

ПЛОТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ КАМЧАТСКОЙ И АЛЕУТСКОЙ ОСТРОВНЫХ ДУГ

Создана объемная плотностная модель блока земной коры в зоне сочленения Камчатской и Алеутской островных дуг, описана технология ее создания. Охарактеризованы глубинные плотностные неоднородности и связь их с Хавывенским погребенным поднятием, Уколкинской впадиной и Тюшевским прогибом. Модель дает возможность прогнозировать продолжение структур на глубину, определять их размеры и форму, выявлять скрытые геологические образования, недоступные изучению с поверхности. Установлены вероятное положение корневой зоны аллохтона Кротонского гипербазитового массива и возможное положение аналогичных незэродированных интрузий.

Ключевые слова: *плотность, модель, аномалия, поднятие, островная дуга.*

Three-dimensional density model of crustal block in conjunction zone of Kamchatka and Aleutian island arcs was made. The technology of model development was described. Deep density irregularities and their connection with surface structures were characterized: Havyvensky buried high, Ukolkinskaya cavity and Tyushevsky downwarping. Model gives the possibility to forecast structures extension to the deep, determine their size and form, discover hidden geological formations inapproachable for research from the surface. Probable position of allochthon root of Krotonsky hyperbasite massive and possible position of analogous non-eroded intrusions were determined.

Keywords: *density, model, depression, elevating, island-arc.*

Район исследований охватывает пространство в междуречье Камчатки — Еловки — Озерной между полуостровами Камчатский и Озерной. Этот блок земной коры находится на сочленении Камчатской и Алеутской островных дуг, имеет сложное геологическое строение и включает северную часть хр. Кумроч, вулкан Шивелуч, межгорные депрессионные структуры (рис. 1). Существующие модели глубинного строения обычно базируются на качественной интерпретации региональных геофизических и геологических съемок, тематических исследований, характеризующих небольшие площади. Район расположен на сочленении океанических и континентальной литосферных плит. На суше и шельфе расположены разнородные ранжированные тектонические структуры, имеющие сложное внутреннее геологическое строение. Многие структуры верхнего этажа коры являются следствием взаимодействия литосферных плит и связаны с особенностями глубинного строения региона.

Для более полного понимания внутреннего строения блока и взаимоотношений со структурами верхнего яруса необходима детализация глубинного строения. К сожалению, глубинными зондированиями район практически не изучен. Имеются только три профиля МОВЗ—МТЗ, которые расположены по периметру блока [6, 7]. Один субширотный профиль проходит по долине р. Камчатка до мыса Африка, другой севернее р. Озерная, третий связывает предыдущие два в меридиональном направлении по долине р. Еловка от места ее слияния с р. Камчатка (рис. 1). Основным источником информации о плотностных неоднородностях является аномальное гравитационное поле. Численные значения плотности можно рассчитать, применяя метод плотностного моделирования на отдельных профилях. Границы, выделенные по МОВЗ, являются априорными для построения на-

чальных моделей разрезов. При достаточно густой сети геоплотностных разрезов и данных о плотности горных пород создается объемная плотностная модель.

Методика геоплотностного моделирования. Плотностное моделирование состоит из двух основных этапов: создание первоначальной (исходной) плотностной модели геофизического разреза и его корректировки по результатам сравнения вычисленной теоретической аномалии с графиком аномалии по показаниям приборов. Концепция моделирования основана на представлениях о слоисто-блоковом строении земной коры и региональном распространении основных границ раздела внутри нее (Мохо, кровли консолидированной коры и др.). В начальных моделях в качестве глубинных разделов между блоками взяты сейсмические границы МОВЗ, границы между участками с разным сопротивлением по данным МТЗ. Для самой верхней части коры выделение геоблоков проведено по геологической карте м-ба 1 : 1 000 000 [6, 7]. Учитывая невозможность выделения в верхах геологического разреза «тонких» слоев (в масштабе модели), но оказывающих существенное влияние на поле силы тяжести в его локальной компоненте, был применен принцип эквивалентности (объединение нескольких маломощных слоев в один и придание ему усредненной плотности). Дополнительная априорная информация о глубинной части разреза получена в результате количественной интерпретации гравитационного поля методом определения особых точек в 2D и 3D вариантах. Профильный вариант основан на использовании теории функций комплексного переменного и не требует априорных геологических данных о возмущающих объектах. Основным принципом метода является локализация особенностей интерпретируемого поля путем

