически совпадает с осью зоны повышенной сейсмичности (ОЗПС), выделенной<sup>1</sup> по материалам обновляемого каталога землетрясений, размещенного на сайте <http://www.emsd.ru/ts/>. ОЗПС уверенно прослеживается в юго-юго-западном направлении, вплоть до мыса Камбального на юге Камчатки.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Глубинные исследования МОВЗ реализованы по стандартной методике (Померанцева, Мозженко, 1977). На каждой точке МОВЗ

←

**Fig. 4.** Morphology of gravity anomalies in the southeastern part of Kamchatka (the shadow image of a gravity field is used as a color substrate): 1 — gravity isoanomalies (bergstrokes are directed towards decreasing field intensity); 2 — boundary of Nachikinskaya zone of transverse dislocations; 3 — volcano—tectonic structures: Кр — Karymshinskaya, Пт — Plotnikovskaya, Ах — Akhomtenskaya, Ас — Asachinskaya; 4 — observed (a) and inferred (b) boundaries of crustal and crust—mantle electrical conductivity anomalies in the zone of Tolmachevsky active magmatic center (1), in the areas of the Gorely, Mutnovskaya Sopka, Vilyuchinskaya Sopka volcanoes (2), Khodutka, Piratkovsky Peak, and Zhelty volcanoes (3); 5 — extinct volcanoes (a), active volcanoes (b); 6 — deposits (a) and ore occurrences (b) of gold, sources and thermomineral water fields (e); 7 — ECWM-MTS geophysical profiles: Opala Mountain — Vakhil' River (1–1), Apache Village — Mutnaya Bay (2–2); 8 — observation points on the profile Khodutka Bay — Nikolaevka Village: AMTZ, MTZ and GMTZ (a), combined MOVZ—MTZ points (b) and their numbers.



**Рис. 5.** Морфология магнитного поля ( $\Delta T_a$ ) в юго-восточной части Камчатки (в качестве цветной подложки на схеме использовано теневое изображение аномального магнитного поля): 1 — граница Начикинской зоны поперечных дислокаций; 2 — вулcano-тектонические структуры: Кр — Карымшинская, Пт — Плотниковская, Ах — Ахомтенская, Ас — Асачинская; 3 — границы уверенные (а), предполагаемые (б) коровых и коровомантийных аномалий электропроводности в зоне Толмачевской активной магматической центра (1), в районе вулканов Горелый, Мутновская и Вилючинская сопки (2); вулканов Ходутка, Пиратковский Пик и Желтый (3); 4 — вулканы потухшие (а) и действующие (б); 5 — месторождения (а) и рудопроявления (б) золота, источники и месторождения термоминеральных вод (б); 6 — линии геофизических профилей МОВЗ-МТЗ: г. Опала — р. Вахиль (1-1) и п. Апача — бух. Мутная (2-2); 7 — точки наблюдений на профиле бух. Ходутка — с. Николаевка: АМТЗ, МТЗ и ГМТЗ (а), совмещенные точки МОВЗ-МТЗ (б) и их номера.

(рис. 2, 4, 5) осуществлялась трехкомпонентная регистрация сейсмических волн. Расстояние между точками в среднем составляет 4 км. Регистрация сейсмических событий реализована в режиме «по обнаружению». Продолжительность одной стоянки составляла не менее 30 суток, что обеспечило кондиционный набор данных, необходимых для выделения границ обмена. Методика полевых наблюдений и интерпретации данных MOVZ приведены в работе (Нурмухамедов и др., 2016).

Электроразведочные работы проводились в трёх модификациях: АМТЗ (аудио МТ-зондирование), МТЗ и ГМТЗ (глубинное МТ-зондирование). Методика полевых наблюдений подробно изложена в работе (Нурмухамедов и др., 2018).

Комплексный анализ тензора импеданса показывает, что МТ-данные до периода 1 с практически на всем профиле отвечают 1D-модели (в горизонтально-слоистой среде). На больших периодах (с 1 с на отдельных участках и с 10 с по всему профилю) МТ-данные соответствуют неоднородной среде. При этом неоднородности в основном носят двумерный (2D) характер. Они проявляются в виде расхождений ТЕ и ТМ кривых и отражают влияние регионального индукционного эффекта, формируемого в акватории Тихого океана (Мороз, Мороз, 2011). Слабое влияние 3D-неоднородностей прослеживается практически на всем профиле на периодах больше 100 с, а на отдельных участках — на меньших периодах (1–30 с).

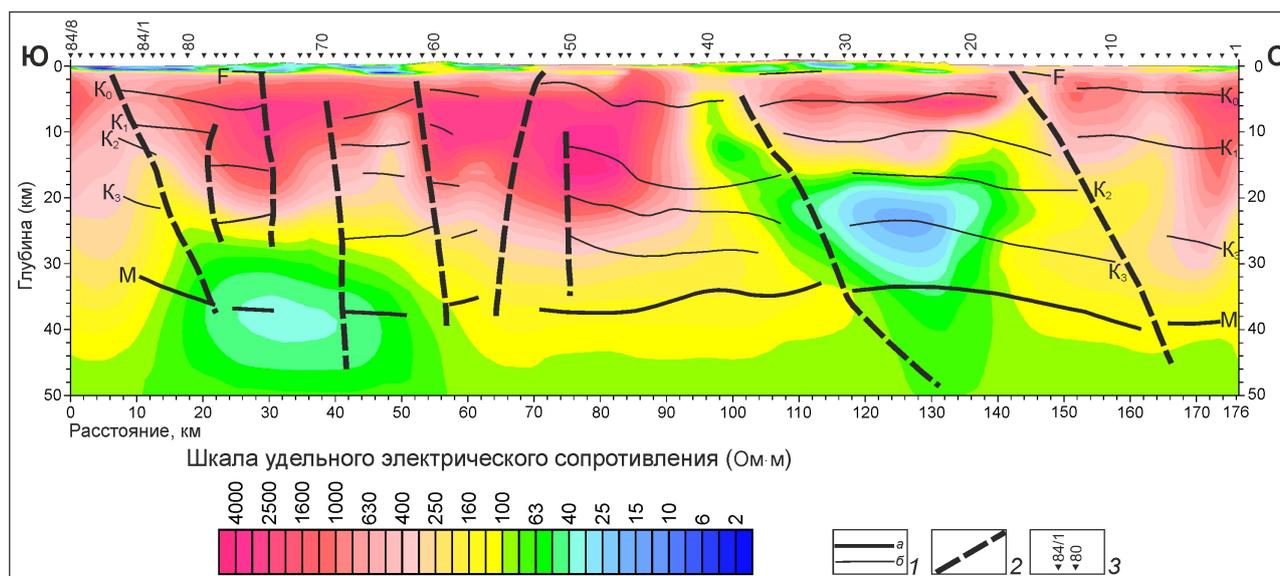
Анализ полученных материалов показывает, что возможна 2D-инверсия МТ-данных, но с учетом влияния 3D-неоднородностей. Для этого была рассчитана 3D-геоэлектрическая модель для всей территории Корьякско-Камчатской складчатой области<sup>2</sup>, где ее строение представлено набором геоэлектрических блоков с постоянным значением сопротивления. Комбинация блоков (элементов модели) аппроксимирует различные геологические структуры — осадочные бассейны, впадины, зоны разломов, глубинные проводящие структуры и т.д. Детальное описание методики 3D-моделирования представлено в работах (Белявский, Алексанова, 2014; Белявский, Яковлев, 2016).

Для построения итоговой геоэлектрической модели производилась бимодальная 2D-инверсия нормализованных кривых, отвечающих регионально-продольному (ТЕ) и регионально-поперечному (ТМ) направлению по программе (Rodi, Mackie, 2001). В целом, методика построения двумерной геоэлектрической модели близка к методике, изложенной в статье (Нурмухамедов и др., 2018). Стартовая модель создавалась на основе результатов 1D- и 3D-инверсии МТ-данных. В верхней части разреза, где данные отвечают 1D-модели, сопротивление задавалось по результатам 1D-инверсии, в нижней — по результатам 3D-моделирования (сечение 3D-модели вдоль линии профиля), что позволило учесть влияние трехмерных неоднородностей. Примененная методика дала возможность получить наиболее достоверную геоэлектрическую модель вдоль профиля бух. Ходутка — с. Николаевка (рис. 6).

