

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ КАМЧАТКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МТЗ И СЕЙСМОТОМОГРАФИИ

**Ю.Ф. Мороз<sup>1,2,3</sup>, Л.И. Гонтовая<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа 9, г. Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: morozyf17@mail.ru, morozyf@kscnet.ru

<sup>2</sup>ФГБУН Геологический институт СО РАН, ул. Сахьяновой ба, г. Улан-Удэ, 670047

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, ул. Пограничная 4, г. Петропавловск-Камчатский, 683032

Поступила в редакцию 2 августа 2016 г.

По данным глубинного магнитотеллурического зондирования и сейсмотомографии рассмотрены основные особенности в распределении геоэлектрических и скоростных неоднородностей в земной коре и верхней мантии Камчатки. На основе комплексного анализа аномалий электропроводности и сейсмической скорости обсуждается возможная их природа. Геоэлектрическая модель содержит коровый проводящий слой на глубинах 15–35 км, который вытянут вдоль средней части Камчатки. В районе Центрально-Камчатского вулканического пояса слой приближен к дневной поверхности до глубины 15–20 км, где его проводимость существенно возрастает. В литосфере Восточной Камчатки выделены поперечные проводящие зоны шириной до 50 км, имеющие продолжение в Тихий океан. К выступам поперечных зон приурочены крупные центры современного вулканизма. Верхняя мантия содержит астеносферный проводящий слой, который с глубины 150 км на западной Камчатке поднимается до глубины 70–80 км под зоной современного вулканизма. По данным сейсмотомографии на продольных и поперечных разрезах Восточной Камчатки выражены аномалии пониженной и повышенной сейсмической скорости продольных сейсмических волн, отражающие латеральную расслоенность, которая включает земную кору, жесткую часть верхней мантии, астеносферный слой в интервале глубин ~ 70–130 км и высокоскоростной слой, к которому приурочена сейсмофокальная зона. На разрезах представлены аномалии пониженных скоростей, которые в большинстве случаев соответствуют аномалиям повышенной электропроводности, связываемым с повышенной пористостью пород, насыщенных жидкими флюидами. Однако имеются и различия, которые связаны с тем, что электропроводность пород зависит от поровых каналов, заполненных жидкими флюидами, создающих сквозные пути для электрического тока. Сейсмическая же скорость в существенной мере зависит от общей пористости пород, включающей также изолированные и тупиковые каналы, которые могут быть заполнены жидкими флюидами, не вносящими свой вклад в перенос электрического тока. По данным электропроводности и сейсмической скорости выполнена оценка пористости горных пород в аномальных зонах земной коры и верхней мантии, характеризующихся повышенной электропроводностью и пониженной сейсмической скоростью. На этой основе выделяются зоны частичного плавления в литосфере и астеносфере, питающие активные вулканы.

**Ключевые слова:** магнитотеллурическое зондирование, сейсмотомография, электропроводность, сейсмическая скорость, пористость пород, минерализованные растворы, п-ов Камчатка.

**ВВЕДЕНИЕ**

П-ов Камчатка характеризуется ярким проявлением динамических процессов, выраженных высокой сейсмичностью, современным вулканизмом и гидротермальной активностью. Изучение глубинного строения этого региона дает возможность выявить

основные особенности в распределении физических свойств пород земной коры и верхней мантии и их возможной связи с глубинными разломами, с зонами плавления пород и другими неоднородностями тектоносферы. Среди геофизических методов важное место занимают геоэлектрика и сейсмотомография,

позволяющие получить информацию об электропроводности и сейсмической скорости горных пород в земной коре и верхней мантии.

В последние годы на Камчатке выполнен большой объем исследований методами магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и сейсмической томографии с использованием современных подходов и методик. Результаты интерпретации показали, что в земной коре и верхней мантии существуют скоростные и геоэлектрические неоднородности. В связи с получением новой информации возникла необходимость обобщения и комплексного анализа данных МТЗ и сейсмотомографии с целью определения возможной природы аномалий повышенной электропроводности и сейсмической скорости, а также их связи с зонами

магматического питания вулканов. Особенный интерес представляют районы Ключевской и Авачинской групп вулканов, которым уделено большое внимание в настоящей статье.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЭЛЕКТРИКИ

Схема расположения МТЗ, полученных за последние десятилетия, изображена на рис. 1а. Большая часть территории Камчатки покрыта зондированиями в диапазоне периодов, которые характеризуют электропроводность литосферы. Однако имеются отдельные районы, не изученные площадной съемкой МТЗ. Эти районы являются труднодоступными из-за горного рельефа или сильной заболоченности. Также мы располагаем рядом низкочастотных глубинных МТЗ

