

Модель глубинного строения земной коры и верхней мантии в районе Карымшинского золоторудного узла по геофизическим данным (Южная Камчатка)

А.Г. Нурмухамедов^{1*}, М.Д. Сидоров¹, Ю.Ф. Мороз²

¹Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

На юге Камчатки активно протекают современные геодинамические процессы. Представлена глубинная геолого-геофизическая модель строения земной коры и верхней мантии вдоль регионального профиля п. Апача – бух. Мутная в зоне Толмачёвского активного магматического центра. Профиль проходит вблизи юго-западной границы Карымшинской вулcano-тектонической структуры (ВТС) и пересекает Ахотенскую ВТС. Модель создана на основе комплексной интерпретации материалов метода обменных волн от удаленных землетрясений (МОВЗ), гравиразведки и магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Мощность земной коры вдоль профиля изменяется от 30-33 км на краях до 44-46 км в центральной его части. Доминантой модели является высокоплотное образование – блок земной коры, насыщенный интрузиями основного и ультраосновного состава. Формирование блока связано с проницаемой зоной между земной корой и верхней мантией. В разрезе МОВЗ нарушается корреляция сейсмических границ, а в плотностной модели выделяется область с массивными неоднородностями. Значительное увеличение глубины до границы М в центре модели объясняется наличием в этом месте «раздутаго» переходного слоя между корой и мантией. Мощность слоя около 10 км, а плотность мантии достигает 3,4 г/см³. Предполагается, что это участок эклогитизации пород в зоне палеосубдукции океанической литосферы под материковую. Район благоприятен для скопления метеорных вод, которые контактируют с высокотемпературной средой и постмагматическими растворами интрузий, что приводит к образованию гидротермальных систем. Показана генетическая связь Карымшинского золоторудного узла с интрузивным массивом средне-среднекислого состава, выделенного в зоне Толмачёвского активного магматического центра.

Ключевые слова: земная кора, верхняя мантия, переходный слой, глубинная модель, тепловой поток, метод обменных волн от удаленных землетрясений, магнитотеллурическое зондирование, Южная Камчатка

Для цитирования: Нурмухамедов А.Г., Сидоров М.Д., Мороз Ю.Ф. (2020). Модель глубинного строения земной коры и верхней мантии в районе Карымшинского золоторудного узла по геофизическим данным (Южная Камчатка). *Георесурсы*, 22(1), с. 63-72. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.63-72>

Введение

В настоящее время большой интерес представляет решение проблем распространения и локализации вулканогенных золоторудных месторождений в районе Начикинской (Крутогоровско-Петропавловской) зоны поперечных дислокаций и на её флангах (рис. 1). Зона пересекает область современного вулканизма на юге Камчатки, где выявлено несколько месторождений и рудопроявлений золота. Район месторождения Порожистое и рудопроявления к востоку от него выделяются под общим названием «Карымшинский» рудный узел». Узел расположен в ареале Толмачёвского активного магматического центра (ТАМЦ) (Нурмухамедов, 2017; Nurmukhamedov, Sidorov, 2019), контуры которого показаны на рис. 1. Через центральную часть ТАМЦ проходит два региональных геофизических профиля: в северо-восточном направлении профиль г. Опала – р. Вахиль и в северо-западном п. Апача – бух. Мутная.

Вдоль профилей с 1987 по 1993 г. Елизовской геофизической экспедицией ПГО «Камчатгеология» проводились глубинные исследования методами обменных волн землетрясений (МОВЗ) и магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Результаты изложены в научных публикациях (Мороз и др., 1995; Мишин, 1996, 1997). Однако значительно позже анализ материалов МОВЗ показал, что на западных фрагментах региональных профилей допущено системное завышение глубин до раздела Мохо и других границ в земной коре. Поэтому была проведена переинтерпретация материалов МОВЗ (Нурмухамедов и др., 2016). Впоследствии для профиля г. Опала – р. Вахиль было выполнено геоплотностное моделирование, с использованием современного пакета программ и на основе комплекса обновленных данных, разработана геолого-геофизическая модель строения земной коры и верхней мантии (Nurmukhamedov, Sidorov, 2019).

В настоящей статье представлены результаты интерпретации материалов МОВЗ, гравиметрии и МТЗ, полученных вдоль профиля п. Апача – бух. Мутная в совокупности с геолого-геофизическими данными на район ТАМЦ. Протяженность профиля составляет около 120 км (рис. 1).

* Ответственный автор: Александр Гарифович Нурмухамедов
E-mail: nurmukhamedov1949@mail.ru