Кроме представленной геоэлектрической модели, по тем же исходным данным, но по другой интерпретационной схеме нашими коллегами был построен глубинный геоэлектрический разрез (Мороз, Самойлова, 2013) с использованием 1D-инверсии кривых ТЕ-моды. Несмотря на качественную сходимость, в указанных моделях заметны различия. Так, например, отличаются конфигурация и глубина залегания высокоомных и аномально низкоомных объектов. Особенно это заметно по глубине залегания наиболее низкоомной части коромантийного проводника в южной половине модели, где по данным статьи (Мороз, Самойлова, 2013) она составляет 40–55 км, а в геоэлектрической модели (рис. 6) 32–45 км. В северной части разреза (Мороз, Самойлова, 2013) не зафиксированы ответвления от корового объекта высокой проводимости, что хорошо просматривается в геоэлектрической модели на рис. 6. По мнению авторов настоящей статьи, эти различия могли возникнуть из-за отсутствия учета трехмерности геоэлектрической среды в средней и нижней частях разреза при проведении 1D-инверсии кривых МТЗ.

Для изучения распределения плотности пород в земной коре и верхней мантии выполнено

←  
**Fig. 5.** Morphology of the magnetic field ( $\Delta T$ )*a* in the southeastern part of Kamchatka (the shadow image of the anomalous magnetic field is used as a colored substrate in the scheme): 1 — boundary of Nachikinskaya zone of transverse dislocations; 2 — volcano-tectonic structures: Кр — Karymshinskaya, Пт — Plotnikovskaya, Ах — Akhomtenskaya, Ас — Asachinskaya; 3 — observed (*a*), and inferred boundaries of crust–mantle anomalies of the electrical conductivity formed in the zone of Tolmachevsky active magmatic center (1), in the areas of Gorely, Mutnovsky, and Vilyuchinsky Sopka volcanoes (2), Khodutka, Piratkovsky Peak, and Zhelty volcanoes (3); 4 — extinct volcanoes (*a*), active volcanoes (*b*); 5 — deposits (*a*) and ore occurrences (*b*) of gold, sources and thermomineral water fields (*b*); 6 — ECWM–MTS geophysical profiles: Opala Mountain — Vakhil' River (1–1) and Apache Village — Mutnaya Bay (2–2); 7 — observation points on the profile Khodutka Bay — Nikolaevka Village: AMTZ, MTZ and GMTZ (*a*), combined MOVZ–MTZ points (*b*) and their numbers.



**Рис. 6.** Двумерная геоэлектрическая модель вдоль профиля бух. Ходутка — с. Николаевка: 1 — сейсмические границы по данным МОВЗ: граница Мохоровичича (а), другие сейсмические границы (б); 2 — разрывные нарушения по данным МОВЗ; 3 — точки МТЗ и их номера. Положение профиля приведено на рис. 1.

**Fig. 6.** Two-dimensional geoelectrical model along the profile of the Khodutka Bay — Nikolaevka Village: 1 — seismic boundaries identified by ECWM data: Mohorovicic discontinuity (a), other boundaries (b); 2 — faults identified by ECWM; 3 — MTS points and their numbers. The position of the profile is shown in Fig. 1.

двумерное плотностное моделирование (рис. 7) с использованием материалов гравиметрической съемки масштаба 1:200 000, по методике, описанной в работе (Сидоров, Нурмухамедов, 2022). Начальным каркасом модели послужили границы и разломы, выделенные МОВЗ (Нурмухамедов и др., 2016). Исходные значения плотности верхних слоев разреза определены по образцам горных пород, обнаженных на дневной поверхности. Для глубинных слоев значения плотности взяты из опубликованных источников. Так, для верхнемеловых отложений принята плотность 2.67 г/см<sup>3</sup>, для гранито-метаморфического («гранитного») слоя 2.64–2.8 г/см<sup>3</sup>, для гранулитобазитового («базальтового») слоя — 2.80–3.07 г/см<sup>3</sup> и для верхней мантии 3.30 г/см<sup>3</sup>. Указанные плотности взяты в качестве первичных данных для итерационного подбора модели. Расчеты проведены с помощью пакета программ Geosoft Inc. (GMSYS, Oasis Montaj, Grav/Mag Interpretation, 3D Euler, MAGMAP filtering).

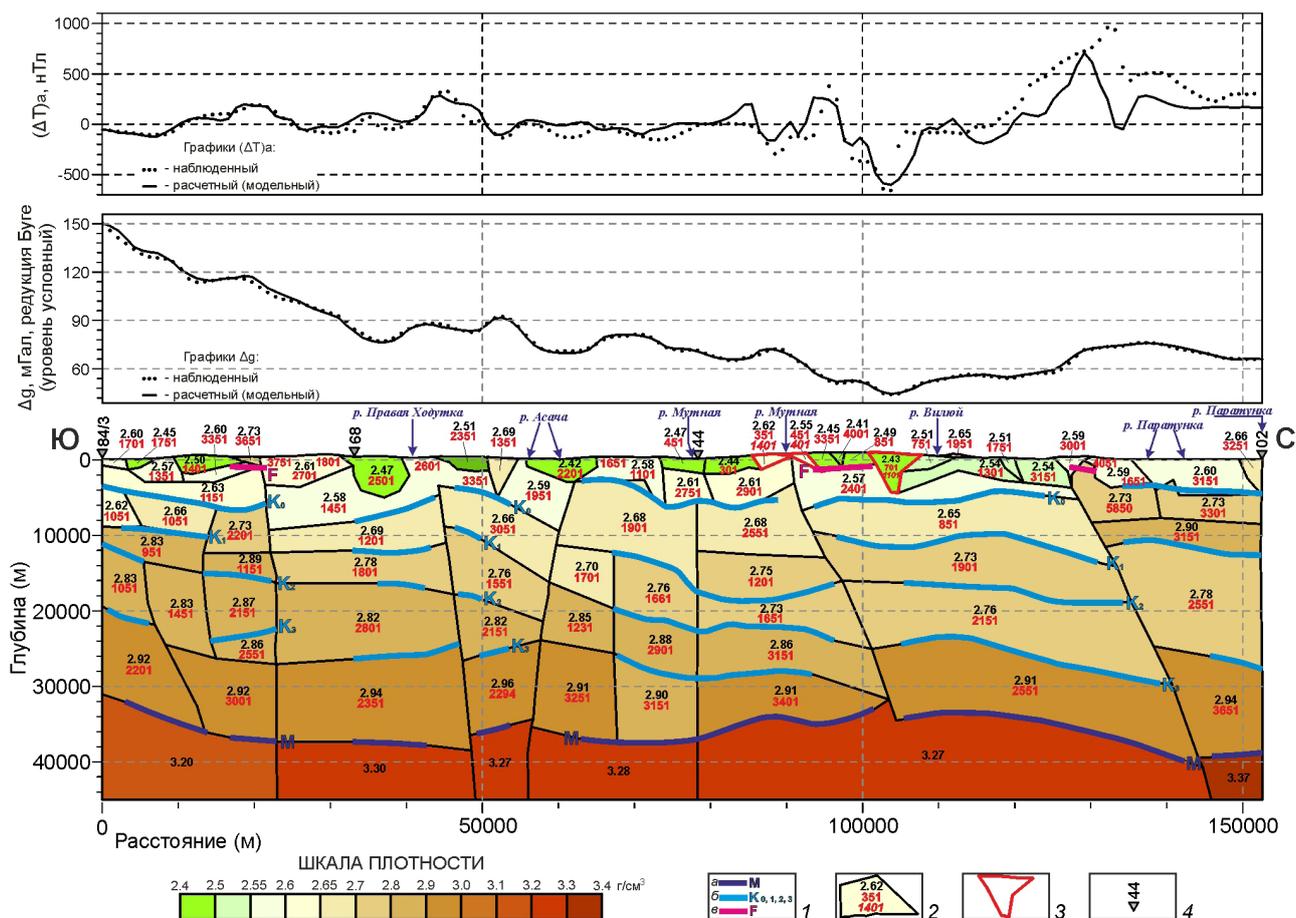
Кроме этого, авторами также выполнено магнитное 2D-моделирование (рис. 7). В качестве опорных данных использованы материалы аэромагнитной съемки масштаба 1:200 000<sup>4</sup>. Моделирование проведено при неизменной геометрии

<sup>4</sup> Сидоров М.Д. Отчёт о работах по созданию дистанционной, геохимической и геофизической основ Госгеолкарты-1000 3-го поколения листов N-(56), 57, (58); M-57 (опережающий этап) в 3-х книгах. Книга 2. Геофизическая основа. П-Камчатский: КПСЭ, 2001. 150 с.

выделенных элементов в плотностном разрезе. В результате определены эффективные магнитные параметры для блоков плотностной модели. На отрезке профиля между реками Мутная и Вилюча в верхней части разреза вектор остаточной намагниченности направлен в верхнее полупространство, и его величина превышает индуктивный. Здесь профиль пересекает толщу игнимбритов. Для этих пород, такое соотношение магнитных векторов отмечалось ранее при петрофизических исследованиях, сопутствующих геологической съемке в Срединном хребте и на перешейке п-ва Камчатка. В остальных частях разреза суммарный вектор направлен в нижнее полупространство.