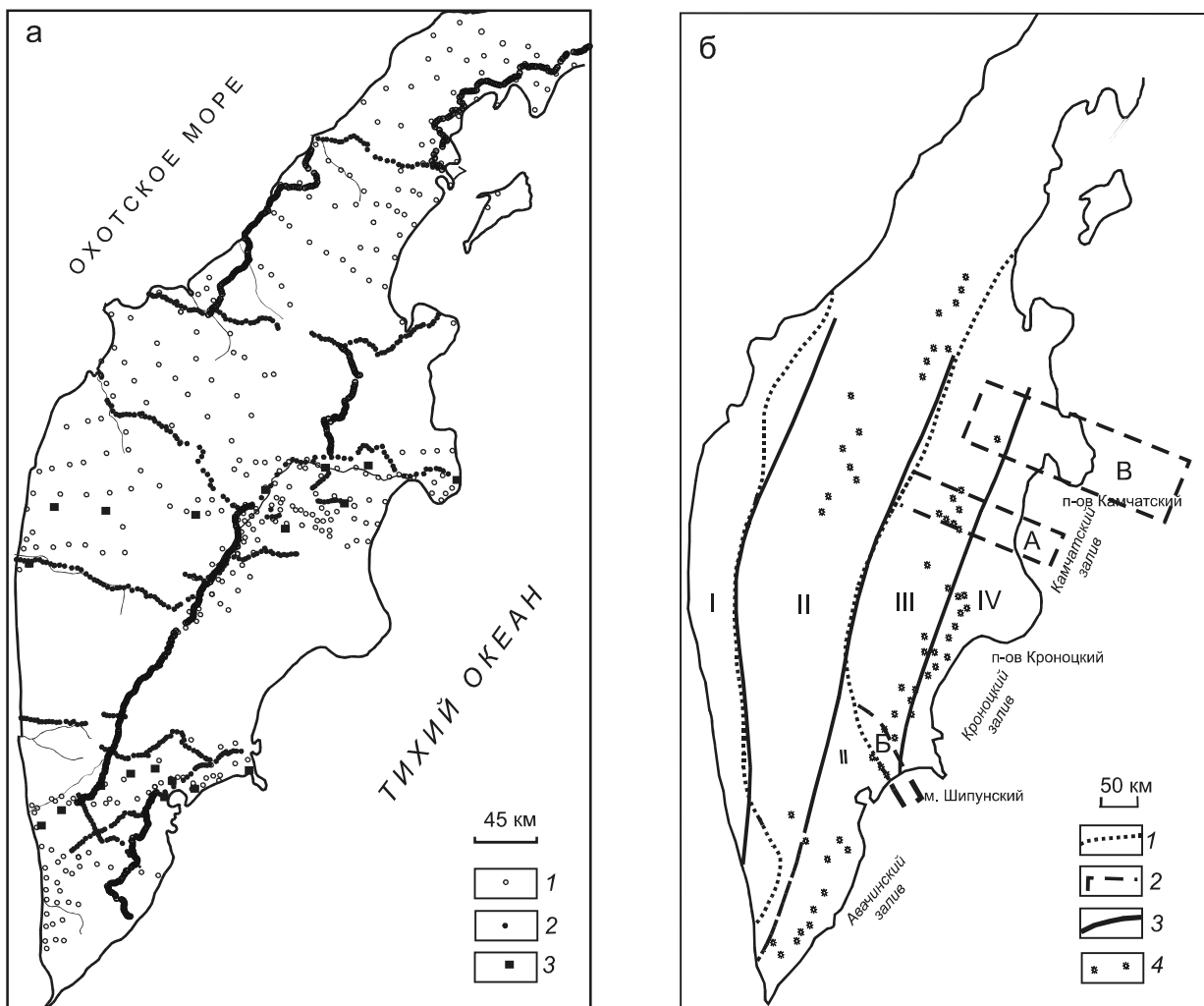


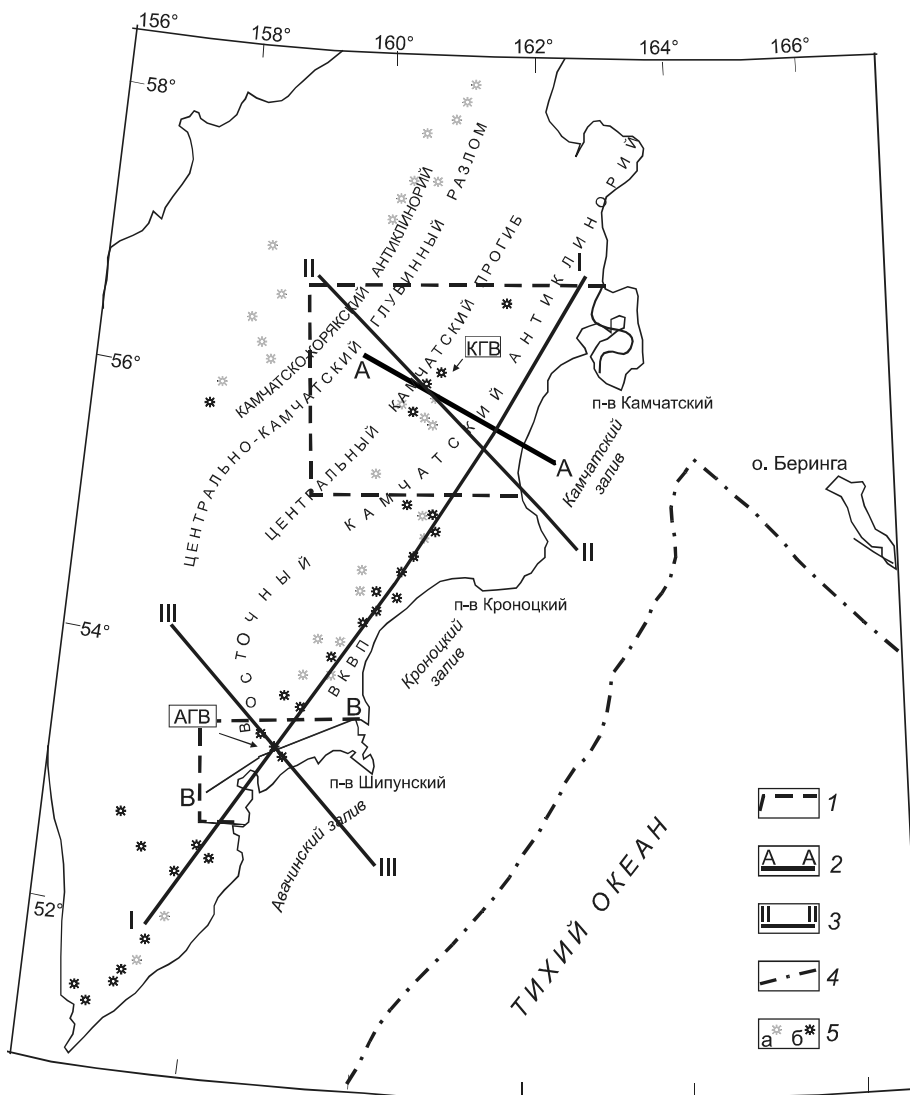
Рис. 1. Схемы изученности МТЗ (а) и электропроводности (б) литосферы Камчатки.

а – расположение магнитотеллурических зондирований в диапазоне периодов 10–1000 с (1), 0.1–1000 с (2) и 1500–15000 с (3); б – границы проявления корового слоя повышенной электропроводности по продольным и поперечным кривым (1); корового (А, Б) и литосферного (В) слоев по поперечным кривым (2); зон он с различной глубиной залегания астеносферного проводящего слоя (3): I – 150 км, II – 100 км, III – 70 км, IV – 120 км; 4 – вулканы.

по региональной сети, по которым получена информация об астеносферном проводящем слое. МТЗ выполнены Восточным геофизическим трестом, ПГО «Камчатгеология», ПГО «Сахалингеология» Министерства геологии РСФСР, Институтом вулканологии ДВО РАН.

Методика и результаты интерпретации магнитотеллурических и магнитовариационных данных на Камчатке подробно рассмотрены в работах [18–24]. В основу интерпретации положены кривые зондирования, ориентированные по простиранию (продольные кривые) и вкрест простирания (поперечные кривые) основных структур Камчатки. Обобщенное представление о глубинной электропроводности сводится к следующему. Территория Камчатки районирована на области с различной глубинной электропроводностью. В земной коре и верхней мантии выявлены слои повышенной электропроводности (рис. 1 б). В

западной части Камчатки на кривых МТЗ коровый проводящий слой не проявился. Если он здесь и существует, то по своей проводимости соизмерим с проводимостью осадочно-вулканогенного чехла. В центральной части полуострова выделяется область шириной около 200 км, протяженностью 1200 км, в которой коровый слой проявился как на поперечных, так и на продольных кривых. Он расположен на глубинах 15–35 км и имеет удельное электрическое сопротивление первые десятки Ом·м. В средней части области выделяется зона, в которой коровый проводящий слой приближен к дневной поверхности до глубин 15–20 км и характеризуется увеличенной проводимостью. Данная зона приурочена к Камчатско-Корякскому антиклинорию с наложенным вулканическим поясом, в основании которого предполагается Центрально-Камчатский глубинный разлом (рис. 1б и 2). В восточной части полуострова выделяется область, где коровый



**Рис. 2.** Схема расположения профилей (геоэлектрических и сейсмотопографических) в районах Восточной Камчатки.

1 – границы районов Авачинско-Корякской (АГВ) и Ключевской (КГВ) групп вулканов; 2, 3 – профили МТЗ и сейсмотографии, соответственно; 4 – глубоководный желоб; 5 – вулканы: а – потухшие, б – действующие.

слой проявляется только на поперечных кривых. Показано, что здесь земная кора содержит поперечные проводящие зоны шириной до 50 км, имеющие продолжение в Тихий океан. К таким зонам приурочены крупные области современного вулканизма.

По продольным кривым МТЗ выделяется астеносферный проводящий слой, кровля которого с глубины 150 км на западной Камчатке поднимается до глубины 70–80 км под зоной современного вулканизма и опускается в сторону восточного побережья полуострова до глубины примерно 120 км (рис. 16). Удельное электрическое сопротивление слоя оценивается в 5–10 Ом·м.

Таким образом, в результате анализа продольных и поперечных кривых МТЗ мы приходим к модели, в которой крупные центры современного вулканизма Восточной Камчатки приурочены к поперечным проводящим зонам в земной коре и к поднятию астеносферного выступа, вытянутого вдоль полуострова. Рассмотрим глубинную модель электропроводности Ключевской группы вулканов, в лучшей мере изученной методом МТЗ в районе Восточного пояса современного вулканизма (рис. 2).

Ключевская группа вулканов расположена в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. В этой области на суше выпол-