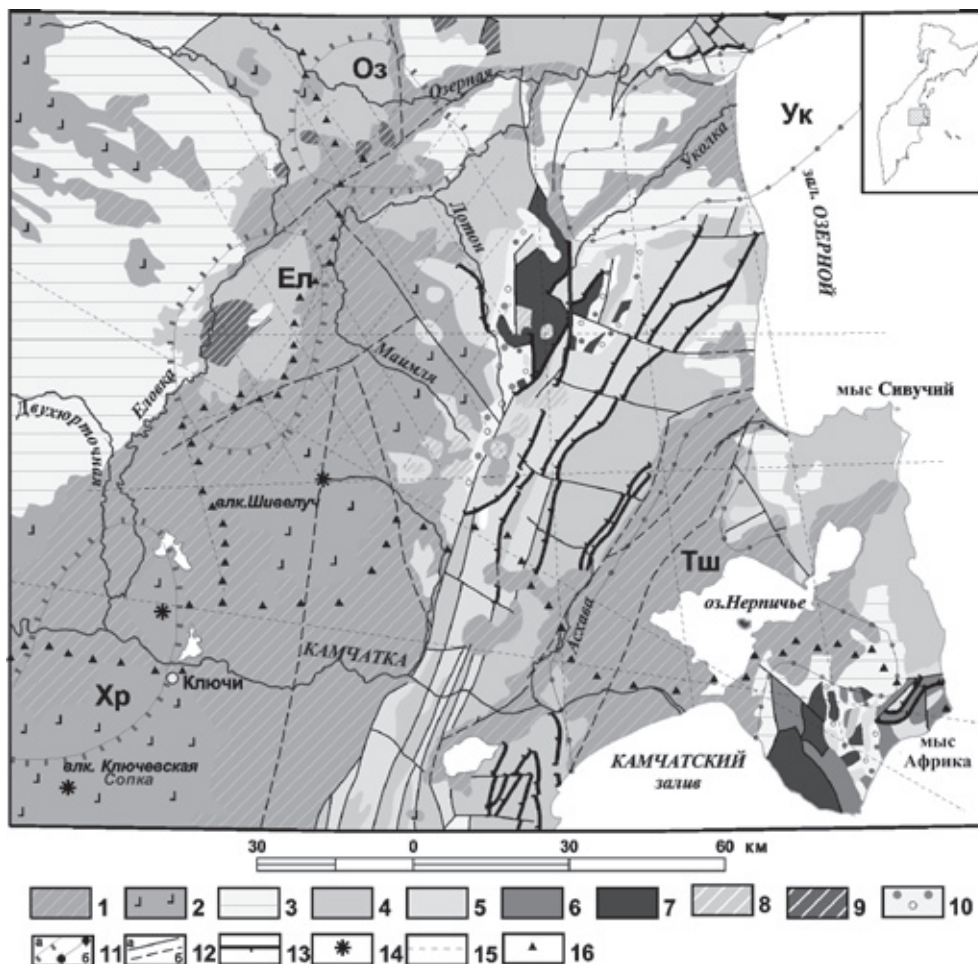


Рис. 1. Геологическая карта междуречья Камчатка–Еловка–Озерная (сост. по материалам ГГК-1000 [6, 7] с упрощениями)

1, 2 – отложения четвертичного возраста рыхлые (1), вулканические (2); 3–6 – вулканогенные, вулканогенно-осадочные и осадочные отложения неогенового (3), палеогенового (4), позднего мел-палеогенового (5), ранне-позднемелового (6) возрастов; 7 – позднемеловой Карагинский плутонический комплекс габбро-дунит-гарцбургитовый; 8, 9 – субвулканические тела диоритовых порфиров, андезитов четвертичного возраста (8), сложного состава от базальтов, андезитов и диоритов до монцодиоритов и кварцевых сиенитов палеогенового возраста (9); 10 – полимиктовый серпентинитовый меланж; 11 – аномалии и структуры: а – максимумы поля силы тяжести (Оз – Озерновский, Ел – Еловский, Хр – Харчинский), б – впадины и прогибы (Ук – Уколкинская, Тш – Тюшевский); 12 – разломы достоверные (а), скрытые под вышележащими отложениями (б); 13 – надвиги; 14 – вулканы; 15 – геоплотностные разрезы; 16 – пункты МОБЗ