Сейсмологические исследования (рис. 3), реализованы с комплектами аппаратуры «Черепаша», в которые входят сейсмоприемники СК-1П и регистраторы АСС-6/12. В обработке использовались записи местных землетрясений. Определение эпицентров, гипоцентров и других параметров сейсмических событий осуществлялось по методикам, изложенным в работе (Померанцева, Мозженко, 1977). Обработка полученных данных состояла из обработки землетрясений энергетического класса  $K \leq 7$  и  $K \geq 7$ . Обработка слабых землетрясений ( $K \leq 7$ ) осуществлялась по записям станций «Черепаша». Обработка землетрясений с  $K \geq 7$  выполнена<sup>3</sup> с привлечением базы данных Института вулканологии ДВО АН СССР, полученных региональной сетью сейсмических станций. В результате

## СТРОЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ



**Рис. 7.** Плотностная модель вдоль профиля бух. Ходутка — с. Николаевка: 1 — сейсмические границы по данным МОВЗ (*a* — граница Мохоровичича; *б, в* — другие границы, выделенные в земной коре); 2 — границы блоков и (сверху вниз) средние для них значения плотности ( $\text{г/см}^3$ ), магнитной восприимчивости ( $1.26 \cdot 10^{-3} \text{СИ}$ ) и остаточной намагниченности ( $10^{-3} \text{А/м}$ ); 3 — блоки модели, в которых вектор остаточной намагниченности направлен в верхнее полупространство; 4 — пункты МОВЗ и их номера. Положение профиля приведено на рис. 1.

**Fig. 7.** Dnsity model along the Khodutka Bay — Nikolaevka Village profile: 1 — seismic boundaries identified by ECWM data ( Mohorovicic discontinuity (*a*), other seismic boundaries identified in the Earth's crust (*б, в*)); 2 — block boundaries and (from top to bottom) their average density values ( $\text{g/cm}^3$ ), magnetic susceptibility ( $1.26 \cdot 10^{-3} \text{SI}$ ) and remanent magnetization ( $10^{-3} \text{A/m}$ ); 3 — model blocks in which the remanent magnetization vector is directed to the upper half-space; 4 — ECWM points and their numbers. The position of the profile is shown in Fig. 1.

обработки данных местной эпицентрии составлен каталог землетрясений и построена карта эпицентров местных землетрясений<sup>3</sup>, фрагмент которой представлен на рис. 3.

Авторами настоящей статьи построена глубинная геолого-геофизическая модель вдоль профиля бух. Ходутка — с. Николаевка (рис. 8). При ее создании каркасом послужили коровые и коромантийные разрывные нарушения, а также границы литосферы, выделенные по данным МОВЗ. Выявленные сейсмические границы прерывисты, что особенно заметно в южной половине модели, где картину глубинного строения дополняют результаты плотностного моделирования: непродолженные по МОВЗ границы, продолжены в виде границ слоев и блоков с различной плотностью.

В мезокайнозойской толще, в зоне активной гидротермальной деятельности, находятся участки гидротермально измененных пород. Всю толщу пород пронизывают коровые и коромантийные разломы, делящие кору и верхнюю мантию на отдельные блоки. В модель вынесены anomalно низкоомные участки ( $15\text{--}40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  на фоне  $150\text{--}2000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ), интерпретируемые как коромантийный и нижнекоровый магматические очаги — предполагаемые области питания действующих вулканов. В модели обозначены границы основных геологических структур, пересекаемых профилем, вынесены проекции близко расположенных к профилю вулканов, рудопроявлений и месторождений золота, а также источники термоминеральных вод.



АНАЛИЗ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ  
МОДЕЛИ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже отмечено, Камчатка расположена на активной окраине континента в результате субдукции океанической литосферы под континентальную плиту и коллизии. Вдоль восточного побережья Камчатки выделяется область террейнов восточных полуостровов (рис. 3). Геологическое описание и палеогеодинамические реконструкции приращения островодужных блоков к континентальному склону Восточной Камчатки изложены в ряде публикаций (Мишин, 1996, 1997; Селиверстов, 2009; Шапиро, Соловьев, 2009 и др.). Так, по Н.И. Селиверстову (2009) островодужные блоки Шипунский (Авачинский — по Н.И. Селиверстову) и Кроноцкий

вошли в состав аккреционного комплекса Восточной Камчатки в позднем миоцене, а самый северный, Камчатский, — в конце плиоцена. У авторов настоящей статьи вызывает интерес расположенный на крайнем юго-востоке Камчатки Прибрежный террейн (рис. 3), ранее выделенный исключительно по специфической морфологии гравитационного поля (Мишин, 1996, 1997). Характерной особенностью северных террейнов является наличие выходов пород основного и ультраосновного состава (Апрелков, Олышанская, 1989), но в зоне предполагаемого Прибрежного террейна такие породы не обнажаются. Объяснить это можно тем, что район с поверхности перекрыт четвертичной и среднеэоцен-плиоценовой вулканогенно-осадочной толщей пород (Геологическая..., 2005).

**Рис. 8.** Глубинная геолого-геофизическая модель вдоль профиля бух. Ходутка — с. Николаевка. Названия и границы геологических структур над моделью приведены в соответствии с Тектонической схемой, представленной на рис. 2. Положение профиля приведено на рис. 1. 1 — кровля верхнемелового комплекса пород, по данным МТЗ (а); границы, выделенные по данным МОВЗ: уверенные (б), предполагаемые (в), отождествляемые с кровлей верхнемелового комплекса пород (F), кровлей консолидированной коры ( $K_0$ ), границей между верхней и нижней корой ( $K_2$ ), границей Мохоровичича (M), прочими границами в земной коре ( $K_1$ ,  $K_3$ ); 2 — разрывные нарушения, выделенные по данным МОВЗ (а) и сдвиговые дислокации вдоль них (б); 3 — разрывные нарушения, выделенные: а) по данным МОВЗ, но не подтвержденные плотностным моделированием, б) по результатам плотностного моделирования; 4 — кайнозойский вулканогенно-осадочный комплекс пород; 5 — мезозойский комплекс пород; б — гидротермально измененный мезокайнозойский комплекс пород; 7 — верхний слой метаморфических комплексов преимущественно в зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фациях; 8 — гранито-метаморфический («гранитный») слой верхней коры; 9 — гранулит-базитовый («базальтовый») слой нижней коры; 10 — верхняя мантия; 11 — коромантийный очаг (а) и предполагаемые пути (б) распространения магмы и магматического флюида; 12 — нижнекоровый очаг (а), канал подъема магмы — магмовод (б), промежуточный магматический очаг (в); 13 — области пониженных значений удельного электрического сопротивления (50–100 Ом·м на фоне 200–1000 Ом·м); 14 — зоны относительного понижения скорости продольной (а) и поперечной (б) волн (Гонтовая и др., 2010); 15 — вулканическая депрессия (а) под вулканом Ходутка, предполагаемые периферический очаг (б) и подводящий к нему канал (в); 16 — блок земной коры, насыщенный интрузиями основного и ультраосновного состава (а), интрузивный массив сложного состава — от габбро-габбродиоритов до диоритов-гранодиоритов (б), интрузии гранитов-гранодиоритов (в); 17 — игнимбриты кислого состава, характеризующиеся обратной намагниченностью; 18 — проекции ближайших к профилю действующих (а) и потухших (б) вулканов, и их названия; 19 — месторождения (а) и рудопоявления (б) золота, источники и месторождения термоминеральных вод (в); 20 — точки наблюдений МОВЗ-МТЗ и их номера.

**Fig. 8.** Geologic-geophysical model along the Khodutka Bay — Nikolayevka Village profile. The names and boundaries of geological structures above the model are given according to Fig. 2. The position of the profile is shown in Fig. 1. 1 — roof of the Upper Cretaceous units by MTS data (a); boundaries identified by ECWM: observed (b), inferred (v), identified with the roof of the Upper Cretaceous rock units (F), upper boundary of consolidated crust ( $K_0$ ), interface between the upper and lower crust ( $K_2$ ), Mohorovicic discontinuity (M), other seismic boundaries within the Earth's crust ( $K_1$ ,  $K_3$ ); 2 — faults according to ECWM data (a) and shear dislocations along them (b); 3 — faults identified: a) according to the ECWM data, but not confirmed by density modeling, b) according to the density modeling results; 4 — Cenozoic volcanogenic-sedimentary rocks; 5 — Mesozoic rocks; б — hydrothermally altered Mesozoic-Cenozoic rocks; 7 — upper layer of metamorphic rocks of predominantly greenschist and epidot—amphibolite facies; 8 — granite-metamorphic («granitic») layer of the upper crust; 9 — granulite—basite («basaltic») layer of the lower crust; 10 — upper mantle; 11 — crustal-mantle magma chamber (a) and inferred magma and magmatic fluid propagation (b); 12 — lower crust magma chamber (a), magma elevation channel (b) and intermediate magma chamber (v); 13 — areas of reduced electrical resistivity (50–100 Ohm·m against the background of 200–1000 Ohm·m); 14 — zones of reduced P-wave (a) and S-wave (b) velocities (Gontovaya et al., 2010); 15 — depression (a) under Khodutka Volcano, the assumed peripheral magma chamber (b) and the magma channel (v); 16 — Earth's crust block with numerous mafic and ultramafic intrusive bodies (a), intrusive massif of from gabbro—gabbrodiorites to diorite—granodiorites composition (b), intrusive massif of granite to granodiorite rocks (v); 17 — reverse magnetization of ignimbrites; 18 — projections of active (a) and extinct (b) volcanoes onto the profile, and their names; 19 — deposits (a) and ore occurrences (b) of gold, sources and thermomineral water fields (v); 20 — ECWM-MTS observation points and their numbers.