© 2020 Коллектив авторов

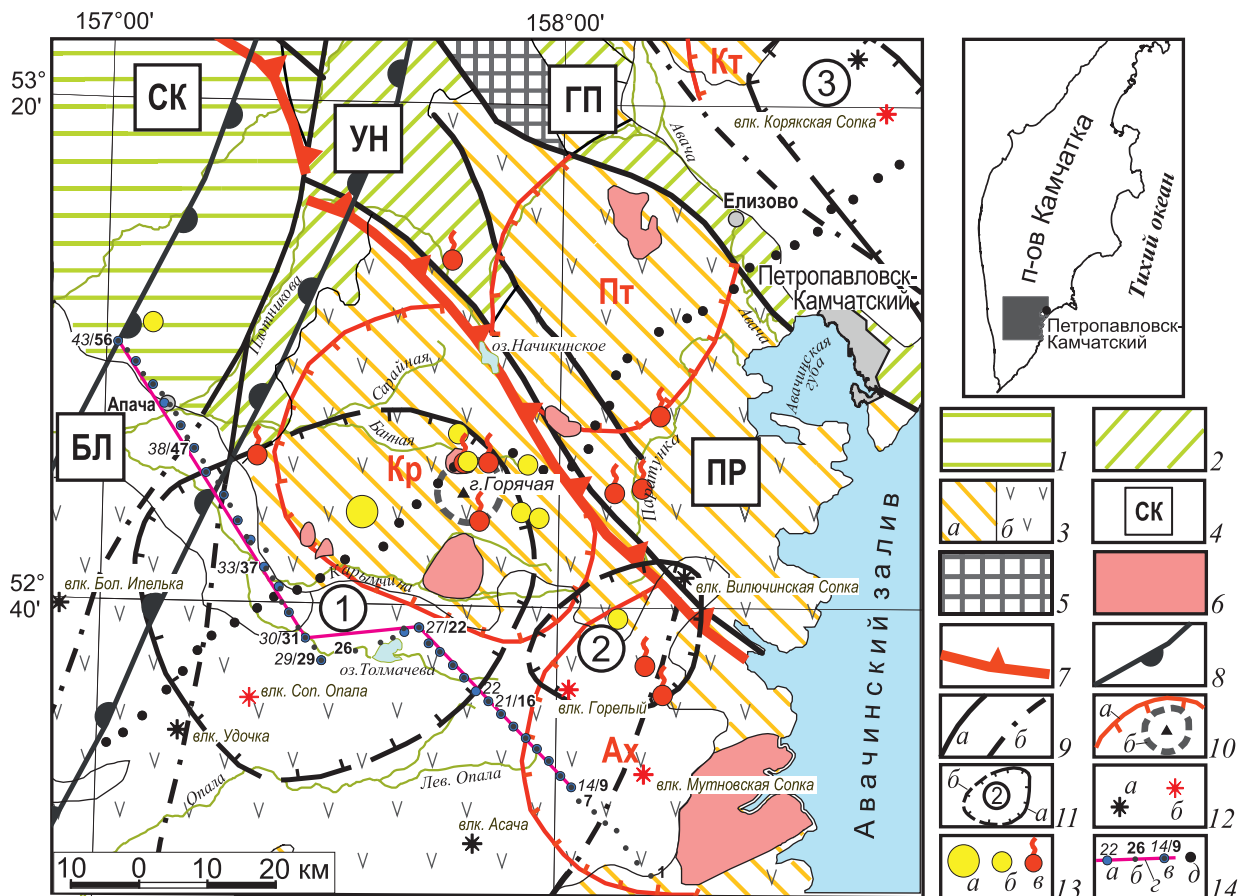


Рис. 1. Фрагмент тектонической схемы Корьякско-Камчатской складчатой области (по материалам (Nurmukhamedov, Sidorov, 2019) с дополнениями). 1 – Корьякско-Западно-Камчатская складчатая зона; 2 – Восточно-Камчатская подзона Олюторско-Восточно-Камчатской складчатой зоны; 3 – Курило-Южно-Камчатская островодужная вулканическая зона (а), Южно-Камчатский вулканический пояс (б); 4 – структуры складчатых зон и их обозначения: БЛ – Большеерецкое поднятие, СК – Срединно-Камчатский горст-антиклинорий, горсты: УН – Ункановичский, ГП – Ганальско-Петропавловский, ПР – Прибрежный; 5 – допозднемиоценовые метаморфические комплексы; 6 – интрузивные образования преимущественно среднего и кислого состава; 7 – границы Начикинской зоны поперечных дислокаций; 8 – границы Центрально-Камчатской глубинной шовной зоны; 9 – главные разломы, выходящие на дневную поверхность (а) и перекрытые вышележащими образованиями (б); 10 – вулкано-тектонические структуры: Кр – Карымшинская, Пт – Плотниковская, Кт – Китхойская, Ах – Ахомтенская (а), контуры палеовулкана сопки Горячей (б); 11 – границы (а – уверенные, б – предпологаемые) коровых и коромантийных аномально-низкоомных зон, выделенных по данным МТЗ и их номера: 1 – зона плавления и циркуляции гидротермальных растворов – Толмачевский активный магматический центр, 2 – зона плавления в районе вулканов Горелый, Мутновская Сопка, Вилучинская Сопка; 3 – зона высокой флюидонасыщенности в районе Авачинско-Корьякской группы вулканов; 12 – вулканы потухшие (а), действующие (б); 13 – месторождение Порожистое (а) и рудопроявления (б) золота, источники и месторождения термоминеральных вод (в); 14 – точки наблюдений и их номера на профиле п. Апача – бух. Мутная: МОВЗ (а), МТЗ (б), совмещённые точки МОВЗ-МТЗ (в); линия геоплотностного моделирования (г); точки МОВЗ на профиле г. Опала – р. Вахиль (д).

Краткая характеристика района исследований

Обзор региональных геолого-геофизических исследований подробно изложен в публикациях (Нурмухамедов, 2017; Nurmukhamedov, Sidorov, 2019). Профиль п. Апача – бух. Мутная пересекает территорию, изученную геологической, гравиметрической и аэромагнитной съёмками м-ба 1:200 000 и её значительную часть – геологической и аэромагнитной м-ба 1:50 000. На основе этих данных построена структурно-формационная карта Южной Камчатки (Апрелков, Ольшанская, 1986) и подготовлена тектоническая схема м-ба 1:1 000 000 с элементами глубинного строения земной коры (Нурмухамедов, 2013), фрагмент которой представлен на рис. 1.

Профиль с северо-запада на юго-восток пересекает две складчатые зоны: Корьякско-Западно-Камчатскую зону и Восточно-Камчатскую подзону

Олюторско-Восточно-Камчатской зоны. На западе площади расположен фрагмент Центрально-Камчатской глубинной шовной зоны – зоны приращения островодужных блоков (палеодуг) в эоцене (Селиверстов, 2009; Шапиро и др., 2009) к Палеокамчатке. Северо-восточную часть площади занимает Начикинская зона поперечных дислокаций (ЗПД), для которой характерны разрывные нарушения северо-западного простирания. Значительная часть территории охвачена ареальным вулканизмом, распространённым к югу от широты рек Паратунки и Карымчины (Геологическое строение..., 1980).

Профиль проходит вблизи юго-западной границы Карымшинской вулкано-тектонической структуры (ВТС) и пересекает Ахомтенскую ВТС. В центральной части Карымшинской ВТС находится плиоценовый палеовулкан с центром сопки Горячей. По периметру палеовулкана расположены термоминеральные источники и Больше-Банное

месторождение пароводяной смеси. На значительной части территории в районе Карымшинского рудного узла наблюдается активная гидротермальная деятельность. Описываемый район характеризуется увеличением мощности земной коры до 40–45 км на фоне 32–35 км. Утолщение коры объясняется увеличением мощности переходного слоя между корой и верхней мантией в районе действующих вулканов и зон ареального вулканизма (Балеста, Гонтова, 1985). Такие места (Нурмухамедов, 2017; Nurmukhamedov, Sidorov, 2019) обладают высокой проницаемостью и наличием мощного теплового потока. Ближе к верхним слоям коры поток локализуется, его плотность увеличивается, что приводит к формированию очаговой области плавления (Нурмухамедов, Смирнов, 1985).

На юге Камчатки активно протекают современные геодинамические процессы. В 1987–1988 гг. в районе ТАМЦ зафиксирован рой слабых ($M \leq 5$) землетрясений (рис. 2), получивший название Толмачёвской эпицентральной зоны (ТЭЗ) (Нурмухамедов, 2017).

В плане ТЭЗ совпадает с участком максимальной плотности шлаковых конусов и зоной высокой проницаемости. Глубина гипоцентров землетрясений около 8 км. Вероятно, землетрясения связаны с продвижением магмы (Nurmukhamedov, Sidorov, 2019). Косвенно об этом свидетельствует приуроченность ТЭЗ к предполагаемой зоне плавления. Миоценовые интрузии среднего и кислого составов (рис. 1) связаны с крупным интрузивным массивом, сформированным в ослабленной зоне (Нурмухамедов, 2017).

В районе ТАМЦ электроразведкой МТЗ вдоль профиля г. Опала – р. Вахиль, в интервале глубин 10–35 км,

выявлена контрастная аномалия электропроводности (5 Ом·м на фоне 500–1000 Ом·м). По мнению авторов (Мишин, 1996; Мороз и др., 1995; Нурмухамедов, Смирнов, 1985) аномалия обусловлена циркуляцией в земной коре гидротермальных растворов и наличием зон плавления. В геолого-геофизической модели вдоль профиля г. Опала – р. Вахиль (Nurmukhamedov, Sidorov, 2019), в центральной части ТАМЦ выделен блок земной коры, насыщенный интрузиями основного и ультраосновного состава. С востока, на глубине 8–27 км, к нему примыкает интрузивный массив преимущественно средне-среднекислого состава, от которого по ослабленным зонам в верхние слои внедрены апофизы (рис. 1).

Методика исследований

Полевые наблюдения МОВЗ на профиле п. Апача – бух. Мутная выполнены по стандартной методике (Померанцева, Мозженко, 1977). На 43 пунктах осуществлялась трехкомпонентная регистрация сейсмических волн. Расстояние между пунктами 2,5–5,0 км. Регистрация сейсмических событий реализована в режиме «по обнаружению». Продолжительность одной стоянки составляла от 20 до 30 суток, что обеспечило необходимый набор информации для выделения границ обмена. В процессе работ использовался аппаратный комплекс «Черепаша». Методика полевых работ, интерпретации и переинтерпретации данных МОВЗ освещены в статье (Нурмухамедов, Неядько и др., 2016). Современный вариант разреза МОВЗ по профилю п. Апача – бух. Мутная, совмещенный с плотностной моделью, представлен на рис. 3.