разделения его на локальные аномалии, вызванные одиночным объектом или его частью (особой точкой) с подавлением влияния других окружающих точек до пренебрежимо малой величины. Локализация достигается применением специальных интегральных преобразований исходного поля с параметрами M и N_i , аналогичных $(M-1)$ -кратному дифференцированию поля на уровне N_i с последующим использованием отношений этих преобразований при трех последовательных значениях параметра M в комплексной форме (для определения численных значений параметров возмущающих объектов). Результатом интерпретации является нахождение координат устойчивых особых точек, которые характеризуют расположение на профиле-разрезе углы ($P = 1$) объектов большой горизонтальной и вертикальной мощности, кромки маломощных тел ($P = 2$), центры круговых горизонтальных цилиндров или тел изометричной формы ($P = 3$), углов наклона граней. В профильном варианте особые точки вычислены с помощью программы OSG (Рудеофизика). Для интерпретации в трехмерном варианте использован модуль 3D Euler из пакета Oasis Montaj (Geosoft). Программа позволяет на-

ходить координаты особых точек, группируемых по структурному индексу, который может быть соотнесен с определенным классом геологических тел (по геометрической форме): дайки, силлы, вертикальные и горизонтальные линзовидные тела, пласты, трубообразные тела. Алгоритм основан на решении уравнений Эйлера для ограниченной области пространства потенциального поля и его градиентов, в котором определяется степень однородности (структурный индекс).

Построенная таким образом модель представляет собой предполагаемый гипотетический глубинный разрез земной коры, аппроксимированный многоугольниками, которые представляют собой сечения бесконечных (либо ограниченных по простиранию) призм. Каждой призме определена средняя плотность в соответствии с геологическим смыслом (известным или предполагаемым) и установленными физическими свойствами горных пород.

На втором этапе проведено вычисление теоретической аномалии с шагом 1 км и сравнение ее с полученным графиком. В точках профиля, где отмечаются существенные отклонения теоретической аномалии от практической, проводится корректи-

ровка геометрии разреза и плотности. Процедура проводится многократно до максимального совпадения графиков.

Расчеты проведены программным модулем GM-SYS из пакета Oasis Montaj (Geosoft) в вариантах 2D и 3/4D. Ограничение 3/4D по простиранию перпендикулярно к профилю накладывалось на тела предполагаемых интрузий (по градиентам соответствующих аномалий) и блоков, слагающих расчлененный рельеф (хребты), а также на отрезках профилей, где они расположены вдоль «узких» геологических структур либо «по простиранию» поля. В общую базу данных включены также плотностные разрезы, построенные ранее при составлении листов Госгеолкарты м-бов 1 : 200 000 и 1 : 1 000 000 [6, 7]. Моделирование разрезов для Госгеолкарты-200 проведено по программе Prima [5] по аналогичной методике.

Далее с плоскости разрезов по сети 500×500 м считаны и сведены в единую базу значения подобранных плотностей, построена трёхмерная матрица объемного изображения (voxel). Визуализация поля значений плотности путем создания воксельной модели дает возможность наглядно отобразить положение плотностных неоднородностей

внутри геоблока, конструировать изоплотностные поверхности по любому заданному значению, строить произвольные сечения и карты распределения плотности в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Размер ячеек $2 \times 2 \times 2$ и $4 \times 4 \times 4$ км для разных частей геоблока в зависимости от густоты сети разрезов.

Плотностная модель. Объемная модель распределения плотности внутри коры построена до глубины 50 км. Верхняя часть коры более локализована по степени неоднородности среды, нижняя представлена в обобщенном виде. Тем не менее на модели отчетливо проявились тенденции изменений плотности как на глубину, так и по латерали, выделились основные структуры территории и характер их взаимоотношений.

Наиболее яркой глубинной неоднородностью является высокоплотная линейная область, вытянутая в северо-восточном направлении вдоль восточного борта Центрально-Камчатской депрессии по долине р. Еловка (рис. 2). В гравитационном поле этому плотному блоку соответствует фрагмент протяженной аномальной зоны, состоящей из цепочки максимумов с амплитудами в десятки