Принадлежность структуры к террейну можно было бы подтвердить (или опровергнуть) наличием здесь доэоценовых образований, но такие породы в этом районе не обнаружены. К тому же, ко времени публикации статей (Мишин, 1996, 1997) в районе анализируемой структуры глубинные геофизические исследования не проводились. Такие исследования реализованы значительно позже — в 2009 г. вдоль профиля бух. Ходутка — с. Николаевка. Анализ геолого-геофизической модели (рис. 8) дает возможность уточнить особенности геологического строения литосферы, структурную позицию предполагаемого террейна и выявить генетические связи месторождений золота с глубинными особенностями литосферы.

Мощность земной коры варьирует в пределах 30–40 км. Ближе к береговой линии заметна тенденция к утонению коры, что является характерным для всего юго-восточного побережья Камчатки (Нурмухамедов и др., 2016). Более сложной морфологией характеризуются верхняя и нижняя части коры. На севере профиля мощность гранито-метаморфического слоя составляет 12–14 км. В южном направлении толщина слоя постепенно убывает, достигая менее 10 км на крайнем юге профиля. Мощность нижней коры (гранулит-базитового слоя) варьирует в пределах 16–22 км. Но в районе наклонного разрывного нарушения, пронизывающего земную кору и проникающего в литосферную мантию (точки МОВЗ 34–38), наблюдается утонение нижней коры до 10–12 км. В этом же месте отмечается компенсация мощности всей коры за счет увеличения гранито-метаморфического слоя до 16–22 км. Граница  $K_2$ , разделяющая верхнюю и нижнюю коры прерывистая. Особенно заметно нарушение ее сплошности в южной части модели.

На основе методики, предложенной И.П. Косминской (1967) авторами настоящей статьи выполнена типизация земной коры. Метод предусматривает анализ соотношения мощностей верхней и нижней коры по отношению к ее общей мощности. Так, в интервале точек МОВЗ 02–36 мощности верхней и нижней коры сопоставимы, но с незначительным превышением мощности нижней. По формальным признакам это соответствует переходному субокеаническому типу земной коры, характерному для пассивных континентальных окраин, но поскольку исследуемая территория относится к активной окраине, то земную кору, по мнению авторов, следует отнести к переходному субконтинентальному типу. В центральной части модели (рис. 8, точки 36–50) мощности верхней и нижней коры сопоставимы, с небольшим преобладанием верхнего слоя. Учитывая незначительную мощность всей консолидированной коры (30–35 км), данный

участок также необходимо отнести к переходному субконтинентальному типу.

В модели выделены коровые и коромантийные разломы, образующие границы блоков. Вдоль отдельных разломов наблюдается смещение границ слоев. Наиболее значительная амплитуда смещения (8–10 км) отмечена по границе  $K_2$  вдоль коромантийного наклонного разлома (рис. 8, точки 34–36). В этом месте геофизический профиль под острым углом пересекает коромантийный разлом, прослеживаемый по линейно-вытянутой эпицентральной зоне (сейсмическому линеamentу) северо-северо-восточного простирания (рис. 3).

В северной части модели расположен наклонный глубинный разлом, который в плане совпадает с Вилючинским разломом, ранее выделенным по геологическим данным и являющимся юго-западной границей НЗПД (рис. 2). Плоскость разлома падает на северо-восток под углом 80–85°. Вдоль разлома отмечено смещение слоев.

Совершенно иной характер разреза наблюдается в южной части модели. Здесь отмечено значительное количество разрывных нарушений различного наклона и конфигурации (рис. 8). Разделение земной коры на отдельные сравнительно небольшие по размерам блоки указывает на то, что этот участок в относительно недавнем геологическом прошлом был подвергнут мощному деструктивному воздействию. В плотностной модели (рис. 7) это место отмечено выступом блока земной коры, характеризующегося высокими значениями плотности (2.83–2.89 г/см<sup>3</sup>) и магнитной восприимчивости (951–2151) · 1.26 · 10<sup>-5</sup> СИ. Сверху блок ограничен разломом  $K_1$ . Судя по физическим свойствам блок сложен породами от основного до ультраосновного состава.

Таким образом, и по строению, и по составу пород этот участок земной коры носит обособленный чужеродный характер по отношению к остальной части модели по следующим основным признакам:

- на участке фиксируется значительное увеличение мощности нижней коры с заметным утонением верхней;
- на глубине  $\geq 10$  км отмечен выступ блока пород предположительно основного–ультраосновного состава, характерных для северных террейнов;
- весь блок и его обрамление пронизывают многочисленные коровые и коромантийные разломы.

Опираясь на всю полученную информацию, авторы считают, что южный фрагмент профиля пересекает фланговую, наиболее разрушенную часть Прибрежного террейна. Разрушение

террейна произошло вследствие его причленения к континентальному склону Камчатки. По имеющимся данным трудно установить время присоединения ксеноблока к Палео-Камчатке. Но если рассматривать вулканизм, как геологическое событие, получившее развитие после или в процессе причленения островодужного блока к континентальной окраине, то возраст пород вулканического комплекса (ВК) можно принять за временной репер, по которому можно определить приблизительное время вхождения террейна в аккреционный комплекс Юго-Восточной Камчатки.

Предлагается два варианта вхождения террейна:

- в соответствии с геологической картой (Геологическая..., 2005) возраст наиболее древнего нерасчлененного вулканогенного комплекса пород (ВК) датируется олигоценом–миоценом и можно предположить, что причленение островодужного блока и формирование Прибрежного террейна могло произойти не позднее верхнего олигоцена;

- не исключено, что вулканогенный комплекс перекрывает более древние, чем указанные вулканогенные образования — возможно ВК нижнего олигоцена. В этом случае, вхождение террейна в аккреционный комплекс Камчатки могло произойти не позднее верхнего эоцена.

Похожая точка зрения изложена у Н.И. Селиверстова (2009), считающего, что причленение островодужного блока произошло в конце эоцена — начале олигоцена. В этом варианте предполагается изначальное существование единого ксеноблока, разделение которого на отдельные фрагменты произошло под влиянием сдвиговых дислокаций вдоль НЗПД с амплитудой сдвига не менее 100 км. Южный фрагмент этого ксеноблока представлен Прибрежным террейном.

Одним из событий в геологической истории Камчатки было причленение Ачайваам-Валагинской островной дуги к Палео-Камчатке. По мнению А.В. Соловьева (2005) коллизия происходила в раннем-среднем эоцене, а по М.В. Лучицкой (2013) — в раннем эоцене. И в той, и в другой оценке возраст вхождения в аккреционный комплекс полуострова близок ко второму варианту присоединения Прибрежного террейна. Можно высказать предположение о том, что Ачайваам-Валагинский терреин (рис. 1) является северным фрагментом некогда единого террейна, присоединенного к Палео-Камчатке в эоцене. Разделение единой структуры произошло под влиянием левостороннего трансформного сдвига вдоль НЗПД (рис. 1).

Как представляется авторам, причиной столь мощной сдвиговой дислокации могло стать следующее по времени вхождение в аккреционный

комплекс Восточной Камчатки Шипунского, Кроноцкого террейнов в позднем миоцене и Камчатского террейна (рис. 3) в конце плиоцена (Селиверстов, 2009). Причленение островодужных блоков привело к блокированию субдукции океанической литосферы, но при этом, ее латеральное давление на краевую часть материковой плиты какое-то время еще продолжалось (до момента перескока зоны субдукции на восток). Давление привело к высокоамплитудной сдвиговой дислокации. Изложенная точка зрения согласуется с мнением И.Д. Петренко (1999), где также отмечена масштабная сдвиговая дислокация вдоль Начикинской (Малко-Петропавловской) зоны поперечных дислокаций, но уже применительно к Центрально-Камчатскому вулканическому поясу. Отмечено «... что северная и южная ветви ЦКВП принадлежат единой структуре, разорванной по Малко-Петропавловской зоне поперечных дислокаций. Смещение их осей в плане объясняется «... крупномасштабными сдвиговыми дислокациями в миоцен-плиоценовое время» (Петренко, 1999, с. 12). Следует отметить, что изложенная точка зрения близка к концептуальной модели перескока зоны субдукции в позднем миоцене (Авдейко, Палуева, 2006) и геодинамической эволюции Средино-Камчатской и Восточно-Камчатской вулканических дуг (Авдейко, Бергаль-Кувикас, 2015).