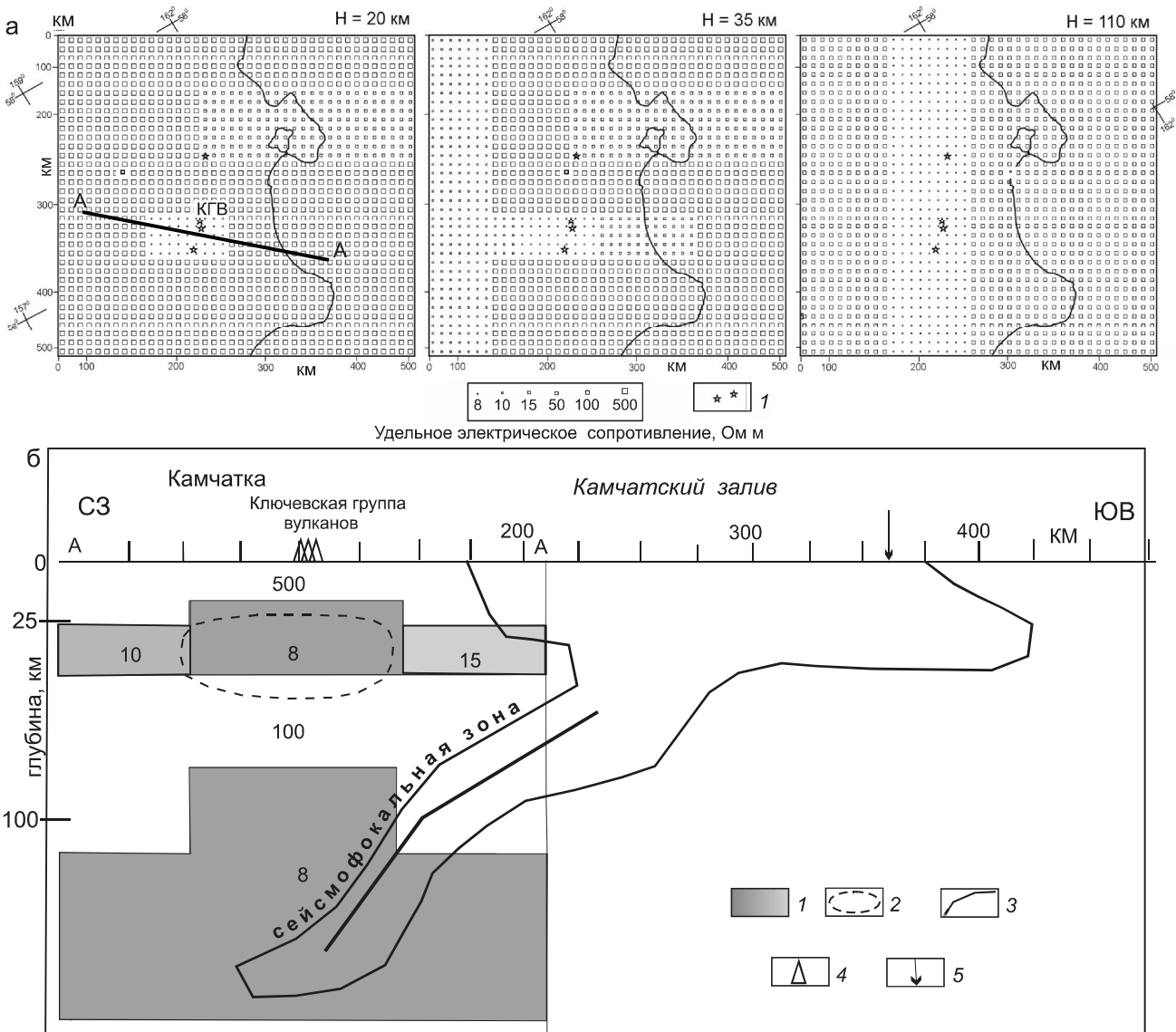


Рис. 3. Глубинная модель электропроводности земной коры и верхов верхней мантии [20].

а – схема электропроводности в районе Ключевской группы вулканов. 1 – вулканы. б – глубинный геоэлектрический разрез по профилю АА (рис. 2 а). 1 – зоны с пониженным удельным электрическим сопротивлением [20]; 2 – аномалия пониженной скорости продольных сейсмических волн [8]; 3 – медиана распределения числа землетрясений [31]; 4 – вулканы; 5 – глубоководный желоб.

нены площадные наблюдения МТЗ, что позволило с использованием новых технологий и трехмерного численного моделирования получить объемную геоэлектрическую модель [19, 20]. Она представлена на рис. 3 а в виде карт электропроводности на глубинах 20, 35, 110 км и на рис. 3 б в виде геоэлектрического разреза по линии АА. На них видно, что земная кора и верхняя мантия содержат зоны повышенной электропроводности. В краевой северо-западной части площади (рис. 3 а, Н = 35 км) выделяется вытянутая в северо-восточном направлении проводящая зона с удельным электрическим сопротивлением 10 Ом·м. Она расположена на глубинах 25–40 км. К ней приурочен Центрально-Камчатский вулканический пояс. С северо-западной зоной сопряжена поперечная коровая проводящая зона Алеутского (юго-западного) направления, имеющая продолжение в Тихий океан. Ширина зоны около 50 км. Она находится на глубинах 15–40 км. К наиболее приподнятой части зоны приурочена Ключевская группа вулканов (рис. 3). В северо-восточной части площади выделена поперечная литосферная зона (Н = 20, 35 км) с пониженным удельным электрическим сопротивлением 50 Ом·м. Ширина зоны около 80 км. Она расположена на глубинах 20–80 км. Литосферная зона относится к району, где предполагается продолжение структур Алеутской островной дуги на Камчатку. К западной части зоны приурочен вулкан Шивелуч. В верхней мантии выявлен астеносферный проводящий слой. Кровля слоя находится на глубинах 80–120 км. Приподнятая ее часть представляет собой вытянутую в северо-восточном направлении зону шириной 80 км (рис. 3, Н = 110 км). К ней на дневной поверхности приурочены действующие вулканы Восточно-Камчатского вулканического пояса

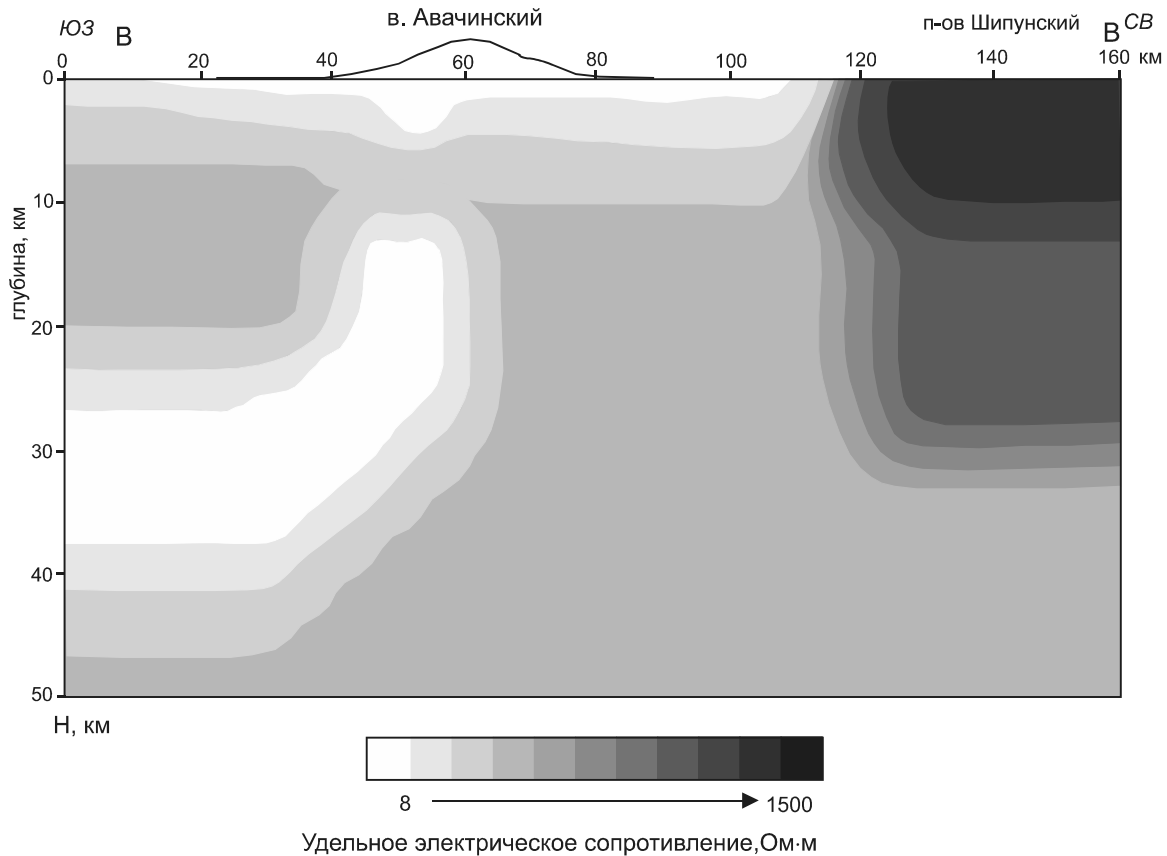
Рассмотрим структуру электропроводности района Авачинско-Корякской группы, расположенной на Южной Камчатке (рис. 2). В этом районе выполнен большой объем детальных площадных исследований МТЗ, позволяющих получить информацию об электропроводности земной коры и верхней мантии. Методика и результаты интерпретации МТЗ рассмотрены в [18]. Для изучения глубинной электропроводности использовано около 1000 МТЗ. По результатам интерпретации составлена схема глубинной электропроводности исследуемой площади. Она районирована на две области с различной электропроводностью земной коры: юго-западную и северо-восточную. Первая содержит коровый слой повышенной электропроводности. Вторая отмечается пониженной электропроводностью верхней части коры.