Полевые наблюдения методом МТЗ проведены по стандартной методике (Мороз и др., 1995; Нурмухамедов, Мороз, 2008–2009) с использованием цифровой электроразведочной станции ЦЭС-2. Всего выполнено 56 точек зондирования, из них в половине пунктов осуществлялась регистрация 4-х компонент (E_x, E_y, H_x, H_y) магнитотеллурического поля (МТ-поля) в диапазоне периодов 0,1–100 с. В каждой 2-ой точке МТЗ, совмещенной с точкой МОВЗ, добавлялась регистрация пятой компоненты (H_z). В совмещенных точках диапазон вариаций МТ-поля расширен до 1000 с. Первичная обработка данных МТЗ осуществлена в Вычислительном Центре ЕГФЭ ПГО «Камчатгеология». Решение обратной задачи выполнено с использованием двумерного численного моделирования МТ-поля (Юдин, Казанцев, 1977) в Лаборатории геофизических полей Института Вулканологической Геологии и Геохимии ДВО РАН.

В процессе моделирования использовались регионально-продольные кривые, поскольку они практически свободны от индукционного влияния, формируемого в акваториях Охотского моря и Тихого океана (Мороз, Мороз, 2011). Перед процедурой моделирования по профилю п. Апача – бух. Мутная выделено 6 зон, характеризующихся конформными, но отличающимися по уровню сопротивления кривыми МТЗ. Различный уровень указывает на латеральную неоднородность верхней части разреза, что приводит к возникновению сильных гальванических приповерхностных эффектов. С целью их подавления были рассчитаны среднестатистические кривые для каждой зоны. Для формирования стартовой модели по профилю п. Апача – бух. Мутная использовалась ранее

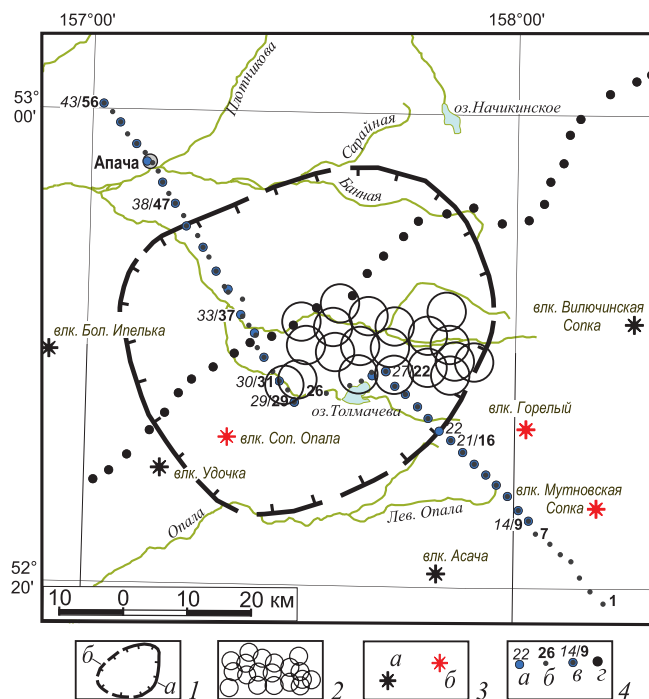


Рис. 2. Рой землетрясений в Толмачёвской эпицентральной зоне – по материалам (Нурмухамедов, 2017; Nurmukhamedov, Sidorov, 2019). 1 – границы ТАМЦ: уверенные (а), предполагаемые (б); 2 – эпицентры местных землетрясений (данные за 1987–1988 гг.); 3 – вулканы потухшие (а), действующие (б); 4 – точки наблюдений и их номера на профиле п. Апача – бух. Мутная: МОВЗ (а), МТЗ (б), совмещённые точки МОВЗ-МТЗ (в), точки МОВЗ на профиле г. Опала – р. Вахиль (г).

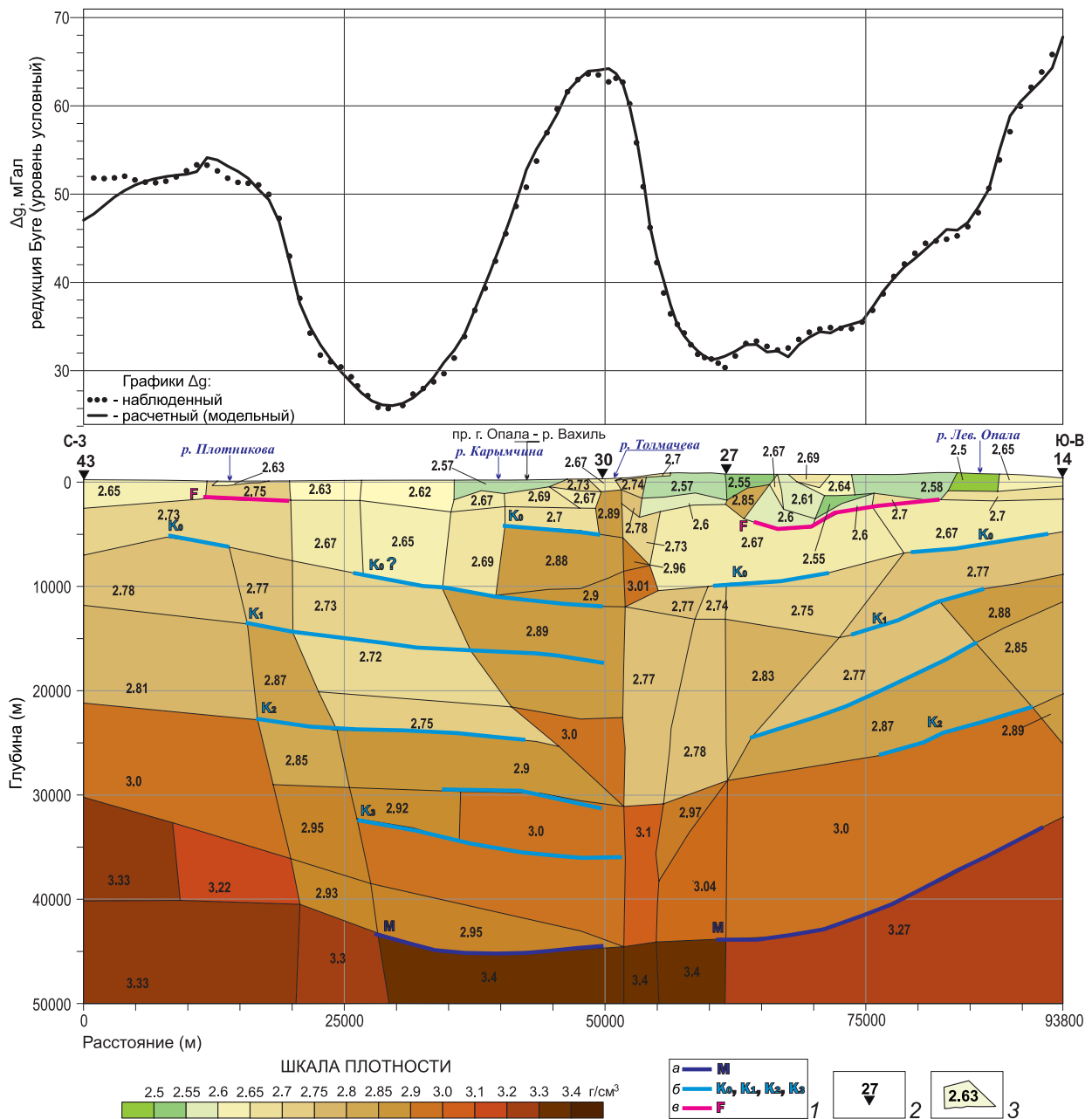


Рис. 3. Глубинная плотностная модель вдоль профиля п. Анача – бух. Мутная. 1 – сейсмические границы по данным МОБЗ (а – граница Мохоровичича; б, в – другие сейсмические границы, выделенные в земной коре); 2 – точки МОБЗ и их номера; 3 – границы блоков и среднее для них значение плотности (г/см³).

разработанная нормальная глубинная модель Южной Камчатки (Мороз и др., 1995).