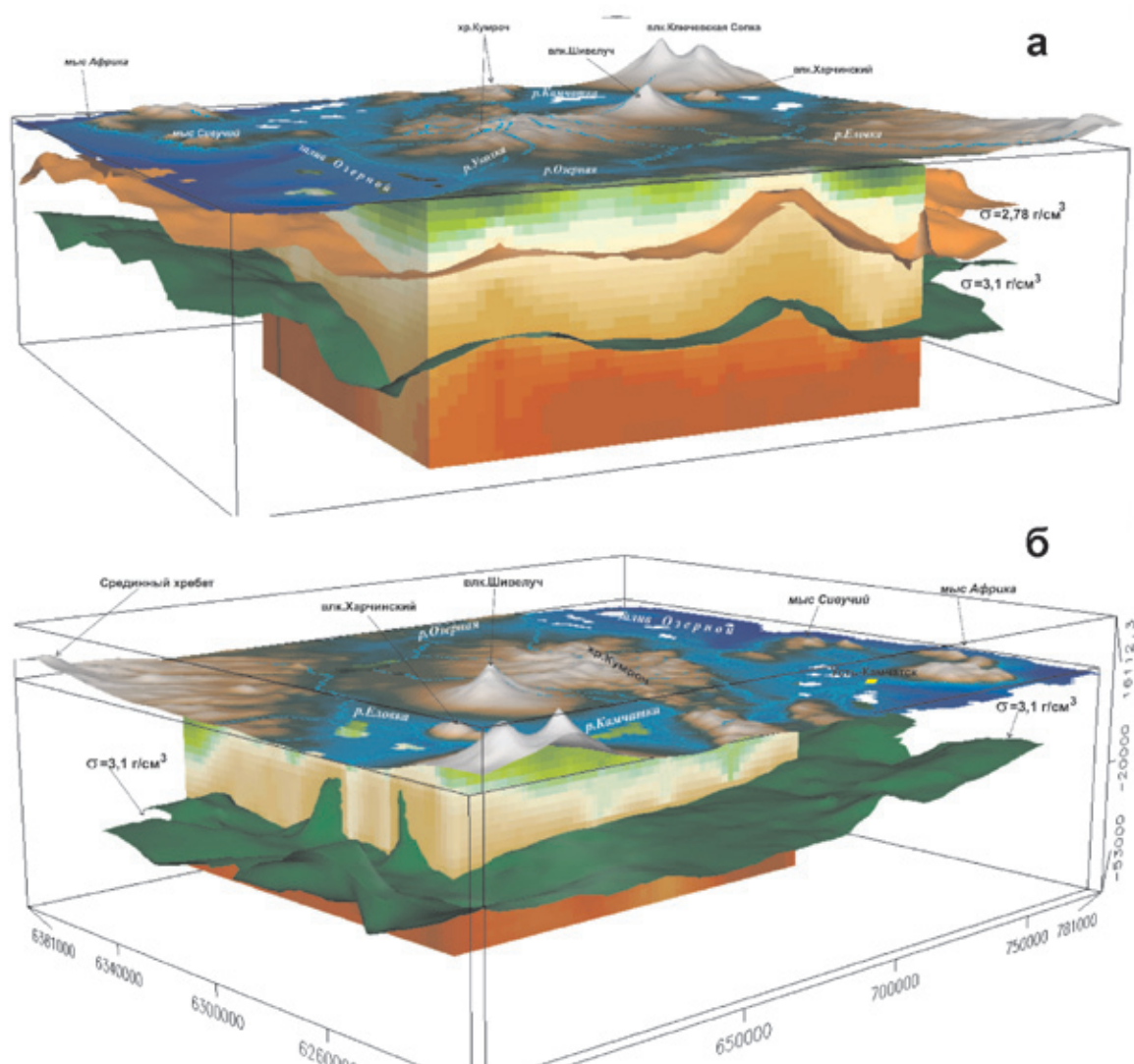


Рис. 2. Объемная плотностная модель блока земной коры в междуречье Камчатки — Еловки — Озерной. Вид с северо-востока (а) и юго-запада (б), плотность увеличивается от темно-зеленого к темно-коричневому. Часть ячеек погашена, чтобы показать изоповерхности. Вертикальный масштаб рельефа увеличен в три раза, а поверхность поднята на 3 км

мГал [8]. Зона аномалий силы тяжести является региональной и прослеживается от с. Шаромы в южной части Камчатки до Хавывенской возвышенности на перешейке п-ова Озерной и далее на север до о. Карагинский [3]. Описываемая модель охватывает три максимума: Харчинский, Еловский и Озерновский (рис. 1).

На модели видно, что плотность среды увеличена по отношению к смежным участкам по всей мощности земной коры от подошвы до дневной поверхности (рис. 2). Особенно сильные градиенты плотности наблюдаются в нижней и средней частях коры. Так, по профилю р. Двухюрточная — мыс Африка (рис. 3, рис. 4, б) изоденса $3,0 \text{ г/см}^3$ испытывает скачкообразный подъем с 30 до 15 км. Ширина аномально плотной зоны здесь составляет около 10 км. На разрезе по линии 3 от верхнего течения р. Озерная до мыса Сивучий (рис. 4, в) ширина плотностной неоднородности уже более 25 км, и она разделяется на три сливающихся у подошвы коры «столба». На картах-срезах (рис. 3) видно, что в верхних уровнях до 5–10 км плотный блок имеет мозаичный вид в форме овала шириной 50–60 км, вытянутого в северо-восточном направлении, на глубине 20–25 км он локализуется в виде узкого линейного контрастного блока, а на глубинах свыше 30 км «рассыпается». В подкоровом слое ниже изоперхности $3,25 \text{ г/см}^3$ появляются две аномалии с плотностью $3,4\text{--}3,45 \text{ г/см}^3$ (рис. 3, д, е). Одна находится под вулканом Харчинский и к югу от него, вторая смещена от р. Еловка на запад, в сторону Срединного хребта.