Полученные результаты уточнены с помощью численного двухмерного моделирования. Создана глу-

бинная геоэлектрическая модель вдоль профиля ВВ протяженностью около 160 км (рис. 4). На ней видно, что в юго-западной части района выделяется коровый слой с пониженным электрическим сопротивлением до 10 Ом·м. Середина слоя поднимается примерно с глубины 30–35 км на юго-западе до глубины 10–15 км под современными вулканами. Здесь осадочно-вулканоогенный чехол содержит аномалию с пониженным удельным электрическим сопротивлением 8 Ом·м до глубины 4–5 км. Эта аномалия фиксирует грабен, выполненный преимущественно проводящими породами. Современные вулканы приурочены к бортовой части грабена. Земная кора северо-восточной части профиля не содержит коровых проводников. Она отличается повышенным электрическим сопротивлением в районе Шипунского п-ова.

### РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ

На Камчатке в 70–90 гг. прошлого столетия с использованием взрывной сейсмологии получены сведения о строении земной коры в районах Авачинского и Ключевского вулканов [2, 6]. В настоящее время имеются данные о глубинной структуре Земли, полученные с помощью метода сейсмической томографии. Район Камчатки в плане применения различных модификаций этого метода можно рассматривать как своеобразный полигон. Результаты сейсмографических построений представлены в виде трехмерных изображений структуры коры и верхней мантии в аномалиях продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) сейсмических волн и параметра  $V_p/V_s$ , а также других характеристик волнового поля [6–8, 13–15, 26, 38, 41, 45 и др.]. В полученных различными авторами результатах присутствуют как черты сходства рисунка томограмм, так и определенные различия. Это касается не только непосредственно разработанных моделей, но и их последующей геологической интерпретации. Первое обусловлено неоднозначностью самого метода сейсмографии, а второе – в рамках какой геодинамической гипотезы рассматриваются полученные результаты и в какой степени они отвечают данным других геолого-геофизических методов, выполненных на Камчатке. Общим для всех полученных различными авторами результатом является высокоскоростная, наклоненная под полуостров аномалия, к которой приурочена сейсмофокальная зона высокой сейсмичности (СФЗ). Эта структура в целом отражает процессы взаимодействия континентальной окраины и Тихого океана на камчатском отрезке переходной зоны. Отличия просматриваются как в области этой СФЗ, так и в мантийном клине. К ним можно отнести рисунок изображений, интенсивность аномалий и их контрастность в общей структуре скоростного поля,



**Рис. 4.** Глубинная модель электропроводности вдоль профиля ВВ в районе Авачинской группы вулканов [18].

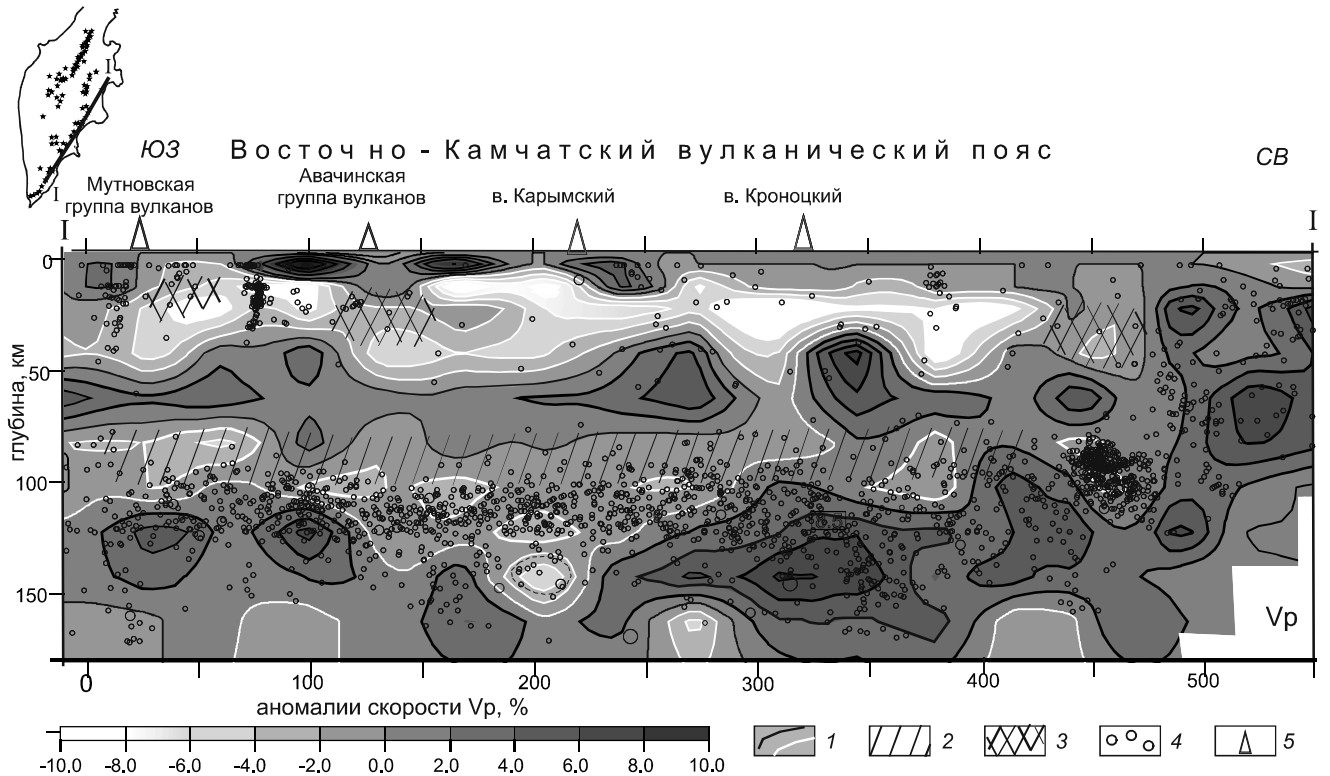
вертикальная и латеральная протяженность аномалий, их взаимосвязи с характером сейсмичности. Свойства камчатской СФЗ детально проанализированы в работах [27, 31].

Известно, что построение моделей геологической среды методом сейсмической томографии не является однозначной задачей. Результаты моделирования в большой мере зависят от типа, количества и качества использованных данных, способов и подходов к решению обратной задачи, выбора исходной скоростной модели, относительно которой рассчитываются аномалии скорости, характера и степени демпфирования и многого другого. Очевидно, что комплексный анализ полученных на Камчатке сеймотомографических моделей с данными других геолого-геофизических методов позволит однозначно судить о возможной природе скоростных неоднородностей в земной коре и верхней мантии.

В основу нашего анализа положена сеймотомографическая модель, разработанная коллективом ученых ИВиС ДВО РАН, ИДГ РАН и Университета г. Цюрих (Швейцария). Результаты моделирования частично (в основном касаясь технологии моделирования и данных по Р-волнам) опубликованы в

работах [10, 45]. Скоростная модель построена на основе времен пробега волн от региональных камчатских землетрясений, которые были зарегистрированы камчатской сетью из 37 станций за период 1971–2006 гг. Данные взяты из регионального каталога, созданного в Камчатском филиале Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН, <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/>). Отбор данных из каталога выполнялся таким образом, чтобы все отобранные события удовлетворяли примерно одним и тем же критериям качества. В таком случае рассчитанная исходная скоростная модель совместно со стационарными поправками дает минимальное среднее значение среднеквадратичной ошибки времени пробега для всех землетрясений, используемых в расчетах. Исходя из особенностей камчатской сети станций и геометрии гипоцентрии региональных землетрясений, 3D скоростная модель литосферы, с разной степенью разрешенности, получена лишь для Восточной Камчатки до глубины 150–200 км.

Общее представление по распределению скоростных неоднородностей в литосфере Восточной Камчатки можно получить по профилям I–I вдоль Восточного вулканического пояса и по поперечным



**Рис. 5.** Аномалии скорости продольных сейсмических волн и глубинные проводящие зоны в земной коре и верхней мантии по продольному профилю I–I.