В ходе итерационного подбора элементов модели достигнута удовлетворительная сходимость между среднестатистическими экспериментальными и расчётными кривыми МТЗ (рис. 4) для каждой зоны геоэлектрической модели (рис. 5). Модель показывает распределение электропроводности в земной коре и верхней мантии и согласуется с геоэлектрической моделью по профилю г. Опала – р. Вахиль (Мороз и др., 1995; Мишин, 1996) в зоне их пересечения.

Для изучения распределения плотности пород в земной коре и верхней мантии выполнено двумерное плотностное моделирование (рис. 3) с использованием материалов гравиметрической съемки м-ба 1:200 000. Ранее моделирование выполнено по профилю г. Опала – р. Вахиль. Результаты опубликованы в статье (Nurmukhamedov,

Sidorov, 2019). Исходным каркасом модели послужили границы и разломы, выделенные по результатам переинтерпретации данных МОБЗ. Априорные значения плотности верхних слоев разреза определены по геологическим образованиям, выходящим на дневную поверхность. Для глубинных слоев значения плотности взяты из опубликованных источников. Для верхнемеловых отложений значение плотности принято равным 2,67 г/см³, для гранито-метаморфического («гранитного») слоя – 2,64-2,8 г/см³, для нижней коры («базальтового» слоя) – 2,80-3,07 г/см³ и для верхней мантии – 3,30 г/см³. Указанные плотности приняты в качестве исходных данных для итерационного подбора модели. В процессе моделирования использовался пакет программ Geosoft (GMSYS, Oasis Montaj, Grav/Mag Interpretation, 3D Euler, MAGMAP filtering), где реализована возможность учёта рельефа местности и аппроксимации сечений тел контурами сложной

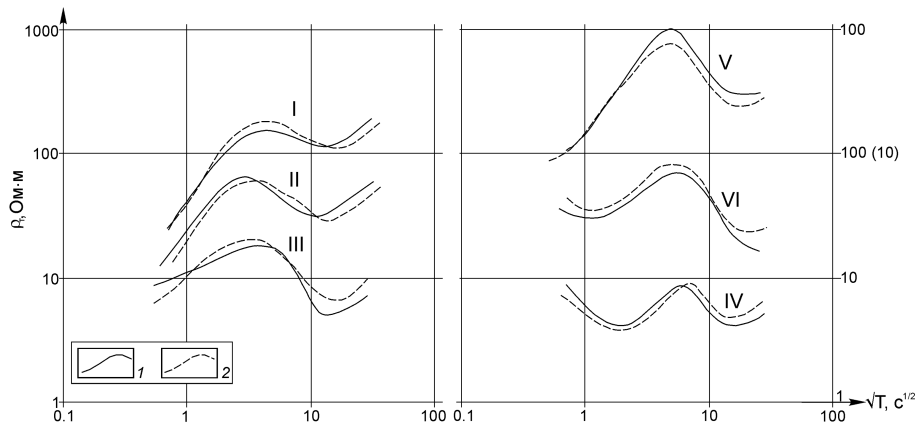


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных (1) и расчётных (2) кривых МТЗ для геоэлектрической модели, представленной на рис. 5

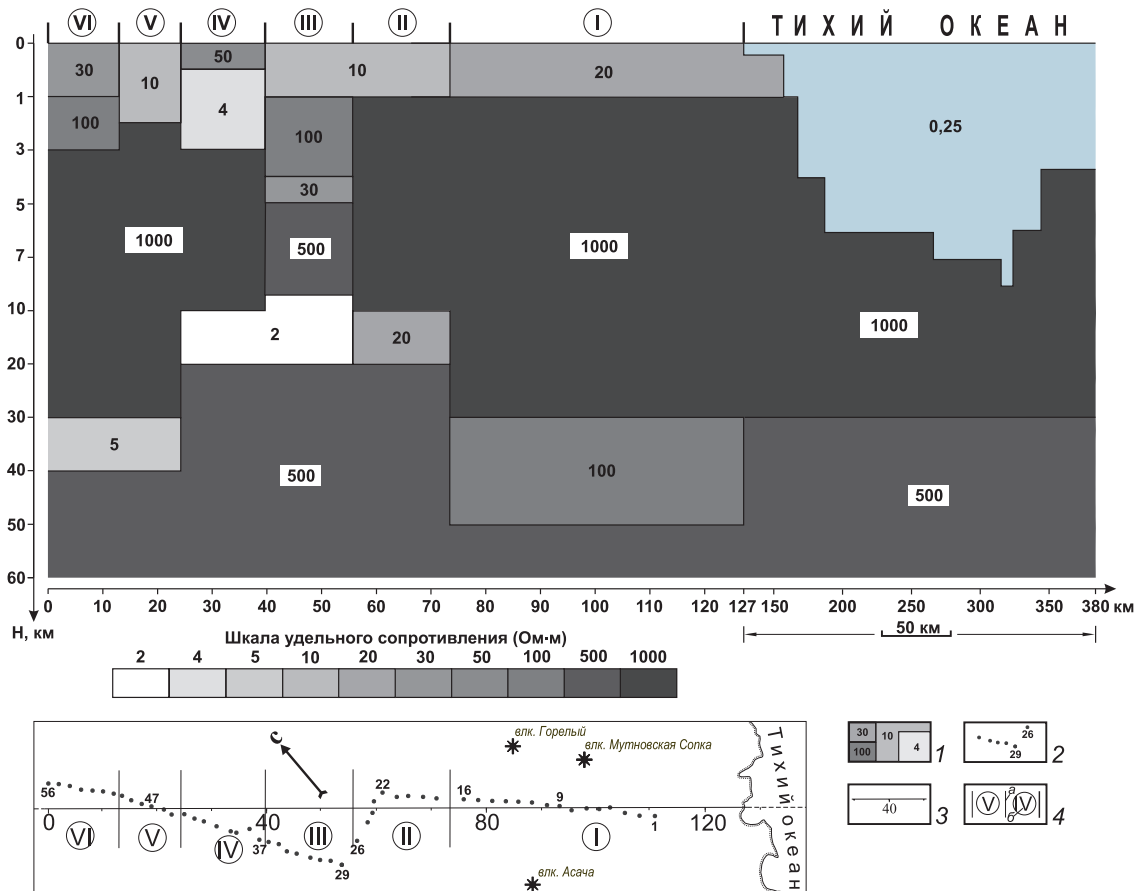


Рис. 5. Двумерная геоэлектрическая модель земной коры и верхней мантии вдоль профиля п. Апача – бух. Мутная. 1 – блоки, характеризующиеся различным уровнем удельного сопротивления в Ом·м; 2 – точки наблюдений МТЗ и их номера; 3 – линия моделирования и её разметка в километрах; 4 – границы зон моделирования (а) и их номера (б).

конфигурации. Методика моделирования изложена в статьях (Сидоров, 2014, 2015).

В результате комплексной интерпретации построена глубинная геолого-геофизическая модель (рис. 6), в которой выделены: граница Мохоровичича (М), отделяющая земную кору от верхней мантии; граница K_2 , отделяющая верхнюю кору от нижней; кровля консолидированной коры (K_0) – кристаллического фундамента; кровля верхнемелового комплекса пород (F). Кроме этого, выделены другие границы в земной коре (K_1, K_3). Между границами заключены слои, соответствующие (сверху вниз) кайнозойскому вулканогенно-осадочному чехлу, мезозойскому комплексу пород, гранито-метаморфическому

(«гранитному») и гранулитно-базитовому («базальтовому») слоям. В самой нижней части модели выделен верхнемантийный слой. Всю толщу пронизывают коровые и корово-мантийные разломы, делящие земную кору и верхнюю мантию на отдельные блоки. В зоне пересечения профилей г. Опала – р. Вахиль (Nurmukhamedov, Sidorov, 2019) и п. Апача – бух. Мутная отмечено принципиальное сходство геолого-геофизических моделей.