Природа аномальной зоны силы тяжести неоднозначна. Сильный гравитационный эффект объясняется глубинной и верхнекоровой компонентами. В качестве глубинного источника аномалий предполагаются выступы мантийного слоя [8], фрагмент фронтальной невулканической дуги, изостатически некомпенсированной в период палеосубдукции под Срединный хребет [1], «остатками» позднемеловой океанической плиты [3]. В качестве второй составляющей рассматриваются массивные структуры верхней коры — выступы меловых и до-меловых плотных отложений. На модели видно, что для Озерновского (самого северного) максимума достаточно влияния внутрикоровых плотных масс, а для Еловского и Харчинского дополнительно «требуется» аномально плотные блоки и в подкоровом слое (рис. 3, 4).

На описываемой территории верхней компоненте соответствует Хавывенское погребенное поднятие [3] выходы которого наблюдаются на Хавывенской возвышенности. Возвышенность представляет собой куполовидную структуру, в ядре которой обнажаются кристаллические сланцы, обрамленные амфибол-слюдистыми сланцами и кварцитами с телами офиолитовых перидотитов и габброидов [9, 10]. Над возвышенностью наблюдается самый интенсивный максимум силы тяжести. В южном направлении интенсивность аномалий постепенно падает [8]. К северу от возвышенности плотный метаморфический слой тянется до северного окончания о. Карагинский [7].

Вероятно, верхняя часть рассмотренного аномально плотного блока сложена подобными хавывенскими образованиями (плотность близка к метаморфитам возвышенности), перекрытыми здесь более поздними и менее плотными ($2,3\text{--}2,6 \text{ г/см}^3$) отложениями кайнозоя [6]. На уровне

средней и нижней коры плотность в модели характерна для пород ряда габбро-перидотитов.

Изоденса $2,74 \text{ г/см}^3$, соответствующая плотности кристаллических сланцев, подходит к дневной поверхности в районе Кротонского габбро-перидотитового массива и на участке, где частично обнажены субвулканические тела еловского вулканического комплекса основного—среднего состава (рис. 1, 3, а). Кротонский массив находится в аллохтонном залегании [8] и смещен к востоку на 15–20 км от плотного «выступа» из нижней коры основной аномально плотной зоны. Этот выступ можно предположить в качестве «корня» (рис. 4, в) Кротонской интрузии. Юго-западнее массива, в междуречье Лотона и Маимли на глубине 5–10 км в модели наблюдается похожий выступ плотных масс в виде «затяжек» изоденс из нижних горизонтов. Возможно, что на этом интервале имеются незероированные интрузии габбро и перидотитов.

Под вулканом Харчинский (рис. 3, в, 4, а) на глубине 8–15 км выделяется локальная изометричная область с аномально увеличенной плотностью для этого уровня $3,0 \text{ г/см}^3$, что соответствует интрузивным породам основного состава. Возможно, в модели отразилась промежуточная магматическая камера питающей системы этого потухшего вулкана, сложенного преимущественно базальтами [2].

Областями с низкой плотностью на модели выделились депрессионные структуры. Две из них, наиболее крупные — Тюшевский прогиб и Уколкинская впадина, находятся в восточной части описываемой территории. Уколкинская впадина охватывает часть суши и шельфа в нижнем течении рек Озерная, Уколка и акватории Озерного залива [7]. В модели ей соответствует вытянутая в широтном направлении область пониженной плотности в верхней части коры. Плотность $2,3\text{--}2,5 \text{ г/см}^3$ моделируется до глубины 4–5 км, а изоденса $2,7 \text{ г/см}^3$ опускается в шельфовой зоне до 10 км (рис. 4, а). Для Уколкинской впадины характерно прогибание вниз изоплотностных поверхностей по всему разрезу коры, причем больший прогиб испытывают глубокие горизонты (рис. 2, а). Подкоровый слой под впадиной также имеет плотность на $0,1 \text{ г/см}^3$ ниже по сравнению с соседними участками (рис. 3, е). Вероятно, возникновение впадины обусловлено глубинными причинами. На суше имеются геологические сведения о рифтогенной природе впадины [7], а со стороны Берингова моря в шельфовую часть структуры утыкаются региональные трансформные разломы северо-западного простирания Альфа и Беринга. Разломы представляют собой сдвиги на дне Командорской глубоководной котловины. Между ними вблизи шельфа находится участок аномально высокого теплового потока с повышенными градиентами над разломами, что является признаком структур растяжения [4].