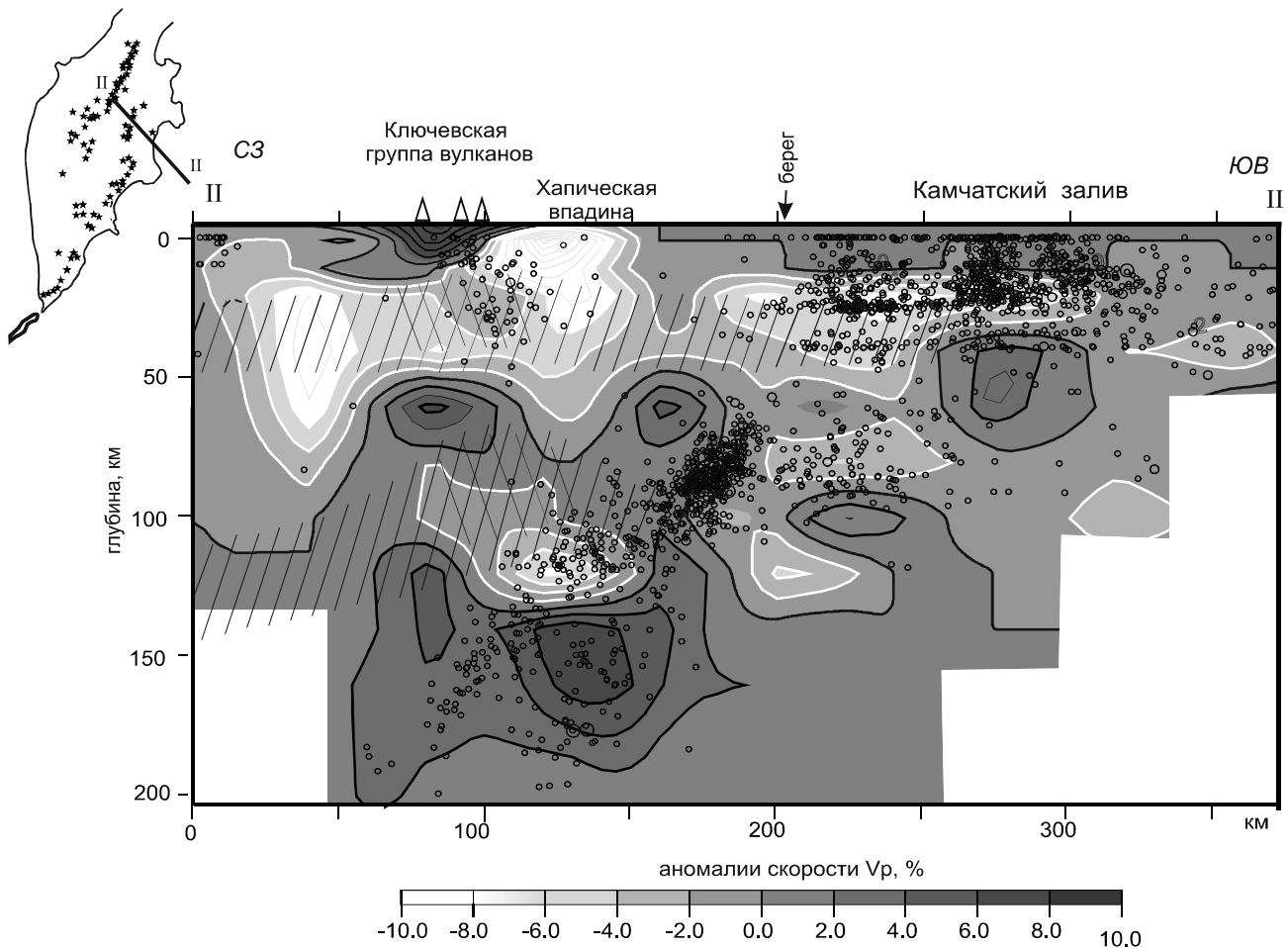
1 – изолинии аномалий скорости; 2, 3 – проводящие зоны с удельным электрическим сопротивлением 15–30 (2) и 5–10 (3) Ом·м; 4 – гипоцентры землетрясений ( $K_s > 10$ ); 5 – вулканы. Положение сейсмографического профиля показано на врезке и на рис. 2.

профилям II–II и III–III через Ключевскую и Авачинско-Корякскую группы действующих вулканов (рис. 2).

Рассмотрим скоростной разрез продольных сейсмических волн по профилю I–I (рис. 5). На разрезе хорошо выражены аномалии повышенной и пониженной скорости продольных сейсмических волн, отражающие латеральную расслоенность, которая включает земную кору, жесткую часть верхней мантии, астеносферный слой в интервале глубин ~ 70–130 км и высокоскоростной слой, к которому приурочена сейсмофокальная зона. Вдоль разреза выявлены аномалии пониженных скоростей под зонами активных вулканов. Сейсмографический разрез сопоставлен с данными электропроводности. В большинстве случаев выявлено соответствие аномалий пониженной скорости аномалиям повышенной электропроводности.

Рассмотрим распределение скоростных неоднородностей в земной коре и верхней мантии в районе Ключевской группы вулканов по профилю II–II (рис. 6). На разрезе выражены аномалии скоростей сейсмических волн положительного и отрицательного знака. В литосфере на глубинах 15–40 км прояви-

лась низкоскоростная аномалия, имеющая продолжение в район Камчатского залива. Она в общих чертах отвечает поперечной литосферной зоне повышенной электропроводности. В верхней мантии в районе Ключевской группы вулканов на глубинах 80–130 км выделяется аномалия пониженной скорости сейсмических волн, расположенная над сейсмофокальной зоной. Эта аномалия также согласуется с аномалией повышенной электропроводности. В верхней коре под Ключевской группой вулканов зафиксированы интенсивные скоростные аномалии обоих знаков, которые находят подтверждение в данных электропроводности осадочно-вулканогенного чехла [21], поля силы тяжести и данных КМПВ [2]. Природа аномалии, по-видимому, обусловлена насыщенностью разреза магматическими породами. В левой части разреза, которая относится к Центрально-Камчатскому прогибу, в верхней коре хорошо выражена аномалия пониженной скорости, которая, вероятно, связана с мощной низкоскоростной толщей. Не исключено, что в основании прогиба заложен глубинный разлом, выраженный в скоростном поле до верхней мантии. Восточнее Ключевской группы вулканов зафиксирована



**Рис. 6.** Аномалии скорости продольных сейсмических волн и глубинные проводящие зоны в земной коре и верхней мантии по поперечному профилю II–II.

Условные обозначения на рис.5.

интенсивная аномалия пониженной скорости, которая имеет продолжение в верхнюю мантию. Предполагается, что аномалии пониженной скорости связаны с пониженной плотностью, повышенной пористостью и проницаемостью пород. Не исключается, что они могут содержать жидкие флюиды.

Рассмотрим распределение скоростных неоднородностей по профилю III–III, пересекающему Авачинско-Корякскую группу вулканов и выходящему в Авачинский залив (рис. 7). В земной коре выделяется вытянутая вдоль профиля аномалия пониженной сейсмической скорости в интервале глубин 15–50 км. В общих чертах она согласуется с аномалией повышенной электропроводности. Природу выявленных аномалий, так же как и в районе Ключевской группы вулканов, можно увязать с повышенной проницаемостью коры, ее слоистостью и, возможно, насыщенностью жидкими флюидами. Характерно, что в верхней мантии над сейсмофокальной зоной выделяются ано-

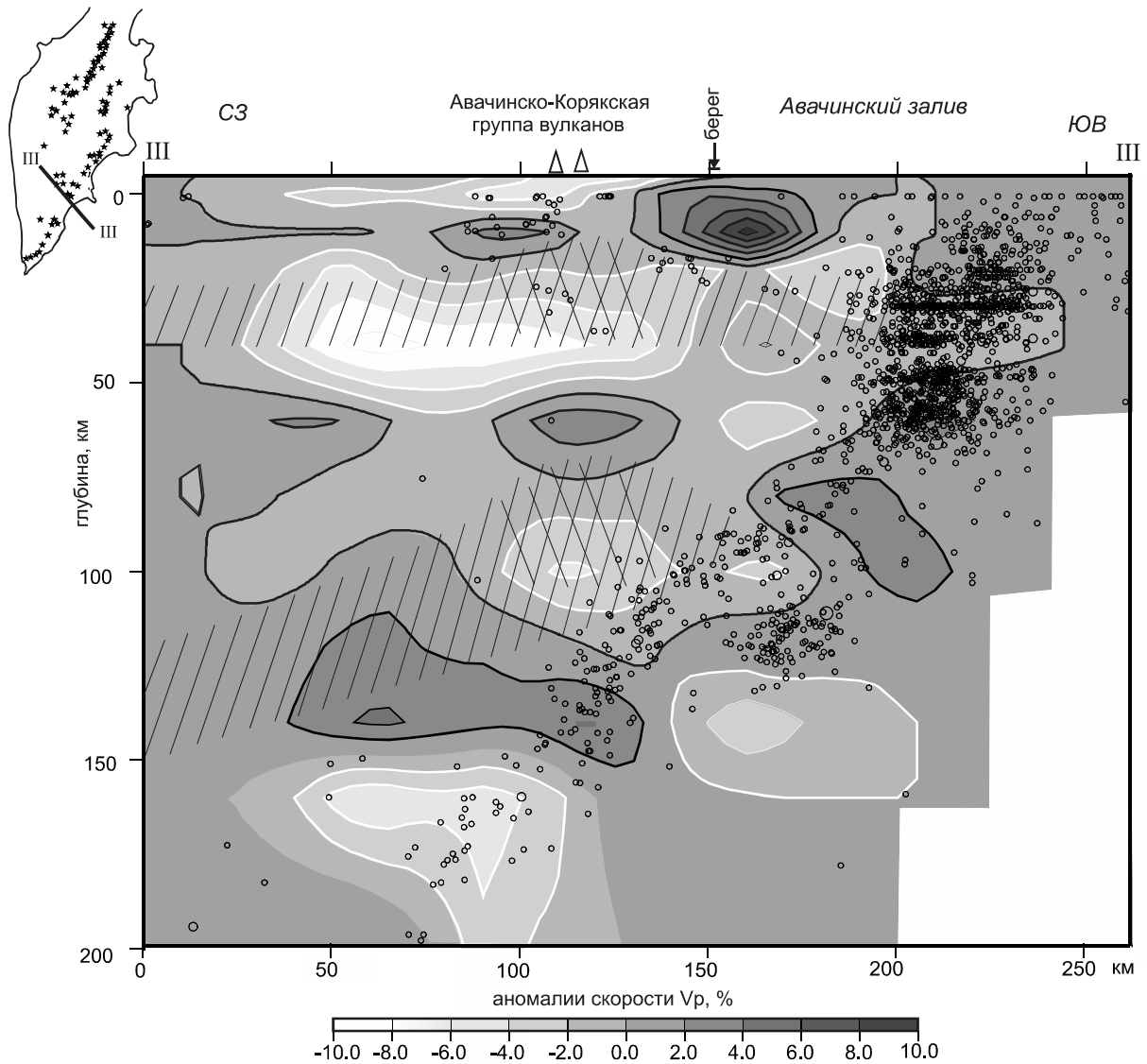
малии пониженной скорости, одна из которых расположена под Авачинско-Корякской группой вулканов и согласуется с аномалией повышенной электропроводности.

#### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты сопоставления данных сейсмографии и геоэлектрики свидетельствуют, что во многих случаях отмечается соответствие аномалий пониженной сейсмической скорости и повышенной электропроводности. Однако имеются случаи, когда такого соответствия не наблюдается. Это вполне объяснимо, так как природа аномалий скорости и электропроводности пород различна. Рассмотрим возможную природу выявленных аномалий.

Предполагается, что аномалии электропроводности могут быть связаны с повышенной пористостью пород и наличием в них гидротермальных растворов и расплавов. Каким образом наличие жидкой





**Рис. 7.** Аномалии скорости продольных сейсмических волн и глубинные проводящие зоны в земной коре и верхней мантии по поперечному профилю III–III.

Условные обозначения на рис. 5 .

фазы влияет на электропроводность пород? Для оценки пористости пород по данным электропроводности обратимся к выражению, предложенному Ваньяном [4] (на основе формулы Арчи) для двухфазовой системы,  $\rho = \rho_{\phi} / (2/3) k$ , где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление проводящей зоны,  $\rho_{\phi}$  – удельное сопротивление порового флюида,  $k$  – пористость. Согласно [3], примем удельное электрическое сопротивление флюида в земной коре равным 0.01 Ом×м. Из формулы следует, что при удельном электрическом сопротивлении слоя 10 Ом×м, пористость будет достигать 0.06 % при полной связанности пор. Очевидно, пористость будет больше, если учесть изолированные и тупиковые каналы.

Обратимся к сейсмическим данным. Для грубых оценок влияния воды на скорость сейсмических волн в малопористых породах можно использовать следующее выражение [17]:

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{V_b} + \frac{1-P}{V} \quad \frac{\Delta V}{V} = P \left( \frac{V_0}{V_b} - 1 \right),$$

где  $V_0$  – скорость продольных волн в скелете,  $V_b$  – скорость в воде. Отношение  $V_0 / V_b$  – примерно от 4 до 5.  $V$  – скорость сейсмических волн в малопористых породах,  $P$  – пористость пород.

Из формул видно, что при изменении пористости на 0.15 % скорость продольных сейсмических волн понизится всего лишь на 0.45 % – 0.75 %. Эти

величины находятся за пределами разрешающей способности сейсмотомографии. Следовательно, если аномалия повышенной электропроводности в земной коре не находит отражение в скорости сейсмических волн, то можно полагать, что общая пористость пород является весьма низкой. Однако имеющиеся поры, насыщенные гидротермальными растворами в связанном состоянии, обеспечивают гальваническую связь для электрического тока, что проявляется увеличенной электропроводностью пород.

Рассмотрим случай, когда аномалия пониженных значений сейсмической скорости 4–8 % не выражена повышенной электропроводностью. По приближенным оценкам по вышеприведенной формуле [17] пористость пород составит 1–2 %. При такой пористости, насыщенной минерализованными растворами, электропроводность пород не проявится в том случае, если поры в породах являются изолированными, т.е. не связаны между собой. Также нельзя исключить, что поры не содержат жидкие хорошо проводящие флюиды.

В районах действующих вулканов предполагается, что земная кора содержит магматические очаги, которые могут быть выражены аномалиями повышенной электропроводности и пониженной скорости. Для оценки пористости пород по данным электропроводности важно определиться с электропроводностью магматического расплава. Главную роль в величине электропроводности расплава играет содержание воды. Электропроводность «сухого» и насыщенного водой силикатного расплава меняется на несколько порядков [16]. По измерениям лавовых потоков, в значительной мере обезвоженных на поверхности, удельное электросопротивление в большинстве случаев оценивается в первые десятки–единицы Ом·м [1, 40, 43, 44]. Данный параметр для базальтовой выплавки в присутствии воды снижается до 0.1 Ом·м [46, 47]. По-видимому, для дальнейших оценок целесообразно принять удельное сопротивление магматического расплава, содержащего воду, приближенно в 0.1 Ом·м.

Обратимся к астеносферному проводящему и низкоскоростному слоям в верхней мантии. Согласно экспериментальным данным, породы верхней мантии в твердом состоянии до температуры 1000°С обладают удельным электрическим сопротивлением, превышающем сотни Ом·м [25, 37, 46]. При увеличении температуры до 1000°С происходит плавное уменьшение электрического сопротивления. При достижении температуры 1200°С отмечается резкое уменьшение сопротивления до единиц–первых десятков Ом·м, что вызвано фракционным плавлением пород. Спад сопротивления происходит в начальной стадии

плавления, когда выплавление фракции невелико, но достаточно для создания сплошной пленочной структуры, покрывающей твердые частицы и обеспечивающей ионную проводимость [33, 48]. Поэтому предполагается, что поверхность проводящего слоя в верхней мантии представляет физическую границу, ниже которой начинается фракционная плавка пород. В последние годы появились работы, свидетельствующие, что оливины, имеющие преимущественное распространение среди ультраосновных пород верхней мантии, содержат воду. (например, работы [35, 36]). Она способствует возникновению зон частичного плавления пород в верхних частях мантии, с которыми может быть связан слой повышенной электропроводности и пониженной скорости. В этом случае температура частичного плавления ультраосновных пород может понизиться, и верхняя граница проводящего слоя будет располагаться выше, чем в случае с «сухим» оливином. По-видимому, смещение этой границы можно ожидать в пределах 20 % точности определения глубин залегания астеносферного проводящего низкоскоростного слоя. Наряду с представлениями о связи повышенной электропроводности ультраосновных пород с частичным плавлением имеются данные лабораторных экспериментов, свидетельствующие о повышении электропроводности оливинов с увеличением влажности [42, 49]. Предполагается, что данный эффект связан с активизацией движения свободных протонов. Изучение степени влияния воды на электропроводность оливина, насыщенного водой при температурах до 1500°К и давлении 3 ГПа, показывает, что удельное электрическое сопротивление в верхних слоях мантии за счет данного эффекта не может быть менее 100 Ом·м [50].

На Камчатке электропроводящий слой в верхней мантии имеет удельное электрическое сопротивление первые десятки–единицы Ом·м, что нельзя объяснить только наличием «влажных» оливинов. Для этого региона с ярко выраженным современным вулканизмом больше подходит гипотеза о связи верхнемантийного проводящего и низкоскоростного слоя с началом частичного плавления ультраосновных пород. В пользу этого свидетельствуют данные геотермии [28–31]. Так, на Западной Камчатке [28], за пределами зоны современного вулканизма, где предполагается стационарный тепловой режим, геотерма достигает температуры 1000° уже на глубине 70–80 км. Здесь кровля верхнемантийного проводящего слоя располагается на глубинах 120–150 км. Есть основания полагать, что на этих глубинах температура будет не менее 1200°С. В районе Центрально-Камчатской вулканической зоны, где региональный тепловой поток 80 мВт/м, температура на подошве земной коры (35–40 км) со-

ставляет  $800^{\circ}\text{C}$  [29, 30]. Здесь кровля проводящего слоя располагается на глубине около 100 км. По приближенным оценкам на этом уровне можно также допустить начало плавления пород верхней мантии.