Анализ геолого-геофизической модели, обсуждение результатов

Приступая к анализу модели подчеркнём, что авторы называют границу обмена волн K_2 границей, делящей

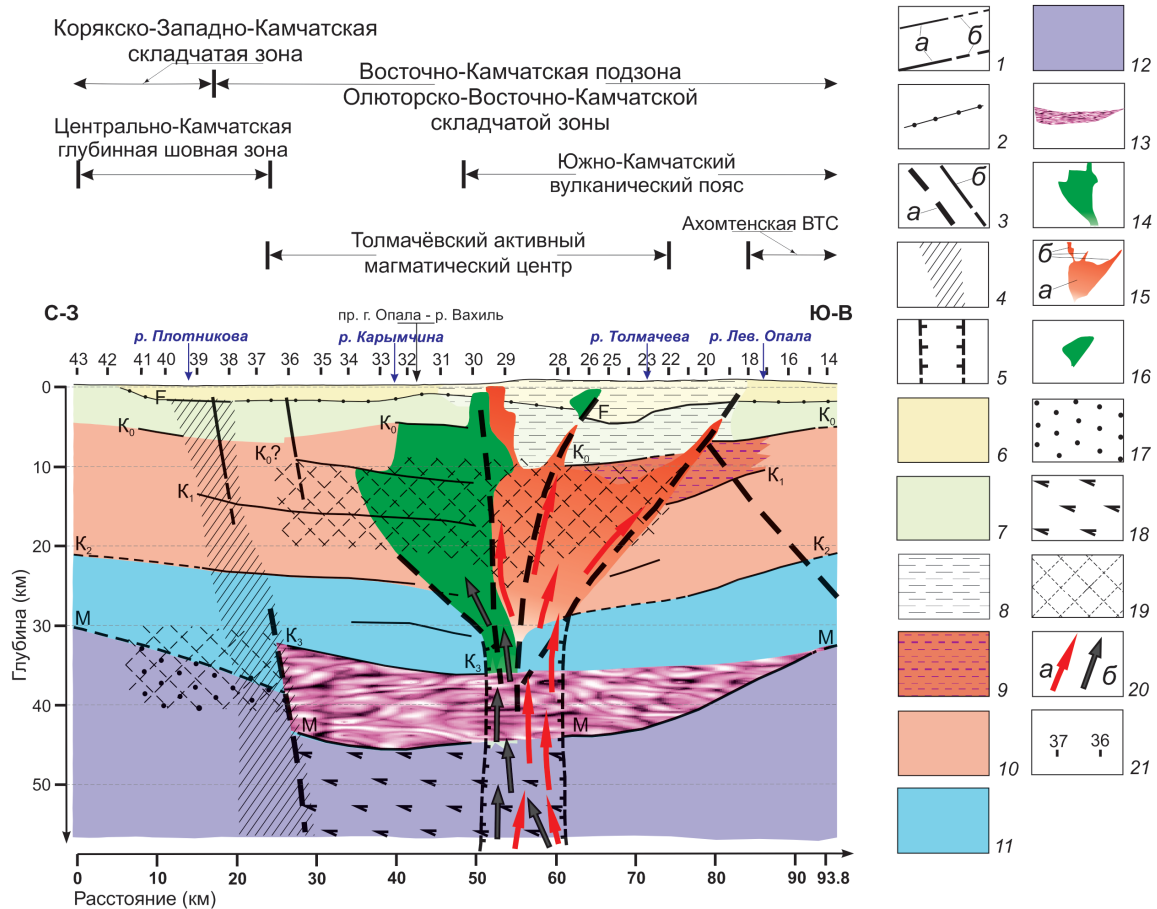


Рис. 6. Геолого-геофизическая модель вдоль профиля п. Апача – бух. Мутная. 1 – границы по данным МОВЗ: уверенные (а), предполагаемые (б), отождествляемые с кровлей верхнемелового комплекса пород (F), кровлей консолидированной коры (K₀), границей между верхней и нижней корой (K₂), границей Мохоровичича (M), прочими границами в земной коре (K₁, K₃); 2 – кровля верхнемелового комплекса пород, по данным МТЗ; 3 – разрывные нарушения по данным МОВЗ (а) и геологическим данным (б); 4 – субвертикальная зона, выделенная по результатам плотностного моделирования, отождествляемая с осевой частью Центрально-Камчатской глубинной шовной зоны; 5 – зона отсутствия корреляции границ обмена; 6 – кайнозойский вулканогенно-осадочный комплекс пород; 7 – мезозойский комплекс пород; 8 – гидротермально измененный мезокайнозойский комплекс пород; 9 – верхний слой метаморфических комплексов преимущественно в зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фациях; 10 – гранито-метаморфический («гранитный») слой верхней коры; 11 – гранулит-базитовый («базальтовый») слой нижней коры; 12 – верхняя мантия; 13 – предполагаемое положение переходного слоя между земной корой и верхней мантией; 14 – блок земной коры, насыщенный интрузиями основного и ультраосновного состава; 15 – интрузивный массив (а) и его апофизы (б) преимущественно средне-среднекислого состава; 16 – интрузия основного состава; 17 – участок разуплотнения (3,22 г/см³ на фоне 3,33 г/см³) в верхней мантии, совпадающий с аномально низкоомной зоной (5 Ом·м на фоне 500-1000 Ом·м); 18 – участок повышенной плотности (3,4 г/см³) в верхней мантии, предположительно перидотит-экологитового состава; 19 – коровая и коромантийная аномалии электропроводности (соответственно 2-20 и 5 Ом·м на фоне 500-1000 Ом·м); 20 – направление предполагаемых тепловых потоков (а) и магматических расплавов (б); 21 – пункты наблюдений МОВЗ и их номера.

земную кору на верхнюю и нижнюю части (Нурмухамедов и др., 2016). Учитывая информацию по Кольской сверхглубокой скважине (Кольская сверхглубокая..., 1998; Шаров, 2017) и другим научным публикациям, названия слоев «гранитный» и «базальтовый» заключают в кавычки, подразумевая их определенную условность.

По сравнению с другими региональными профилями на территории Камчатки профиль п. Апача – бух. Мутная имеет незначительную протяженность. Выделить системные изменения в строении земной коры и верхней мантии на столь коротком отрезке сложно. Картину глубинного строения по данным МОВЗ существенно дополняют результаты плотностного моделирования. Так, например, выделенные, но не прослеженные на большие расстояния границы по МОВЗ, далее продолжены в виде контактов слоев и блоков с различной плотностью. Анализ полученных данных указывает на то, что результаты плотностного

моделирования не противоречат сложившимся представлениям о плотностных характеристиках слоев литосферы.

В модели (рис. 6) мощность земной коры вдоль профиля меняется от 30-33 км на краях до 44-46 км, в её центральной части. Морфология границы K₂ в основном повторяет морфологию раздела М. При этом, мощность «гранитного» слоя стабильно больше «базальтового». Такая кора относится к коре континентального типа (Косминская, 1958). Значительное увеличение глубины до границы М в центре модели можно объяснить наличием в этом месте «раздутого» переходного слоя между земной корой и верхней мантией. Если принять за кровлю слоя раздел K₃, то его предполагаемая мощность составит порядка 10 км. Как видно из модели, в юго-восточном направлении слой постепенно выклинивается, а в северо-западном его распространение ограничено Центрально-Камчатской глубинной шовной зоной. Плотностные

характеристики пород в зоне переходного слоя практически не отличаются от плотности нижней части «базальтового» слоя, но северо-западнее его середины выделяется блок пониженной плотности – $2,95 \text{ г/см}^3$ на фоне $3,0 \text{ г/см}^3$. Далее, к северо-западу на глубине 30-40 км, выделена зона с аномально низким уровнем удельного сопротивления ($5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ на фоне 500-1000 Ом·м), совпадающая с локальным участком разуплотнения в верхней мантии ($3,22 \text{ г/см}^3$ на фоне $3,33 \text{ г/см}^3$). Возможно, аномальный участок сформирован в результате взаимодействия литосферных блоков в процессе причленения островодужных блоков к Палеокамчатке (Селиверстов, 2009; Шапиро, Соловьев, 2009).