Учитывая, что низкоплотные осадки (от палеогена до голоцена) слагают мощный слой в верхней части структуры, ее следует считать перспективной на обнаружение месторождений углеводородов.

Тюшевский прогиб расположен между горными грядами Камчатского п-ова и хр. Кумроч, вытянут на 90 км от Камчатского залива на юго-западе до зал. Озерной на северо-востоке. Прогиб заполнен палеогеновыми осадочными, вулканогенно-осадочными толщами и плиоцен-четвертичными молассами [7]. Усредненная плотность такого раз-

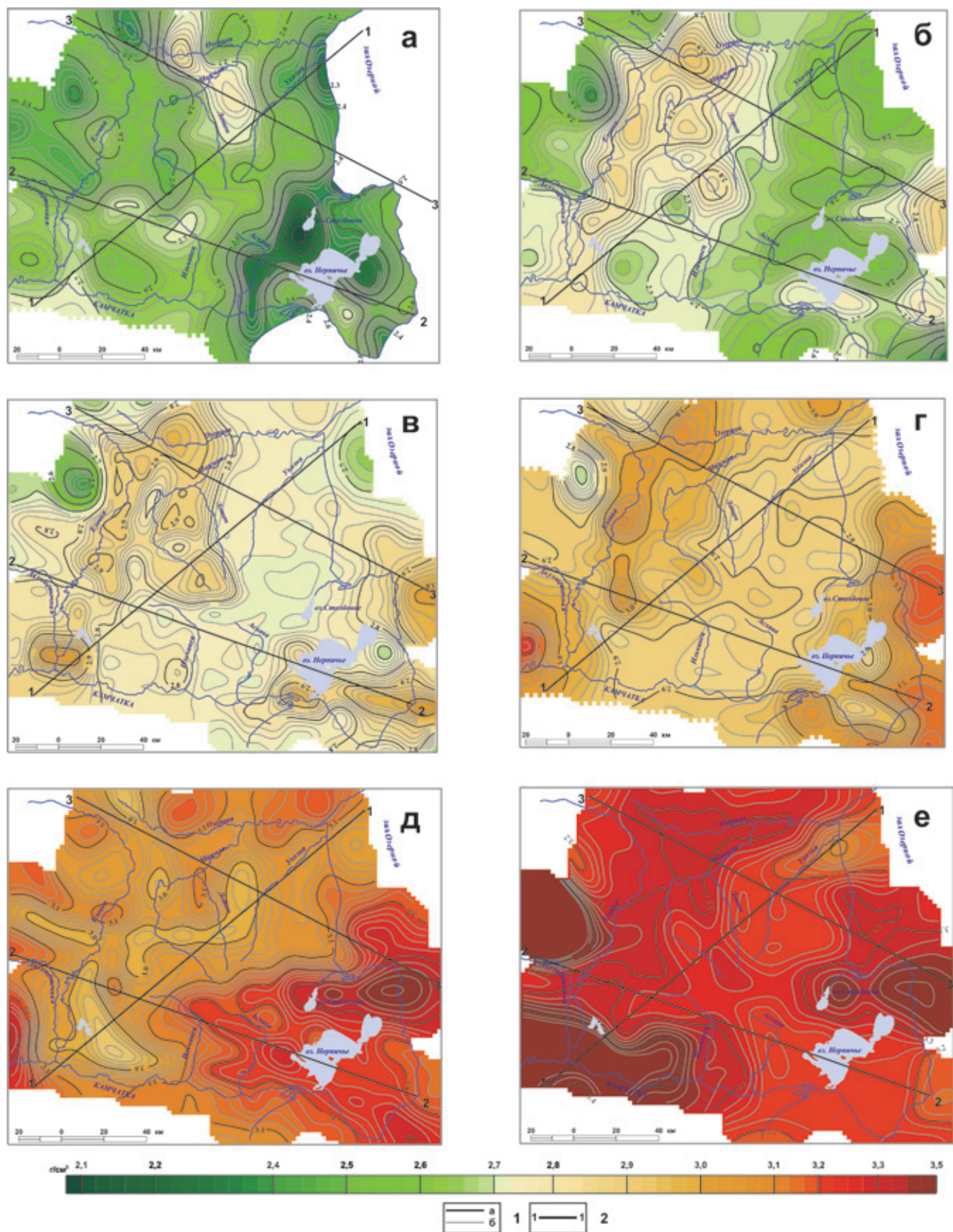


Рис. 3. Плотностные срезы над уровнем моря (км): 0 (а), 5 (б), 10 (в), 20 (г), 30 (д) и 45 (е)
 1 — изоденсы основные (а) и промежуточные (б); 2 — линии разрезов