Морфология гравитационного поля (рис. 4) дает основание считать, что основная часть Прибрежного террейна находится в акватории океана и протягивается вдоль юго-восточного побережья полуострова, включая мыс Лопатка. К западу от террейна расположена зона шириной 30–40 км, в пределах которой проявлен современный вулканизм. В этой же зоне отмечена повышенная сейсмичность. Эпицентры местных землетрясений образуют узкий линеамент, протяженностью 70 км (рис. 3), где гипоцентры сейсмических событий сконцентрированы на относительно небольших глубинах — от 2–5 до 15–20 км<sup>5</sup>. Как отмечено выше, сейсмоактивный линеамент практически совпадает с осью зоны повышенной сейсмичности и, возможно, имеет продолжение в юго-юго-западном направлении.

При анализе геоэлектрической модели (рис. 6) видно, что ниже границы Мохоровичича, находится слой с пониженным уровнем удельного электрического сопротивления (УЭС) —

<sup>5</sup> Шварц Я.Б. Отчёт о проведении детальных поисковых геофизических работ на участке «Дачный», поисковых геофизических работ на западных флангах Мутновского месторождения парогидротерм и работ по обобщению геофизических материалов по Мутновскому геотермальному району в 1987–1990 гг. (2-я Дачная партия). В 6 книгах. Книга 1 — текст отчета. Елизово: ЕГФЭ ПГО «Камчатгеология», 1990. 281 с.

80–130 Ом·м. В слое выделяются геоэлектрические неоднородности с более низким значением УЭС, которые выше границы Мохоровичича переходят в локализованные аномалии электропроводности. Так, на юге профиля, в интервале глубин 30–45 км выделяется коромантийный объект с уровнем УЭС 30–50 Ом·м. Предполагается, что низкоомная аномалия связана с областью насыщенной магматическими расплавами и гидротермальными растворами (Мороз, Самойлова, 2013), а разрывные нарушения, пронизывающие земную кору (рис. 8), служат путями подъема магмы и магматического флюида в верхние слои земной коры.

В северной половине профиля, в районе Ахонтенской ВТС, в интервале глубин 18–33 км выделена нижнекоровая аномалия электропроводности (15–40 Ом·м), которая совпадает с зоной относительного понижения (–5 – –10%) скорости продольной волны ( $V_p$ ) (Гонтовая и др., 2010). От аномального объекта отходит апофиз, который практически совпадает с наклонным разломом. Как отмечено выше, вдоль разлома наблюдается высокоамплитудная сдвиговая дислокация. Выделенные объекты интерпретируются авторами следующим образом.

В нижней коре находится магматический очаг. От очага по коромантийному наклонному разлому, происходит подъем магмы и глубинного флюида в зону действующих вулканов. Подъем магматического материала осуществляется вдоль протяженной сейсмоактивной трещины, фрагментом которой в разрезе (рис. 8) является предполагаемый наклонный магмовод. На глубине 11–16 км от дневной поверхности отмечено расширение магмовода. Образование своеобразного «раздува» можно объяснить формированием промежуточного магматического очага. Это предположение хорошо согласуется с результатами сейсмической томографии (Л.И. Гонтовая — устное сообщение), в соответствии с которой в районе Мутновского вулкана, в интервале глубин, примерно 10–20 км (рис. 8), выделена зона относительного понижения (–5 – –7%) скорости поперечной волны ( $V_s$ ). На этих же глубинах, уверенно выделяется локальный участок с аномально большими показателями отношения скорости продольной к скорости поперечной волны ( $V_p/V_s$ ) — 1.85–1.95 и более. И аномальное понижение  $V_s$ , и повышенные значения  $V_p/V_s$  говорят о наличии в этом месте объекта с высокой пластичностью горных пород — вероятно, магматического очага. Продвижение магмы в верхние слои сопровождается активными сейсмическими событиями — вулканотектоническими землетрясениями, эпицентры которых образуют протяженный сейсмический линеамент.

Подъем аномалии электропроводности (рис. 6) наблюдается и к северу от нижнекорового очага — в точках МТЗ №№ 16–21, где профиль в очередной раз пересекает эруптивную трещину. Предполагается, что вся трещина наполнена расплавами, магматическими флюидами и гидротермальными растворами. Глубина до верхней границы такой зоны может меняться в зависимости от геологических условий. Авторы предполагают, что работами МТЗ зафиксированы лишь отдельные фрагменты протяженной магматогенной зоны (рис. 8) в тех местах, где геофизический профиль эту зону пересекает. Судя по картине распределения электропроводности (рис. 6), выделенные очаги имеют корни в верхней мантии.

Следует отметить, что наличие в анализируемой части разреза аномалии электропроводности, совпадающей с зоной пониженных скоростей, не сопровождается разуплотнением пород (рис. 7). Подобные ситуации рассматриваются в монографии (Балеста, 1981), где автор отмечает, что в области активного вулканизма с увеличением температуры плотность пород падает, однако ее уменьшение невелико и составляет первые проценты. Вероятно, эффект расплавления и увеличение плотности с глубиной взаимно компенсируют друг друга.

В соответствии с геоэлектрической моделью (рис. 6), в верхней коре выделяются участки с уровнем УЭС от 800 до 4000 Ом·м. Наиболее значительные по своим масштабам участки, где сопротивление достигает максимальных значений (3000–4000 Ом·м), отмечены в южной половине профиля. В этом месте профиль под разными азимутами пересекает западный фланг Прибрежного террейна. Высокий уровень УЭС можно объяснить проявлением регионального метаморфизма, который сопровождал процесс присоединения ксеноблока. Зона интенсивного выноса тепла, осуществляемого преимущественно конвективным путем, протягивается от Кошелевской гидротермальной системы на юго-западе полуострова и далее через вулканы Ильинский, Желтовский, Ксудач и Ходутка (рис. 2–5) до Мутновского геотермального района включительно (Смирнов, Сугробов, 1980). По опубликованным данным (Красный, 1987), измеренный тепловой поток в районе южной части профиля составляет 70–110 мВт/м<sup>2</sup>, в центральной — 90–110 мВт/м<sup>2</sup> и в северной — 60–90 мВт/м<sup>2</sup>. Тепловые потоки, а также активная гидротермальная деятельность способствовали глубоким метаморфическим изменениям горных пород с высоким уровнем УЭС.

Часть наиболее известных месторождений термальных вод расположена в непосредственной близости от профиля бух. Ходутка — с. Николаевка (рис. 2–5). К западу от профиля, на глубине

8–10 км и более находится интрузивный массив средне-среднекислого состава (Нурмухамедов и др., 2020; Nurmukhamedov, Sidorov, 20196). В ареале массива (рис. 3) расположен Карымшинский рудный узел, в котором на протяжении длительного времени функционировали замкнутые системы постмагматических рудоносных растворов (Нурмухамедов и др., 2020). Аналогичных массивов вдоль профиля бух. Ходутка — с. Николаевка не обнаружено, но на юге (рис. 8, точки 56, 58 и 70, 74) выделены блоки, отождествляемые с интрузиями гранитов-гранодиоритов. В этом же месте отмечена активная гидротермальная деятельность, где также предполагается существование замкнутых гидротермальных рудообразующих систем.