В самой нижней части модели плотность отдельных фрагментов (рис. 3) варьирует в пределах от $3,27 \text{ г/см}^3$ до $3,33 \text{ г/см}^3$, что соответствует представлениям о плотности пород верхней мантии – перидотитам. Там, где граница М опускается на максимальную глубину (МОВЗ 27-36), выделяется блок с высоким значением плотности – $3,4 \text{ г/см}^3$, что по А.Э. Рингвуду (Рингвуд, 1972) соответствует перидотитам и «неизменным эклогитам» ($3,4\text{-}3,65 \text{ г/см}^3$). Предполагается, что выделенный участок относится к участку эклогитизации пород верхней мантии, сформированной в зоне палеосубдукции океанической литосферы под материковую (Нурмухамедов, Смирнов, 1985; Nurmukhamedov, Sidorov, 2019). Субдукционные процессы предшествовали причленению в эоцене относительно легких островодужных блоков к складчатой области Палеокамчатки.

В верхней части разреза уверенно выделяется кровля консолидированной коры (K_0), которая испытывает погружение от 4-5 км на краях модели до 10 км и более в её центральной части. В структурном плане данный участок совпадает с Толмачёвским активным магматическим центром. В целом, граница K_0 повторяет морфологию разделов K_2 и М. Выше по разрезу, на глубине около 4 км (МОВЗ 30-33) выделена граница, по своим характеристикам близкая к границе K_0 . Вопрос о том, к какому разделу отнести эти границы, остаётся открытым. На данном этапе исследований авторы склонны считать, что при общей тенденции погружения границы K_0 к центральной части модели, в районе ТАМЦ наблюдается выступ блока земной коры, насыщенного интрузиями основного и ультраосновного состава (рис. 6). Кровля этого блока совпадает с границей K_0 . Выше по разрезу отмечен плавный подъём границы F, который, очевидно, унаследован от указанного выступа. Необходимо отметить, что в этом же месте, над границей K_0 , в интервале глубин 4-5 км (рис. 5) выделен низкоомный, ограниченный в пространстве объект ($30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ на фоне 100-1000 Ом·м), который можно объяснить наличием здесь «разогретой» интрузии и/или зоны циркуляции термальных вод. Ниже расположена граница, помеченная индексом « $K_0?$ », которая отражает границу обмена волн внутри кристаллического фундамента. Сказанное согласуется с геолого-геофизической моделью по профилю г. Опала – р. Вахиль (Nurmukhamedov, Sidorov, 2019).

Доминантой модели является блок земной коры, насыщенный интрузиями основного и ультраосновного состава. В поле силы тяжести он выражен контрастным увеличением значений Δg (рис. 3). Как представляется авторам,

проникновение расплавов происходило по ослабленной зоне, образованной в коре, на ее границе с верхней мантией. В разрезе МОВЗ (Нурмухамедов, Недядько и др., 2016) в этом месте фиксируется зона отсутствия корреляции сейсмических границ, а в плотностной модели выделяется область с неоднородностями. Субвертикальная зона пронизывает горизонтально-слоистую среду коры и с глубины 30 км от неё веером расходятся разломы, которые являются путями миграции в верхнюю кору мантийного вещества (магмы, высокотемпературных флюидов) и мощных тепловых потоков (Nurmukhamedov, Sidorov, 2019).

К юго-востоку от описанного блока (МОВЗ 20-29) плотность среды соответствует породам среднего и среднекислого состава. В графике Δg наблюдается минимум поля силы тяжести (рис. 3), осложненный локальными малоамплитудными максимумами. Можно предположить здесь крупный интрузивный массив диорит-гранодиоритового состава. От массива отходят апофизы, часть которых обнажается на дневной поверхности (рис. 1). В разрезе область массива характеризуется отсутствием корреляции сейсмических границ с аномально низким уровнем удельного электрического сопротивления (УЭС) ($2\text{-}20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ на фоне 500-1000 Ом·м). Предполагается, что формирование массива связано с мощным тепловым потоком и образованием зон очагового плавления (Нурмухамедов, Смирнов, 1985; Нурмухамедов, 2017; Nurmukhamedov, Sidorov, 2019).

Продвижение магмы в верхние слои земной коры сопровождается роем слабых землетрясений (рис. 2), которые, вероятно, вызваны локальной системой напряжений, характерной для вулканических землетрясений (Зобин, 1979). Однако вблизи от указанного роя действующие вулканы отсутствуют. Речь может идти о формировании эруптивной трещины, или об «оживлении» уже существующей (Зобин, 1979) в зоне ареального вулканизма. Рой вытянут в субширотном направлении и находится вблизи Опалинско-Гореловского разлома, выделяемого по гравиметрическим данным (Апрелков и др., 1989).

В исследуемом районе существуют благоприятные условия для скопления подземных метеорных вод (Кононов и др., 1964; Краевой и др., 1976). Эти воды через зону инфильтрации вступают во взаимодействие с высокотемпературной средой очагов плавления и остывающих интрузий, о чем свидетельствует активная геотермальная деятельность в зоне интрузивного массива.

Выводы

1. Выполнено плотностное моделирование вдоль профиля п. Апача – бух. Мутная. В качестве исходных данных использовались результаты переинтерпретации материалов МОВЗ. Анализ полученных данных показывает, что результаты моделирования не противоречат сложившимся представлениям о плотностных характеристиках слоев литосферы. Основываясь на материалах МОВЗ, гравиразведки, МТЗ и других данных, вдоль профиля построена геолого-геофизическая модель земной коры и верхней мантии. В модели представлено уточненное положение основных разделов литосферы – подошвы коры, границы между гранулитобазитовой и гранито-метаморфической частями консолидированной коры, ее кровли. Земная кора вдоль профиля п. Апача – бух. Мутная соответствует коре

континентального типа. Отмечается хорошая сходимость моделей на пересечении профилей п. Апача – бух. Мутная и г. Опала – р. Вахиль.

2. Доминантой модели является высокоплотное образование – блок земной коры, насыщенный интрузиями основного и ультраосновного состава. Формирование блока связано с наличием активной проницаемой зоны между земной корой и верхней мантией. С юго-востока к блоку примыкает интрузивный массив средне-среднекислого состава. Формирование массива объясняется образованием участков очагового плавления.

3. Рой слабых землетрясений 1987-88 гг. совпадает с максимальной плотностью шлаковых конусов на поверхности и глубинной зоной высокой проницаемости между земной корой и верхней мантией. Возможно, эти землетрясения связаны с продвижением магмы в существующей эруптивной трещине или с формированием новой.

4. Район благоприятен для скопления метеорных вод, которые контактируют с высокотемпературной средой и постмагматическими растворами интрузий. Вероятно, эти обстоятельства способствовали образованию замкнутых гидротермальных систем и, как следствие, образованию рудопоявлений Карымшинского рудного узла.

5. Активные современные магматические процессы на юге Камчатки указывают на относительную молодость этой части полуострова в системе горно-складчатых сооружений всего Камчатского региона. Это отчетливо наблюдается в геолого-геофизических разрезах по профилям г. Опала – р. Вахиль и п. Апача – бух. Мутная.