Для района Восточной Камчатки разработана нестационарная тепловая модель, расчет которой выполнен на основе анализа глубинных процессов в соответствии с адвекционно-полиморфной гипотезой [9, 11, 12, 39]. Тепловая модель включает мантийную астеносферу (превышение  $T$  солидуса) на глубинах примерно 70–120 км. По результатам петрологического анализа пород [32], очаги плавления, из которых на поверхность поступили молодые лавы Камчатки, располагаются в интервале глубин от  $70 \pm 10$  до  $140 \pm 20$  км. В районе современного вулканизма о возможном плавлении пород верхней мантии свидетельствуют также результаты геохимических исследований продуктов извержения Толбачинского вулкана [34].

Таким образом, на основе приведенных данных для Камчатки принята гипотеза о связи электропроводящего и низкоскоростного астеносферного слоев с частичным плавлением верхнемантийных пород. При наличии расплава в субстрате верхней мантии на глубинах 70–200 км горную породу можно представить в виде двухфазной системы. Для приближенной оценки расплава, по данным электропроводности воспользуемся выражением из работы [4]. Нужно иметь в виду, что данное выражение дает возможность выполнить только грубую оценку наличия расплава в районе современного вулканизма.

По-видимому, как и для базальтовой выплавки, рассмотренной выше, удельное электрическое сопротивление в верхней мантии можно принять в  $0.1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . В этом случае при сопротивлении верхней части астеносферного проводящего слоя  $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  пористость пород в слое оценивается в 1.5 %. При такой пористости аномалия скорости продольных волн, согласно выражению, приведенному выше [17], составит 4–5 %. Это для пор, связанных между собой. Однако за счет изолированных и тупиковых каналов пористость будет выше. Данные оценки свидетельствуют о единой природе аномальной зоны повышенной электропроводности и пониженной сейсмической скорости, связанной с частичными расплавами в астеносферном слое. Можно полагать, что совпадение аномалий пониженной скорости продольных волн интенсивностью более 4.5 % с аномалиями повышенной электропроводности в верхней мантии с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки  $\text{Ом}\cdot\text{м}$  указывает на наличие магматического расплава в объеме не менее 1.5 %.

Рассмотрим сопоставление аномалий электропроводности и сейсмической скорости и возможную их природу по профилю вдоль Восточно-Камчатского вулканического пояса. К сожалению, по этому профилю мы располагаем данными по электропроводности земной коры только для Мутновской, Авачинско-Корякской групп вулканов и удаленной от профиля Ключевской группы вулканов. По региональной сети глубинных МТЗ показано положение верхнемантийного проводящего слоя. В глубинном разрезе хорошо выражена зона пониженных скоростей сейсмических волн интенсивностью 4–10 % на глубинах 10–40 км. Природа слоя связывается с повышенной пористостью пород и их возможной насыщенностью жидкими флюидами. В районах Мутновской, Авачинской-Корякской и на удалении от Ключевской групп вулканов выделяются аномалии повышенной электропроводности, которые находят отражение пониженной скоростью сейсмических волн. Аномалии связываются с наличием магматических расплавов.

В верхней мантии к слою повышенной электропроводности местами приурочены аномалии пониженной скорости сейсмических волн. Однако в районе вулкана Карымский отмечается заметное расхождение сейсмических и геоэлектрических данных. Сейсмическая аномалия расположена ниже почти на 30–40 км относительно проводящего слоя. Это различие можно объяснить тем, что по данным МТЗ определяется проводящий слой в верхней мантии, обусловленный началом частичного плавления, когда пористость пород незначительна и составляет десятые доли процента. При этом поры, насыщенные магматическим раствором, связаны между собой, обеспечивают гальваническую связь для электрического тока. При такой пористости не могут проявиться изменения скорости сейсмических волн. На больших глубинах возрастает температура и увеличивается содержание магматического расплава. Так, по приближенным оценкам, при температуре  $1400^{\circ}\text{C}$  пористость пород на рассматриваемых глубинах составляет 15 % [5], что и проявляется аномалией пониженной сейсмической скорости до 4–10 %.

Рассмотрим возможную природу аномалий электропроводности и пониженной скорости сейсмических волн в земной коре в районе Ключевской группы вулканов. При удельном электрическом сопротивлении пород в аномальной проводящей зоне  $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и принятом удельном электрическом сопротивлении магматического расплава  $0.1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  пористость пород при полной связанности пор получается около 2 %. Как мы уже отмечали, полная пористость, включающая изолированные и тупиковые каналы, будет су-

щественно больше. Даже при пористости в 2 % понижение продольных сейсмических скоростей составит 4 % (в формуле вместо  $V_b$  принимается скорость в расплаве  $V_p$ , отношение  $V_o/V_p$  около 3). Эта величина является близкой к данным сейсмической томографии. Таким образом, можно заключить, что пористость в коровой зоне в первые проценты под Ключевской группой вулканов согласуется с данными геоэлектрики и сейсмологии и, по-видимому, является близкой к реальной.

Попытаемся оценить объем расплава в коровом магматическом очаге, питающем Ключевскую группу вулканов. Примерный объем коровой аномалии –  $100 \times 60 \times 25 \text{ км}^3 = 150000 \text{ км}^3$ . Содержание расплава – 2 %. Общий объем расплава около  $3000 \text{ км}^3$ . Это нижний предел, так как нужно еще добавить объем расплава в тупиковых и закрытых каналах. Если предположить, что это еще  $2/3$  неучтенного объема расплава, то приходим к цифре  $5000 \text{ км}^3$ . Примерный вес этого объема лавы составит  $34 \times 10^{12} \text{ т}$ . Данная величина не противоречит оценке расхода лавы Ключевского вулкана за последние  $10^4$  лет, составляющей примерно  $60 \cdot 10^6 \text{ т}$  в год [14]. Таким образом, можно предполагать, что в настоящее время объем лавы в коровом очаге примерно от  $3000$  до  $5000 \text{ км}^3$ . Это небольшая величина для крупнейшего вулканического центра. По-видимому, основная часть магмы находится в верхней мантии, где на глубинах  $80$ – $120 \text{ км}$  выделяется аномалия повышенной электропроводности с удельным электрическим сопротивлением  $5$ – $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Она согласуется с аномалией пониженной сейсмической скорости интенсивностью  $4$ – $8$  %. По приближенным оценкам, пористость пород по электропроводности составляет примерно  $1.5$ – $3$  %, по сейсмической скорости –  $1.3$ – $2.6$  %. Есть основание полагать, что на этих глубинах могут присутствовать магматические расплавы. Примерный объем аномалии сейсмической скорости  $150 \times 60 \times 60 \text{ км}^3 = 540000 \text{ км}^3$ . Содержание расплава – 3 %. Общий объем расплава в магматическом очаге может быть около  $160000 \text{ км}^3$ .

Рассмотрим возможную природу геофизических аномалий в районе Авачинско-Корякской группы вулканов. В земной коре на глубинах  $20$ – $40 \text{ км}$  выражена зона повышенной электропроводности и пониженной скорости, вытянутая в поперечном направлении по отношению к простиранию почти на  $100 \text{ км}$ . Природа аномалии связывается с наличием гидротермальных растворов и магматических расплавов. В районе вулканов электропроводящий слой поднимается к поверхности до глубины  $10$ – $15 \text{ км}$  и проводимость его возрастает. Аномальная зона повышенной электропроводности и пониженной скорости

связывается с наличием гидротермальных растворов и магматических расплавов. По данным электропроводности и сейсмической скорости пористость пород в аномальной зоне предполагается величиной в первые проценты.

В верхней мантии выделяется проводящий слой, который поднимается с глубины примерно  $120 \text{ км}$  до глубины  $70 \text{ км}$  под вулканами. Слой связывается с наличием жидких флюидов. За пределами вулканов пористость слоя составляет первые десятые доли процента, что находится за пределами разрешающей способности сейсмотомографии. Поэтому он не проявился пониженной сейсмической скоростью. В приподнятой части слоя под Авачинско-Корякской группой вулканов удельное электрическое сопротивление уменьшается до  $5$ – $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Здесь аномалия повышенной электропроводности находит отражение в виде аномалии пониженной сейсмической скорости. По приближенным оценкам, пористость пород по электропроводности составляет  $1.5$ – $3$  %. Аномалии связываются с наличием магматического очага. Размеры его  $50 \times 40 \times 50 \text{ км}^3$ . При пористости 3 % объем магмы в очаге будет  $3000 \text{ км}^3$ . Как видно, размеры мантийного очага в несколько раз меньше очага под Ключевской группой вулканов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным глубинного магнитотеллурического зондирования и сейсмотомографии выявлены основные особенности в распределении геоэлектрических и скоростных неоднородностей в земной коре и верхней мантии Камчатки.