Месторождения золота Асачинское, Мутновское и Родниковое, а также рудопроявления Рогатка и Быстринское пространственно примыкают к Мутновскому разлому (рис. 2). По мнению И.Д. Петренко (1999) в поверхностных структурах разлом проявлен как зона растяжения, выраженная в виде грабена шириной 10 км. Его заложение произошло не позднее среднего миоцена. Разлом, выделенный вдоль сейсмического линеамента (рис. 3) проходит параллельно Мутновскому на расстоянии, примерно, 10–12 км. Как представляется авторам, оба тектонических нарушения относятся к единому наклонному разлому, выделенному в модели в интервале точек 29–40. Действительно, первый из них выделен по геолого-геофизическим данным (Геологическая..., 2005), второй — по линейно вытянутой зоне концентрации эпицентров землетрясений. Гипоцентры сейсмических событий зарегистрированы в интервале глубин от 2–5 до 15–20 км при максимальной их концентрации на глубине 8–14 км. Учитывая среднее расстояние между упомянутыми разломами и глубину до участков с максимальной концентрацией гипоцентров, нетрудно отметить, что угол падения плоскости разлома составляет примерно 45°, а азимут падения 300°. Такие параметры близки к современной СФЗ (Селиверстов, 2009). Но глубина до СФЗ в районе сейсмоактивного линеамента составляет 170–180 км. Основываясь на имеющихся данных можно предположить, что в этом месте геофизическими методами зафиксирован фрагмент древней субдукции — палеосубдукции. Субдукция была заблокирована Прибрежным террейном не позднее верхнего олигоцена или в конце эоцена — начале олигоцена с последующим ее перескоком на восток в акваторию океана. Предположение о существовании здесь зоны палеосубдукции подтверждается результатами объемного плотностного моделирования Южной Камчатки (Нурмухамедов, Сидоров, 2022). В модели отчетливо выделяется две поверхности с плотностью 3.33 г/см<sup>3</sup>, погружающихся в запад-

ном-северо-западном направлении на большие глубины (Нурмухамедов, Сидоров, 2022). Одна из них находится под акваторией Тихого океана и интерпретируется авторами как фрагмент кровли современной субдукции, вторая погружается под полуостров и отождествляется с кровлей палеосубдукции. Блокирование последней, по мнению авторов, произошло в среднем — позднем палеогене в результате приращения островодужного блока к Палео-Камчатке.

Обращает на себя внимание, что значительная часть месторождений и рудопроявлений золота сконцентрированы в области, примыкающей к юго-западной границе НЗПД — Вилючинскому разлому. К северо-востоку от этой границы ни месторождений, ни рудопроявлений золота к настоящему времени не обнаружено, что указывает на то, что процесс рудообразования происходит в динамически активной зоне современного вулканизма. Судя по расположению Асачинской, Ахомтенской, Карымшинской и Плотниковской ВТС (рис. 2, 4, 5), амплитуда сдвиговой дислокации вдоль разлома составляет 50–60 км. По мнению М.М. Лебедева и С.Е. Апрелькова (1979) отмеченная дислокация происходила в миоцен-плиоценовое время, а по мнению И.Д. Петренко (1999) в плиоцен-раннеплейстоценовое время. Авторы настоящей статьи придерживаются второй точки зрения. В этот же период времени протекает основная фаза рудной минерализации. Вероятно, сначала происходил процесс рудообразования, а затем левосторонняя дислокация разнесла уже образованные месторождения вдоль разрывных нарушений. В результате образовалась Г-образная зона, в пределах которой расположены месторождения и рудопроявления золота. Главную рудоконтролирующую и рудогенерирующую роль в ней играет сейсмоактивный разлом в зоне палеосубдукции и в этом заключается одна из главных особенностей архитектуры литосферы в исследуемом районе. По существу, зона сейсмоактивного линеамента и прилегающие к нему участки представляет собой рифтогенную зону — зону новейших растяжений шириной 30–40 км.

Представим в краткой форме временную последовательность, в течении которой происходило формирование литосферы на юго-востоке Камчатки. До эоцена включительно происходило погружение океанической литосферы под нависающую континентальную. В конце эоцена — начале олигоцена произошло приращение островодужного блока к континентальному склону Палео-Камчатки, что привело к блокированию зоны субдукции и ее «перескоку» на восток, в акваторию океана. Начало формирования рифтогенной зоны, вероятно, заложено в олигоцене. После чего, в олигоцен-четвертичное время активизирова-

лась вулканическая деятельность. Основная фаза золоторудной минерализации приходится на плиоцен-раннеплейстоценовое время.

В соответствии с предложенной геолого-геофизической моделью процесс образования золоторудных месторождений представляется следующим образом. Из протяженной коромантийной магматогенной зоны по разрывным нарушениям-магмоводам происходит подъем магматических расплавов и высокотемпературных флюидов, обогащенных растворами благородных металлов. В геолого-геофизической модели (рис. 8) показаны отдельные фрагменты магматогенной зоны и предполагаемые подводные каналы. Под влиянием мощных тепловых потоков и дифференциации поступающей магмы, в верхних слоях земной коры формируются магматические очаги среднекислого и кислого составов. Примерами могут служить промежуточный очаг в районе Мутновского вулкана и периферический в районе вулкана Ходутка. В результате дегидратации магмы высвобождаются ювенильные воды, насыщенные растворами благородных металлов. Рудоносные растворы смешиваясь с инфильтрационными (метеорными) водами образуют высокотемпературные гидротермальные системы, в пределах которых происходит активная метаморфическая проработка горных пород и формирование месторождений золота эпитептермального типа. Так, в ареале Асачинской и Ахонтенской ВТС, в верхних слоях коры сформированы участки гидротермально измененных пород мезокайнозойского возраста (рис. 8), в районе которых расположены месторождения и рудопроявления золота. Постоянная подпитка магматогенно-гидротермальных систем высокотемпературным флюидом, обогащенного растворами благородных металлов, делает процесс рудообразования непрерывным во времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В созданной по данным МОВЗ, МТЗ, гравиметрии, магнитометрии и другим данным модели показаны основные границы литосферы, выделены ранее неизвестные элементы строения земной коры. В целом, земную кору на юго-востоке Камчатки можно отнести к переходному субконтинентальному типу.

2. Авторы основываясь на геолого-геофизических данных считают, что на крайнем юго-востоке Камчатки находится ксеноблок — Прибрежный террейн. Высказано предположение о том, что данный террейн является южным фрагментом некогда единого островодужного террейна, присоединенного к Палео-Камчатке в эоцене. Его северным фрагментом является

Ачайваям-Валагинский террейн. Разделение ксеноблоков произошло под влиянием левосторонней трансформной дислокации вдоль Начикинской зоны поперечных дислокаций с амплитудой смещения не менее 100 км.

3. Большая часть Прибрежного террейна находится в акватории океана Тихого океана и протягивается вдоль юго-восточного побережья Камчатки, включая мыс Лопатка. К западу от ксеноблока расположена зона новейших растяжений шириной 30–40 км, в которой проявлен современный вулканизм. Подъем магмы происходит по протяженной эруптивной трещине — магмоводу. Внедрение магмы в верхние горизонты коры сопровождается активными сейсмическими событиями — вулканотектоническими землетрясениями, эпицентры которых образуют протяженный сейсмический линеамент.

4. Эруптивная трещина унаследована от зоны максимального перегиба палеосубдукции — слэба и в этом заключается одна из основных особенностей архитектуры литосферы в исследуемом районе. Наличие палеосубдукции подтверждается геолого-геофизическими данными. Не позднее верхнего олигоцена зона субдукции была заблокирована Прибрежным террейном, что привело к ее перескоку на восток, в акваторию Тихого океана.

5. В геолого-геофизической модели выделены коромантийный и нижнекоровый магматические очаги. От очагов по разрывным нарушениям происходит подъем магмы и магматического флюида в зону действующих вулканов. В центре модели, на глубине 11–16 км от дневной поверхности отмечено расширение магматического канала. Образование своеобразного «раздува» объясняется наличием промежуточного магматического очага. И коромантийный, и нижнекоровый очаги являются фрагментами протяженной коромантийной магматогенной зоны, корнями уходящей в верхнюю мантию.

6. Процесс рудообразования золота происходит в динамически активном районе Юго-Восточной Камчатки — южной части ВКВП. Месторождения Родниковое, Мутновское и Асачинское, а также рудопроявления Рогатка и Быстринское генетически связаны с эруптивной трещиной, выполняющей главную рудоконтролирующую и рудогенерирующую роль в образовании месторождений. На основе полученных результатов, авторы предлагают модель формирования золоторудных месторождений в исследуемом районе. Из протяженной коромантийной зоны по глубинным разломам-магмоводам происходит подъем магматических расплавов и высокотемпературных флюидов, обогащенных растворами благородных металлов.

Под влиянием тепловых потоков и дифференциации магмы, в верхних слоях коры образовались промежуточные и периферические магматические очаги среднекислого и кислого составов. В результате дегидратации кислой магмы высвобождаются ювенильные воды, насыщенные растворами благородных металлов. Рудоносные растворы, смешиваясь с метеорными водами, образуют замкнутые гидротермальные системы, где происходит формирование месторождений золота эпитермального типа.

Работа выполнена на основе большого объема геолого-геофизической информации, в разное время полученной коллективом специалистов ОАО (ПГО) «Камчатгеология», с которыми на протяжении десятков лет бок обок трудились авторы настоящей статьи. Авторы выражают искреннюю благодарность всем коллегам, оказавшим поддержку в выполнении настоящей работы. Особую благодарность и искреннюю признательность авторы выражают снс Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН Л.И. Гонтовой за предоставленные материалы и консультации по сейсмической томографии земной коры и верхней мантии, а также ведущему геофизику ООО «Северо-Запад» Е.Д. Александровой, выполнившей интерпретацию данных МТЗ.