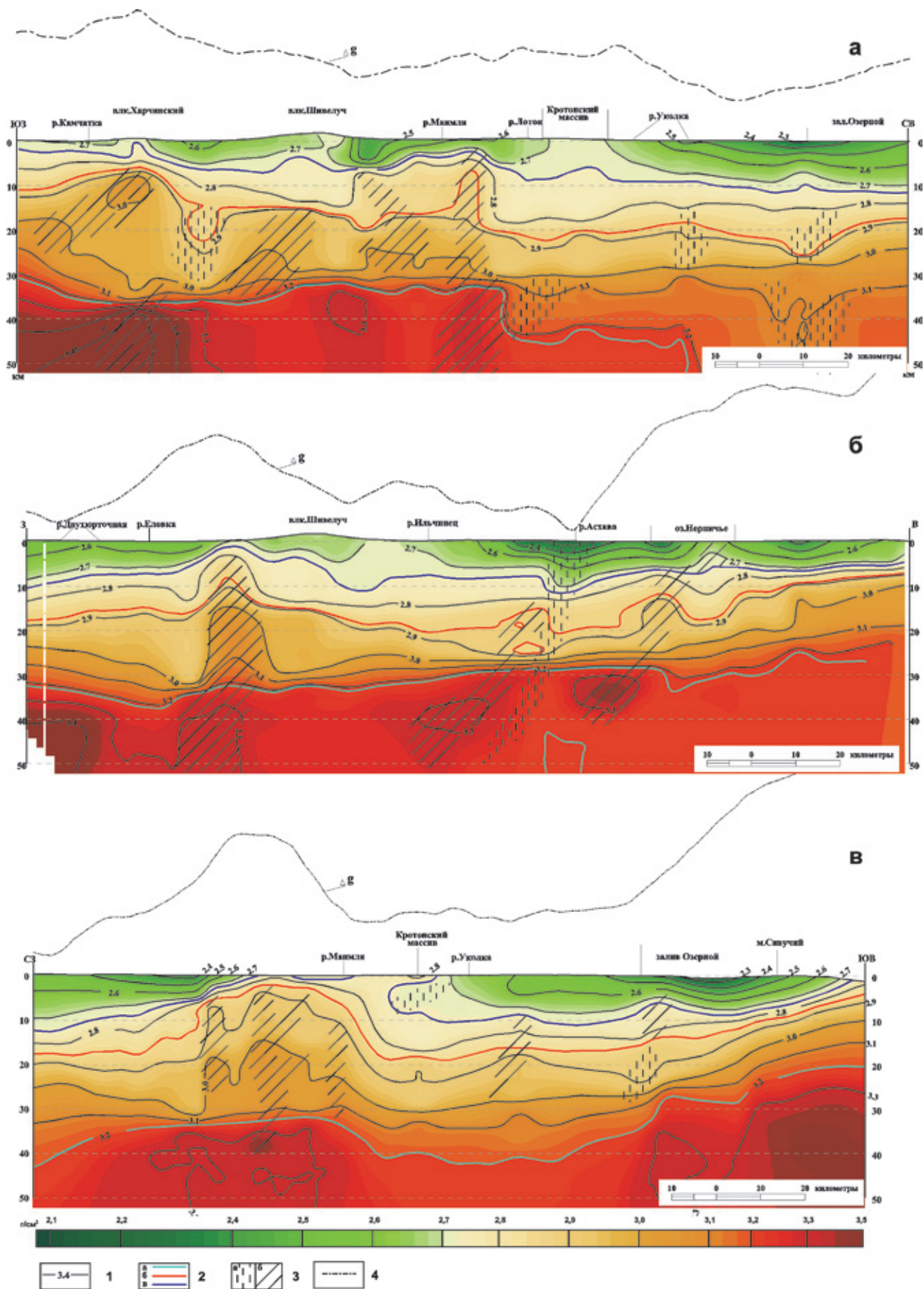


Рис. 4. Плотностные разрезы по линиям 1–1 (*а*), 2–2 (*б*), 3–3 (*в*)