Литература

- Апрелков С.Е., Ольшанская О.Н. (1986). Отчет по обобщению материалов гравиметрической съемки масштаба 1:200 000 с целью составления структурно-формационной карты Южной Камчатки масштаба 1:500 000. Елизово: ЕГФЭ, 303 с.
- Апрелков С.Е., Ольшанская О.Н. (1989). Тектоническое районирование Центральной и Южной Камчатки по геологическим и геофизическим данным. *Тихоокеанская геология*, 1, с. 53-65.
- Балеста С.Т., Гонтовая Л.И. (1985). Сейсмическая модель земной коры Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода в районе Камчатки. *Вулканология и сейсмология*, 4, с. 83-90.
- Геологическое строение, новейший вулканизм и современная структура Южной Камчатки. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. (1980). Отв. ред. Масуренко Ю.П. М.: Наука, с. 7-78.
- Зобин В.М. (1979). Динамика очага вулканических землетрясений. М.: Наука, 92 с.
- Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. (1998). Гл. ред. В. П. Орлов, Н. П. Лаверов. М.: «Технонефтегаз», 260 с.
- Кононов В.И., Поляк Б.Г. (1964). Большие Банные источники на Камчатке. *Гидрогеотермические условия верхних частей земной коры*. М.: Наука, с. 52-71. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-010003-6.50009-2>
- Косминская И.П. (1958). Строение земной коры по сейсмическим данным. *Бюл. МОИП*, 4, с. 145-147.
- Краевой Ю.А., Охалкин В.Г., Сержников А.И. (1976). Результаты гидрогеологических и геотермических исследований Большебанной и Карымчинской гидротермальных систем. *Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, с. 179-211.
- Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Лошинская Т.А. (1995). Магнитотеллурическое зондирование земной коры Южной Камчатки. *Вулканология и сейсмология*, 4-5, с. 127-138.
- Мишин В.В. (1996). Глубинное строение и типы земной коры юга Камчатки. *Тихоокеанская геология*, 1, с. 110-119.
- Мишин В.В. (1997). Геолого-геофизическое строение юга Камчатки. *Тихоокеанская геология*, 4, с. 64-70.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. (2011). Численное трёхмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки. *Физика Земли*, 2, с. 64-73. <https://doi.org/10.1134/S1069351311010071>
- Нурмухамедов А.Г., Смирнов В.С. (1985). Результаты глубинных электромагнитных исследований на Южной Камчатке. *Геология и*

полезные ископаемые Корякско-Камчатской складчатой области: *Мат. V Камчатской геологической конференции*. Петропавловск-Камчатский: КППО «Камчатгеология», с. 69-82.

Нурмухамедов А.Г., Мороз Ю.Ф. (2008). Особенности геологического строения северо-восточной части Корякско-Камчатской складчатой области по данным глубинных геофизических исследований. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1, вып. 11, с. 125-133.

Нурмухамедов А.Г., Мороз Ю.Ф. (2009). Глубинное строение северо-восточной части Корякско-Камчатской складчатой области по данным региональных геофизических исследований. *Геофизический журнал*, 31(3), с. 74-83.

Нурмухамедов А.Г. (2013). Отчет о результатах работ по объекту «Создание схемы сейсмостектонического районирования Корякско-Камчатской складчатой области на основе обобщения глубинных геолого-геофизических работ». Петропавловск-Камчатский: ОАО «Камчатгеология», 511 с.

Нурмухамедов А.Г., Неядько В.В., Ракитов В.А., Липатев М.С. (2016). Границы литосферы на Камчатке по данным метода обменных волн землетрясений. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1, вып. 29, с. 35-52.

Нурмухамедов А.Г. (2017). Банные и Карымчинские гидротермальные системы – источники энергии на юге Камчатки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, спец. вып. 32, с. 347-367. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-32-347-367>

Пак Г., Смирнов В.С., Апрельков С.Е. (1989). 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. ЕГФЭ ПГО «Камчатгеология», 236 с.

Померанцева И.В., Мозженко А.Н. (1977). Сейсмические исследования с аппаратурой «Земля». М.: Недра, 256 с.

Рингвуд А.Э. (1972). Состав и эволюция верхней мантии. *Земная кора и верхняя мантия*, 43, с. 7-26.

Селиверстов Н.И. (2009). Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 191 с.

Сидоров М.Д., Новаков Р.М. (2014). Плотностная модель зоны сочленения Камчатской и Алеутской островных дуг. *Региональная геология и металлогения*, 58, с. 59-65.

Сидоров М. Д. (2015). Плотностное моделирование магматических структур в Колпаковском перспективном никеленосном районе (Срединный массив, Камчатка). *Тихоокеанская геология*, 34(3), с. 31-41. <https://doi.org/10.1134/S1819714015030070>

Шапиро М.Н., Соловьёв А.В. (2009). Кинематическая модель формирования Олоторско-Камчатской складчатой области. *Геология и геофизика*, 50(8), с. 863-880. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.10.006>

Шаров Н.В. (2017). Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 173 с.

Юдин М.Н., Казанцев В.В. (1977). Программа расчета магнитотеллурического поля в двумерных слоистых средах, содержащих локальные неоднородности (Е- и Н-поляризация). *Библиотека программ для обработки геофизических данных на ЭВМ. Электроразведка*. М.: ВНИИГеофизика, с. 36.

Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D. (2019). Deep structure and geothermal potential along the regional profile set from Opala Mountain to Vakhil' River (Southern Kamchatka). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 249, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012041>

Сведения об авторах

Александр Гарифович Нурмухамедов – кандидат геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН Россия, 683002, Петропавловск-Камчатский, Северо-восточное шоссе, д. 30, а/я 56
E-mail: nurmukhamedov1949@mail.ru

Михаил Дмитриевич Сидоров – кандидат геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН Россия 683002, Петропавловск-Камчатский, Северо-восточное шоссе, д. 30, а/я 56

Юрий Федорович Мороз – доктор геол.-мин. наук, главный научный сотрудник лаборатории сейсмологии и геофизики, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
Россия 683006, Петропавловск-Камчатский,
бул. Пийпа, д. 9

Статья поступила в редакцию 03.06.2019;
Принята к публикации 19.09.2019;
Опубликована 30.03.2020

IN ENGLISH

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)

A.G. Nurmukhamedov^{1*}, M.D. Sidorov¹, Yu.F. Moroz²

¹Scientific Research Geotechnological Centre of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

²Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

*Corresponding author: Alexander G. Nurmukhamedov, e-mail: nurmukhamedov1949@mail.ru

Abstract. In the South of Kamchatka, modern geodynamic processes are actively taking place. A deep geological and geophysical model of the structure of the Earth's crust and upper mantle along the regional profile of the Apache Village-Mutnaya Bay in the zone of Tolmachevsky active magmatic center is presented. The profile passes near the South-Western border of the Karymshinskaya volcano-tectonic structure (VTS) and crosses the Ahomtenskaya VTS. The model created on the basis of integrated interpretation of materials of the earthquake converted-wave method (ECWM), gravity and magnetotelluric sounding (MTS). The thickness of the Earth's crust along the profile varies from 30-33 km at the edges reaching 44-46 km, in its central part. The dominant feature of the model is a high-density formation – a block of the Earth's crust, saturated with intrusions of the main and ultrabasic composition. The formation of the block is associated with a permeable zone between the crust and the upper mantle. In the block correlation of seismic boundaries is disturbed and in a density model the area with massive heterogeneity is allocated. A significant increase in depth to the M-Boundary in the center of the model is explained by the presence of a “bloated” transition layer between bark and mantle in this place. The thickness of the layer is about 10 km, and the density of the mantle reaches 3.4 g/cm³. It is assumed that this is a site of eklogization of breeds in a zone of paleosubduction of oceanic lithosphere under a continental. The area is favorable for the accumulation of meteor waters, which are in contact with high-temperature environment and postmagmatic solutions of intrusions, which leads to the formation of hydrothermal systems. The genetic connection of Karymshinsky gold-ore cluster with the intrusive array of medium-sour composition, allocated in the zone of the Tolmachevsky active Magmatic Center is shown.