#### Список литературы [References]

- Апрелков С.Е., Ольшанская О.Н.* Тектоническое районирование Центральной и Южной Камчатки по геологическим и геофизическим данным // Тихоокеанская геология. 1989. № 1. С. 53–65 [Aprel'kov S.Ye., Ol'shanskaya O.N. Tectonic zoning of Central and Southern Kamchatka according to geological and geophysical data // Russian Journal of Pacific Geology. 1989. № 1. P. 53–65 (in Russian)].
- Авдейко Г.П., Палуева А.А.* Олюторское землетрясение 2006 г. как результат взаимодействия литосферных плит в Корякско-Камчатском регионе // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 54–68 [Avdeyko G.P., Paluyeva A.A. Olyutorsky earthquake of 2006 as a result of the interaction of lithospheric plates in the Koryak-Kamchatsky region // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2006. № 2(8). P. 54–68 (in Russian)].
- Авдейко Г.П., Бергаль-Кувикас О.В.* Геодинамические условия образования адакитов и Nb-обогащенных базальтов (NEAB) на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2015. № 5. С. 9–22. <https://doi.org/10.7868/S0203030615050028> [Avdeiko G.P., Bergal-Kuvikas O.V. The Geodynamic Conditions for the Generation of Adakites and Nb-Rich Basalts (NEAB) in Kamchatka // Journal of Volcanology and Seismology. 2015. V. 9. № 2. P. 295–306. <https://doi.org/10.1134/S0742046315050024>].
- Белоусов В.И.* Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М.: Наука, 1978. 174 с [Belousov V.I. Geologiya geotermal'nykh poley v oblastiakh sovremennogo vulkanizma. Moscow: Nauka, 1978. 174 p. (in Russian)].
- Балеста С.Т.* Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 134 с [Balesta S.T. Zemnaya kora i magmaticheskiye ochagi oblastey sovremennogo vulkanizma. Moscow: Nauka, 1981. 134 p. (in Russian)].
- Белявский В.В., Александрова Е.Д.* Трехмерная геоэлектрическая модель южной части полуострова Камчатка // Физика Земли. 2014. № 1. С. 11–32. <https://doi.org/10.7868/S0002333714010025> [Belyavskii V.V., Aleksanova E.D. Three-Dimensional Geoelectrical Model of Southern Kamchatka // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2014. V. 50. № 1. P. 9–31. <https://doi.org/10.1134/S1069351314010029>].
- Белявский В.В., Яковлев А.Г.* Профильная 3D-инверсия данных МТЗ-МВЗ на примере Шивелучской вулканической зоны полуострова Камчатка // Физика Земли. 2016. Т. 52. № 1. С. 57–77. <https://doi.org/10.7868/S0002333716010026> [Belyavskii V.V., Yakovlev A.G. The 3D Profile Inversion of the MTS-MVS Data by the Example of the Shiveluch Volcanic zone in the Kamchatka Peninsula // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2016. V. 52. № 1. P. 57–77. <https://doi.org/10.1134/S106935131601002X>].
- Важеевская А.А.* Ареальный вулканизм // Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки: Коллективная монография / Отв. ред. Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1980. С. 39–41 [Vazheyevskaya A.A. Areal volcanism // Dolgozhivushchiy tsentr endogennoy aktivnosti Yuzhnoy Kamchatki: Collective monograph / Ed. Yu.P. Masurenkov. Moscow: Nauka, 1980. P. 39–41 (in Russian)].
- Гончаров В.И.* Гидротермальное рудообразование в краевых вулканогенных поясах. М.: Наука, 1983. 203 с. [Goncharov V.I. Gidrotermal'noye rudoobrazovaniye v kraevykh vulkanogennykh poiyasakh. Moscow: Nauka, 1983. 203 p. (in Russian)].
- Геологическая карта и карта полезных ископаемых Камчатской области и Корякского автономного округа / Под ред. А.Ф. Литвинова, Б.А. Марковского, В.П. Зайцева. 1:1 500 000. СПб: ВСЕГЕИ, 2005. [Geologicheskaya karta i karta poleznykh iskopayemykh Kamchatskoy oblasti i Koryakskogo avtonomnogo okruga / Eds. A.F. Litvinov, B.A. Markovsky, V.P. Zaytsev. 1:1 500 000. SPb: VSEGEI, 2005. (in Russian)].
- Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В.* Структура верхней мантии зоны перехода океан-континент в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 13–29 [Gontovaya L.I., Popruzhenko S.V., Nizkous I.V. Upper Mantle Structure in the Ocean-Continent Transition Zone: Kamchatka // Journal of Volcanology and Seismology. 2010. V. 4. № 4. P. 232–247].
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Коваленко В.И.* Структурно-магматическая зональность и металлогения западной части Тихоокеанского пояса // Геотектоника. 1973. № 5. С. 3–21 [Zonenshayn L.P., Kuz'min M.I., Kovalenko V.I. Structural-magmatic zoning and metallogeny of the western part of the Pacific belt // Geotektonika. 1973. № 5. P. 3–21 (in Russian)].
- Зобин В.М.* Динамика очага вулканических землетрясений. М.: Наука, 1979. 92 с [Zobin V.M. Dinamika ochaga vulkanicheskikh zemletryaseniy. Moscow: Nauka, 1979. 92 p. (in Russian)].
- Косминская И.П.* Современные сейсмические данные об океанической и континентальной земной