1 – изоденсы с сечением 0,1 г/см³; 2 – изоденсы с плотностью, соответствующей основным разделам земной коры: *а* – кора – мантия (3,22 г/см³), *б* – верхняя – нижняя кора (2,88 г/см³), *в* – осадочный слой – кристаллический фундамент (2,74 г/см³); 3 – локальные коррелируемые зоны пониженной (*а*) и повышенной (*б*) плотности; 4 – график аномалии Буге

реза не превышает 2,5 г/см³. В районе прогиба на модели изоденсы с этой плотностью располагаются на глубине до 4,5–5 км (рис. 4, б, в). Однако изгиб вниз испытывают и более плотные нижележащие слои, вплоть до горизонта с плотностью, соответствующей кровле кристаллического фундамента (2,74–2,78 г/см³). На уровне моря (рис. 3, а) прогиб имеет устойчивое линейное северо-восточное простирание с ярко выраженным плотностным минимумом между озерами Нерпичье и Столбовое. На глубине 5 км (рис. 3, б) область пониженной плотности распадается на локальные субширотные «депрессии», разделенные плотными участками, а на глубине 10 км она смещается на запад и располагается под горными сооружениями хр. Кумроч. Максимальные градиенты плотности отмечаются в верхних горизонтах вдоль подножия хребта, причем в районе р. Асхава (рис. 4, б) наблюдается «затягивание» изолиний под горные сооружения на глубину 10–12 км в виде узкой зоны, наклоненной под углом около 65° на запад. На более глубоких горизонтах зона фрагментарно прослеживается вплоть до подкорового слоя. В нижней коре она почти вертикальна, а под подошвой снова склоняется в западном направлении под углом 50–55°. Вероятно, так в модели проявились следы коллизии при столкновении полуостровов с Камчаткой, происшедшей в плиоцене [1].

Рассмотренная технология создания объемной модели распределения плотности на примере блока коры в сочленении Камчатской и Алеутской островных дуг — эффективный метод изучения его внутреннего строения. На модели хорошо проявились основные геологические структуры, характер их взаимоотношений. Модель дает возможность прогнозировать продолжение структур на глубину, определять их размеры и форму, выявлять скрытые геологические образования. Построение воксельных плотностных моделей может быть полезно для изучения глубинного строения территорий слабо или совсем не обеспеченных прямыми геофизическими зондированиями. Модель может детализироваться и дополняться при появлении новых данных, использоваться для тектонических реконструкций и решения других задач структурной геологии.

Работа поддержана грантом ДВО РАН (проект № 12 III-A-08-188).

Сидоров Михаил Дмитриевич — канд. геол.-минер. наук, зав. лаб., НИГТЦ ДВО РАН. <smd52@mail.ru>.
Новаков Роман Михайлович — ст. науч. сотрудник, НИГТЦ ДВО РАН. <brom6@mail.ru>.

1. Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А. Современная тектоническая структура Курило-Камчатского региона и условия магмообразования // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. — С. 9–33.

2. Волинец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Дж.М. Харчинский и Заречный вулканы — уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке: вещественный состав вулканических пород // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4–5. — С. 5–18.

3. Иванов Б.В., Попруженко С.В., Апрельков С.Е. Глубинное строение Центрально-Камчатской депрессии и структурная позиция вулканов // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. — Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. — С. 45–57.

4. Селивёрстов Н. И. Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. — М.: Научный мир, 1998. — 250 с.

5. Сидоров М.Д. Картирование мезозойского фундамента Авачинско-Корякской группы вулканов (Камчатка) методом плотностного моделирования // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4–5. — С. 99–105.

6. Сляднев Б.И., Боровцов А.К., Бурмаков Ю.А., Сидоренко В.И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Курильская. Лист О-57 — Палана. Объясн. зап. — СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ, 2013. — 296 с.

7. Сляднев Б.И., Боровцов А.К., Сидоренко В.И., Сапожникова Л.П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Курильская. Лист О-58 — Усть-Камчатск. Объясн. зап. — СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ, 2013. — 256 с.

8. Смирнов Л.М., Апрельков С.Е. О природе аномальной зоны силы тяжести в Центрально-Камчатской депрессии // Геологическое строение и полезные ископаемые Камчатки: Тез. докл. — Петропавловск-Камчатский, 1983. — С. 210–212.

9. Тарарин И.А., Марковский Б.А. Природа и U-Pb SHRIMP возраст метаморфических комплексов Восточной Камчатки // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием. Владивосток, 20–23 сентября 2011 г. — Владивосток: Дальнаука, 2011. — С. 177–179.

10. Тарарин И.А., Бадрединов З.Г., Марковский Б.А., Сляднев Б.И. U-Pb SHRIMP датирование цирконов метаморфических комплексов Восточной Камчатки // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 2. — С. 22–40.