Keywords: crust, upper mantle, transition layer, deep model, heat flow, ECWM, MTZ, South Kamchatka

Recommended citation: Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D., Moroz Yu.F. (2020). 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 = Georesources*, 22(1), pp. 63-72. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.63-72>

References

Aprelkov S.E., Olshanskaya O.N. (1986). Report on the generalization of gravimetric survey materials on a scale of 1: 200 000 with the aim of

compiling a structural-formation map of South Kamchatka on a scale of 1: 500 000. Elizovo: EGFE, 303 p. (In Russ.)

Aprelkov S.E., Olshanskaya O.N. (1989). Tectonic zoning of central and southern Kamchatka according to geological and geophysical data. *Tikhookeanskaya geologiya = Russian Journal of Pacific Geology*, 1, pp. 53-65. (In Russ.)

Balesta S.T., Gontovaya L.I. (1985). Seismic model of the Earth's crust of the Asia-Pacific transition zone in the Kamchatka region. *Vulkanologiya i seismologiya = Journal of Volcanology and Seismology*, 4, pp. 83-90. (In Russ.)

Geological structure, the latest volcanism and the modern structure of South Kamchatka. The long-lived center of endogenous activity of South Kamchatka. (1980). Ed. Masurenko Yu.P. Moscow: Nauka, pp. 7-78. (In Russ.)

Kola superdeep well. Scientific results and research experience. (1998). Ed. V.P. Orlov, N.P. Laverov. Moscow: Tekhnoneftegaz, 260 p. (In Russ.)

Kononov V.I., Polyak B.G. (1964). Big Bath springs in Kamchatka. Hydrogeothermal conditions of the upper parts of the Earth's crust. Moscow: Nauka, pp. 52-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-010003-6.50009-2>

Kosminskaya I.P. (1958). The structure of the Earth's crust according to seismic data. *Byul. MOIP*, 4, pp. 145-147. (In Russ.)

Kraevoy Yu.A., Okhapkin V.G., Serezhnikov A.I. (1976). The results of hydrogeological and geothermal studies of the Bolshebannaya and Karymshinsky hydrothermal systems. Hydrothermal systems and thermal fields of Kamchatka. Vladivostok: DVNTs AN SSSR, pp. 179-211. (In Russ.)

Moroz Yu.F., Nurmukhamedov A.G., Loshchinskaya T.A. (1995). Magnetotelluric sounding of the Earth's crust of South Kamchatka. *Vulkanologiya i seismologiya = Journal of Volcanology and Seismology*, 4-5, pp. 127-138. (In Russ.)

Mishin V.V. (1996). The deep structure and types of the Earth's crust in Southern Kamchatka. *Tikhookeanskaya geologiya = Russian Journal of Pacific Geology*, 1, pp. 110-119. (In Russ.)

Mishin V.V. (1997). Geological and geophysical structure of the South Kamchatka. *Tikhookeanskaya geologiya = Russian Journal of Pacific Geology*, 4, pp. 64-70. (In Russ.)

Moroz Yu.F., Moroz T.A. (2011). Numerical three-dimensional modeling of the magnetotelluric field of Kamchatka. *Fizika Zemli*, 2, pp. 64-73. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1069351311010071>

Nurmukhamedov A.G., Smirnov V.S. (1985). The results of in-depth electromagnetic research in South Kamchatka. *Proc. V Kamchatka Geological Conf.: Geology and minerals of the Koryak-Kamchatka folded region*. Petropavlovsk-Kamchatsky: KPGO Kamchatgeologiya, pp. 69-82. (In Russ.)

Nurmukhamedov A.G., Moroz Yu.F. (2008). Features of the geological structure of the northeastern part of the Koryak-Kamchatka folded region according to deep geophysical studies. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific Center». Earth Sciences*, 11(1), pp. 125-133. (In Russ.)

Nurmukhamedov A.G., Moroz Yu.F. (2009). The deep structure of the north-eastern part of the Koryak-Kamchatka folded region according to regional geophysical studies. *Geofizicheskiy zhurnal*, 31(3), pp. 74-83. (In Russ.)

Nurmukhamedov A.G. (2013). Creating a scheme of seismotectonic zoning of the Koryak-Kamchatka folded region based on a synthesis of deep geological and geophysical work. Report. Petropavlovsk-Kamchatsky: OAO «Kamchatgeologiya», 511 p. (In Russ.)

Nurmukhamedov A.G., Nedyad'ko V.V., Rakitov V.A., Lipat'ev M.S. (2016). The boundaries of the lithosphere in Kamchatka according to the method of exchange waves of earthquakes. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific Center»*. *Earth Sciences*, 29(1), pp. 35-52. (In Russ.)

Nurmukhamedov A.G. (2017). Bath and Karymchinsk hydrothermal systems are energy sources in the south of Kamchatka. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining informational and analytical bulletin*, spec. is. 32, pp. 347-367. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-32-347-367>

Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D. (2019). Deep structure and geothermal potential along the regional profile set from Opala Mountain to Vakhil' River (Southern Kamchatka). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 249, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012041>

Pak G., Smirnov V.S., Aprelkov S.E. (1989). Results of geophysical surveys at the Petropavlovsk-Shipunsky prognostic testing ground and regional geophysical profile of the bay Mutnaya-p. Apache. Report of the Kamchatka Integrated Geophysical Party for regional studies conducted in South Kamchatka under the program for forecasting earthquakes and volcanic eruptions in 1987-1989. EGFE PGO "Kamchatgeologiya", 236 p. (In Russ.)

Pomerantseva I.V., Mozzhenko A.N. (1977). Seismic surveys with the equipment «Earth». Moscow: Nedra, 256 p. (In Russ.)

Ringvud A.E. (1972). Composition and evolution of the upper mantle. *Earth's crust and upper mantle*, 43, pp. 7-26. (In Russ.)

Seliverstov N.I. (2009). Geodynamics of the junction zone of the Kuril-Kamchatka and Aleutian island arcs. Petropavlovsk-Kamchatskiy: KamGU, 191 p. (In Russ.)

Sidorov M.D., Novakov R.M. (2014). Density model of the junction zone of Kamchatka and Aleutian island arcs. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*, 58, pp. 59-65. (In Russ.)

Sidorov M. D. (2015). Density modeling of magmatic structures in the Kolpakovsky promising nickel-bearing region (Sredinny massif, Kamchatka). *Tikhookeanskaya geologiya = Russian Journal of Pacific Geology*, 34(3), pp. 31-41. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1819714015030070>

Shapiro M.N., Solov'ev A.V. (2009). Formation of the Olyutorsky-Kamchatka foldbelt: A kinematic model. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 50(8), pp. 668-681. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.10.006>

Sharov N.V. (2017). Lithosphere of Northern Europe according to seismic data. Petropavodsk: Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN, 173 p. (In Russ.)

Yudin M.N., Kazantsev V.V. (1977). The program for calculating the magnetotelluric field in two-dimensional layered media containing local inhomogeneities (E and H polarization). Library of programs for processing geophysical data on a computer. Electric prospecting. Moscow: VNI Geophysics, 3 p. (In Russ.)

Zobin V.M. (1979). The dynamics of volcanic earthquakes origin. Moscow: Nauka, 92 p. (In Russ.)

About the Authors

Alexandr G. Nurmukhamedov – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher

Scientific Research Geotechnological Centre of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

30, Severo-Vostochnoe highway, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002, Russian Federation

E-mail: nurmuxamedov1949@mail.ru,

Mikhail D. Sidorov – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher

Scientific Research Geotechnological Centre of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

30, Severo-Vostochnoe highway, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002, Russian Federation

Yury F. Moroz – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Chief Researcher of the Laboratory of seismology and geophysics

Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

9, Piip boul., Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russian Federation

Manuscript received 3 June, 2019;

Accepted 19 September, 2019; Published 30 March 2020