- коре // Бюллетень МОИП. Отд. геол. 1967. Вып. 5. С. 8–17 [*Kosminskaya I.P.* Modern seismic data on the oceanic and continental crust // *Bulletin MOIP. Otd. geol.* 1967. Iss. 5. P. 8–17 (in Russian)].
- Красный М.Л.* Тепловой поток // Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы / Под ред. К.Ф. Сергеева, М.Л. Красного. Л.: ВСЕГЕИ, 1987. Лист 16 [*Krasnyu M.L.* Heat flow // *Geologo-geofizicheskiy atlas Kurilo-Kamchatskoy ostrovnoy sistemy* / Ed. K.F. Sergeev, M.L. Krasnyu. Leningrad: VSEGEI, 1987. Sheet 16 (in Russian)].
- Лебедев М.М., Априлков С.Е., Ежов Б.В., Харченко Ю.И.* Системы островных дуг Корякско-Камчатской складчатой области // Вулканология и сейсмология. 1979. № 5. С. 30–36 [*Lebedev M.M., Aprelkov S.Ye., Yezhov B.V., Kharchenko Yu.I.* Systems of island arcs in the Koryak-Kamchatka folded region // *Vulkanologiya i seysmologiya.* 1979. № 5. P. 30–36 (in Russian)].
- Луцицкая М.В.* Гранитоидные комплексы мезозоя-кайнозоя в структуре континентальной окраины северо-востока Азии // *Геотектоника.* 2013. № 5. С. 3–35. <https://doi.org/10.7868/S0016853X13050032> [*Luchitskaya M.V.* Mesozoic and Cenozoic Granitoid Complexes in the Structure of the Continental Margin of Northeast Asia // *Geotectonics.* 2013. V. 47. № 5. P. 311–339. <https://doi.org/10.1134/S0016852113050038>].
- Мишин В.В.* Глубинное строение и типы земной коры юга Камчатки // Тихоокеанская геология. 1996. Т. 15. № 1. С. 110–119 [*Mishin V.V.* Deep Structure and the Types of Crust of South Kamchatka // *Geology of Pacific Ocean.* V. 13. P. 145–160].
- Мишин В.В.* Геолого-геофизическое строение юга Камчатки // Тихоокеанская геология. 1997. Т. 16. № 4. С. 64–70 [*Mishin V.V.* Geological and Geophysical Structure of Kamchatka South // *Geology of Pacific Ocean.* 1999. V. 14. P. 587–601].
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А.* Численное трехмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Физика Земли. 2011. № 2. С. 64–73 [*Moroz Y.F., Moroz T.A.* Numerical 3D Modeling of the Magnetotelluric Field in Kamchatka // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* 2011. V. 47. № 2. P. 138–146. <https://doi.org/10.1134/S1069351311010071>].
- Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М.* Глубинное строение вулканической зоны Южной Камчатки по геофизическим данным // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 12–26. <https://doi.org/10.7868/S0203030613020065> [*Moroz Y.F., Samoilova O.M.* The Deep Structure of the Southern Kamchatka Volcanic Zone from Geophysical Data // *Journal of Volcanology and Seismology.* 2013. V. 7. № 2. P. 99–111. <https://doi.org/10.1134/S074204631302005X>].
- Нурмухамедов А.Г., Недядько В.В., Ракитов В.А., Липатьев М.С.* Границы литосферы на Камчатке по данным метода обменных волн землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 35–52 [*Nurmukhamedov A.G., Nedyad'ko V.V., Rakitov V.A., Lipat'yev M.S.* The boundaries of the lithosphere in Kamchatka according to the method of converted waves of earthquakes // *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle.* 2016. № 1(29). P. 35–52 (in Russian)].
- Нурмухамедов А.Г.* Банные и Карымчинские гидротермальные системы – источники энергии на юге Камчатки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 12. Камчатка-5. М.: Горная книга. Специальный выпуск 32. С. 347–367 [*Nurmukhamedov A.G.* Bannye and Karymcha hydrothermal systems – sources of energy in the south of Kamchatka // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal). 2017. № 12. Kamchatka-5. Moscow: Gornaya kniga. Special Iss. 32. P. 347–367 (in Russian)].
- Нурмухамедов А.Г., Сидоров М.Д., Недядько В.В.* Геолого-геофизическая модель северо-востока Камчатки и сейсмическая активность региона в 2013 г. // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37. № 6. С. 53–64. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2018-37-6-53-64> [*Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D., Nedyad'ko V.V.* Geological-Geophysical Model of Northeastern Kamchatka and Regional Seismic Activity in 2013 // *Russian Journal of Pacific Geology.* 2018. V. 12. № 6. P. 500–510. <https://doi.org/10.1134/S1819714018060040>].
- Нурмухамедов А.Г., Сидоров М.Д., Мороз Ю.Ф.* Модель глубинного строения земной коры и верхней мантии в районе Карымшинского золоторудного узла по геофизическим данным (Южная Камчатка) // Георесурсы. 2020. Т. 22. № 1. С. 63–72. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.63-72> [*Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D., Moroz Yu.F.* A model of the deep structure of the Earth's crust and upper mantle in the area of the Karymshinsky gold-ore cluster according to geophysical data (South Kamchatka) // *Georesursy.* 2020. V. 22. № 1. P. 68–76. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.63-72>].
- Нурмухамедов А.Г., Сидоров М.Д.* Модель глубинного строения Южной Камчатки по результатам плотностного 3D-моделирования и комплексу геолого-геофизических данных // Тихоокеанская геология. 2022. Т. 41. № 2. С. 23–43. <https://doi.org/10.30911/02074028-2022-41-2-25-43> [*Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D.* The Deep Structure Model for Southern Kamchatka Based on 3D Density Modeling and Geological and Geophysical Data // *Russian Journal of Pacific Geology.* 2022. V. 16. № 2. P. 83–100. <https://doi.org/10.1134/S1819714022020075>].
- Померанцева И.В., Мозженко А.Н.* Сейсмические исследования с аппаратурой «Земля». М.: Недра, 1977. 256 с. [*Pomerantseva I.V., Mozzhenko A.N.* Seysmicheskiye issledovaniya s apparaturoy «Zemlya». Moscow: Nedra. 1977, 256 p. (in Russian)].
- Петренко И.Д.* Золото-серебряная формация Камчатки. СПб: Изд-во картографической фабрики ВСЕГЕИ, 1999. 116 с. [*Petrenko I.D.* Zoloto-serebryanaya formatsiya Kamchatki. SPb: Izd-vo kartograficheskoy fabriki VSEGEI, 1999. 116 p. (in Russian)].
- Смирнов В.И.* Зоны Бенюфа и магматогенное рудообразование // Геология рудных месторождений. 1974. № 1. С. 3–17 [*Smirnov V.I.* Benioff zones and magmatic ore formation // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy.* 1974. № 1. P. 3–17 (in Russian)].
- Смирнов Я.Б., Сугробов В.М.* Земной тепловой поток в Курило-Камчатской и Алеутской провинциях. II. Карта измеренного и фонового теплового потока // Вулканология и сейсмология. 1980. № 1. С. 16–31 [*Smirnov Ya.B., Sugrobov V.M.* Terrestrial heat flow in the Kuril-Kamchatka and Aleutian provinces. II. Map of the

- measured and background heat flow // *Vulkanologiya i seismologiya*. 1980. № 1. P. 16–31 (in Russian)].
- Соловьев А.В.* Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит методами трекового датирования и структурного анализа. Автореф. дисс. д. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2005. 52 с. [*Solov'ev A.V.* Izucheniye tektonicheskikh protsessov v oblastiakh konvergentsii litosfernykh plit metodami trekovogo datirovaniya i strukturnogo analiza. Avtoref. diss. d. geol.-min. nauk. Moscow: MGU, 2005. 52 p. (in Russian)].
- Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во. КамГУ, 2009. 191 с. [*Seliverstov N.I.* Geodinamika zony sochleneniya Kurilo-Kamchatskoy i Aleutskoy ostrovnykh dug. Petropavlovsk-Kamchatsky: Izd-vo. KamGU, 2009. 191 p. (in Russia)].
- Сидоров М.Д., Нурмухамедов А.Г.* Объемное изображение плотностной модели земной коры на примере Южной Камчатки // *Геология и геофизика*. 2022. Т. 63. № 10. С. 1433–1452. <https://doi.org/10.15372/GiG2021155> [*Sidorov M.D., Nurmukhamedov A.G.* Three-Dimensional Image of Crustal Density Model: A Case Study in South Kamchatka // *Russian Geology and Geophysics*. 2022. V. 63. № 10. P. 1189–1206. <https://doi.org/10.2113/RGG20204328>].
- Тараканов Р.З.* Сейсмичность // *Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы* / Под ред. К.Ф. Сергеева, М.Л. Красного. Л.: ВСЕГЕИ, 1987. Лист 33 [*Tarakanov R.Z.* Seismicity // *Geologo-geofizicheskiy atlas Kurilo-Kamchatskoy ostrovnoy sistemy* / Ed. K.F. Sergeev, M.L. Krasnyy. Leningrad: VSEGEI, 1987. Sheet 33 (in Russian)].
- Чубарова О.С.* Вулканические землетрясения // *Большая Российская энциклопедия*. М.: 2006. Т. 6. С. 91 [*Chubarova O.S.* Volcanic earthquakes // *Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya*. Moscow: 2006. V. 6. P. 91 (in Russian)].
- Шаниро М.Н., Соловьев А.В.* Кинематическая модель формирования Олюторско-Камчатской складчатой области // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 8. С. 863–880 [*Shapiro M.N., Solov'ev A.V.* Formation of the Olyutorsky-Kamchatka Foldbelt: A Kinematic Model // *Russian Geology and Geophysics*. 2009. V. 50. № 8. P. 668–681. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.10.006>].
- Hedenquist J.W., Houghton B.F.* Epithermal gold mineralization and its volcanic environments // *The earth resources Foundation the University of Sydney Taupo Volcanic Zone*, N.Z. 1987. 15–21 November.
- Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D.* Deep structure and geothermal potential along the regional profile set from Opala Mountain to Vakhil' River (Southern Kamchatka) / 2nd International Geothermal Conference. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 249 (2019a) 01204.1. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012041>.
- Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D.* Tolmachevsky active magmatic center (South Kamchatka) and its heat-power capacity as estimated by deep geophysical surveys / 3rd International Geothermal Conference. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 367 (2019b) 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/367/1/012015>.
- Rodi W., Mackie R.L.* Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // *Geophysics*. 2001. V. 66. № 1. P. 174–187. <https://doi.org/10.1190/1.1444893>.

## STRUCTURE OF THE LITHOSPHERE AND ITS CONTROLS ON GOLD MINERALISATION IN SOUTHEAST KAMCHATKA

**Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D.**

*Research Geotechnological Center of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683002*

Received January 19, 2023; revised May 26, 2023; accepted September 26, 2023

Since the eighties of the last century and up to the present time, a complex of geophysical methods including earthquake converted-waves method, magnetotelluric sounding, gravimetry, magnetometry and seismological have been implemented in southeast Kamchatka. Based on the complex interpretation of the data obtained, a geological and geophysical model of the Earth's crust and upper mantle along the bay profile of Khodutka Bay – Nikolaevka village was constructed. Genetic relationship between active areas of the Earth's crust and gold deposits was established. The hypothesis of division of the formerly unified xenoblock into two separate fragments under the impact of shear along the Nachikinskaya zone of transverse dislocations has been suggested. The southern fragment is represented by the Coastal terrane. To the west of the terrane is a permeable zone with modern volcanism. Intrusion of magma and high-temperature fluids enriched with noble metals into the upper crustal layers occurs along the magmatic channel formed in the paleosubduction zone.

*Keywords: Paleo-Kamchatka, Earth's crust, upper mantle, subduction, terrane, ore occurrence.*