Геоэлектрическая модель содержит коровый проводящий слой на глубинах  $15$ – $35 \text{ км}$ , вытянутый вдоль средней части Камчатки. В районе Центрально-Камчатского вулканического пояса слой приближен к дневной поверхности до глубины  $15$ – $20 \text{ км}$ , где его проводимость существенно возрастает. Литосфера Восточной Камчатки включает поперечные проводящие зоны шириной до  $50 \text{ км}$ , имеющие продолжение в сторону Тихого океана. К выступам поперечных зон приурочены крупные центры современного вулканизма. Верхняя мантия содержит астеносферный проводящий слой, вытянутый вдоль Камчатки. Кровля слоя с глубины  $150 \text{ км}$  на западной Камчатке поднимается до глубины  $70$ – $80 \text{ км}$  под зоной современного вулканизма. Удельное электрическое сопротивление слоя оценивается в  $5$ – $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

По данным сейсмотомографии в тектоносфере Восточной Камчатки выявлены аномалии пониженной и повышенной сейсмической скорости продольных сейсмических волн, отражающие латеральную

расслоенность, которая включает земную кору, жесткую часть верхней мантии, астеносферный слой в интервале глубин  $\sim 70$ – $100$  км и высокоскоростной слой, к которому приурочена сейсмофокальная зона. Аномалии пониженных скоростей в земной коре и верхней мантии в большинстве случаев соответствуют аномалиям повышенной электропроводности, связываемым с повышенной пористостью пород, насыщенной жидкими флюидами.

Однако имеются и различия, которые связаны с различной природой физических свойств горных пород. Электропроводность зависит от поровых каналов, заполненных жидкими флюидами, создающих сквозные пути для электрического тока. Удельная электропроводность двухфазной среды пропорциональна электропроводности флюида и его объемному содержанию. Сейсмическая скорость в существенной мере зависит от общей пористости пород, включающей также изолированные и тупиковые каналы, которые могут быть заполнены жидкими флюидами, не вносящими свой вклад в перенос электрического тока. Различие в геометрии порового пространства и насыщенность его жидкими флюидами с различной электропроводностью определяет ситуации, когда мы наблюдаем согласованность и отличие аномалий повышенной электропроводности и пониженной сейсмической скорости в земной коре и верхней мантии.

По данным об электропроводности и сейсмической скорости выполнена оценка пористости горных пород в аномальных зонах земной коры и верхней мантии, характеризующихся повышенной электропроводностью и пониженной сейсмической скоростью. На этой основе выделяются зоны частичного плавления в литосфере и астеносфере, питающие активные вулканы. Так, под Ключевской группой вулканов на глубине  $15$ – $30$  км предполагается коровый магматический очаг с пористостью пород примерно  $2\%$ . Размеры очага –  $100 \times 60 \times 25$  км<sup>3</sup> =  $150000$  км<sup>3</sup>. Общий объем расплава может быть около  $3000$ – $5000$  км<sup>3</sup>. В верхней мантии на глубинах  $80$ – $120$  км выделяется зона с пористостью пород по электропроводности – примерно  $1.5$ – $3\%$ , по сейсмической скорости –  $1.3$ – $2.6\%$ . Есть основание полагать, что на этих глубинах могут присутствовать магматические расплавы. Примерный объем аномалии сейсмической скорости –  $150 \times 60 \times 60$  км<sup>3</sup> =  $540000$  км<sup>3</sup>. Содержание расплава –  $3\%$ . Общий объем расплава в магматическом очаге может быть около  $160000$  км<sup>3</sup>.

В земной коре Авачинско-Корякской группы вулканов на глубинах  $20$ – $40$  км выражена поперечная зона повышенной электропроводности и пониженной скорости протяженностью почти  $100$  км. В рай-

оне вулканов электропроводящий слой поднимается к поверхности до глубины  $10$ – $15$  км и проводимость его возрастает. Аномальная зона повышенной электропроводности и пониженной скорости связывается с наличием гидротермальных растворов и магматических расплавов. По данным об электропроводности и сейсмической скорости пористость пород в аномальной зоне предполагается величиной в первые проценты.

В верхней мантии под Авачинско-Корякской группой вулканов на глубинах  $70$ – $100$  км выделяется область с повышенной пористостью пород –  $1.5$ – $3\%$ . Она связывается с наличием магматического очага. Размеры его  $50 \times 40 \times 50$  км<sup>3</sup>. При пористости  $3\%$  объем магмы в очаге будет  $3000$  км<sup>3</sup>. Как видно, размеры мантийного очага в несколько раз меньше очага под Ключевской группой вулканов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ:16-05-00059; грантов ДВО РАН:15-I-2-008 и 16-I-1-0127.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамчук Ю.В., Трубников Б.А. Электропроводность текущей лавы Южного Ново-Толбачинского прорыва. М.: Ин-т атомной энергии, ИАЭ-2841. 1977. № 2. С. 47–61.
2. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев А., Пак Г., Пушкарев В.Г., Сеньюков С.Л. Результаты сейсмических наблюдений земной коры в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С. 3–18.
3. Ваньян Л.Л., Хайдман Р.Д. О природе электропроводности консолидированной коры // Физика Земли. 1996. № 4. С. 5–11.
4. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Науч. мир, 1997. 219 с.
5. Веселов О.В., Гордиенко В.В., Соколова Л.С., Завгородняя О.В., Зуев Ю.Н., Каракин А.В., Лысак С.В., Моисеенко У.И., Суетнова Е.И., Шварцман Ю.Г. О температуре частичного плавления пород верхней мантии // Геофиз. журн. 1977. № 2. С. 47–61.
6. Гонтовая Л. И., Санина, И.А., Сеньюков С.Л., Степанова М.Ю. О скоростной объемной модели литосферы Восточной Камчатки (по данным сейсмической томографии) // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 150–159.
7. Гонтовая Л.И., Левина В.И., Санина И.А., Сеньюков С.Л., Степанова М.Ю. Скоростные неоднородности литосферы под Камчаткой // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 56–64.
8. Гонтовая Л.И., Хренов А.П., Степанова М.Ю., Сеньюков С.Л. Глубинная модель литосферы в районе Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 3–11.
9. Гонтовая Л.И., Гордиенко В.В. Глубинные процессы, сейсмологическая и тепловая модели Восточной Камчатки // Геология и полезные ископаемые мирового океана. Киев, 2006. № 2. С. 107–121.
10. Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В. Структура верхней мантии зоны перехода океан–континент в райо-

- не Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 13–29.
11. Гордиенко В.В. Процессы в тектоносфере Земли (Адвекционно-полиморфная гипотеза). Saarbrücken: LAP, 2012. 256 с.
  12. Гордиенко В.В. О РТ-условиях в магматических очагах мантии Земли // Геофиз. журн. 2014. № 6. С. 28–57.
  13. Дапенг Ж., Франко П., Лиу Л. Структура и динамика мантии под восточной Россией и прилегающими регионами // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 9. С. 1188–1203.
  14. Действующие вулканы Камчатки // Под ред. С.А.Федотова, Ю.П. Масуренкова. М.: Изд-во. Наука, 1991. Т. 1. 300 с.
  15. Кулаков И.Ю., Кукарина Е.В., Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Верниковский В.А. Магматические источники в мантийном клине под вулканами Ключевской группы и влк. Кизимен (Камчатка) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 1. С. 109–124.
  16. Лебедев Е.Б. Влияние воды на физические свойства магматических расплавов // Физико-химические проблемы гидротермальных магматических процессов. М.: Наука, 1975. С. 48–54.
  17. Ляховицкий Ф.М., Хмелевской В.К., Ященко З.Г. Инженерная геофизика. М.: Недра, 1984. 252 с.
  18. Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 3–10.
  19. Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г. Глубинная геоэлектрическая модель области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Физика Земли. 2004. № 6. С. 54–67.
  20. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Глубинные проводящие зоны в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Физика Земли. 2006. № 6. С. 60–68.
  21. Мороз Ю.Ф., Лагута Н.А., Мороз Т.А. Магнитотеллурическое зондирование Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 83–93.
  22. Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М. Глубинное строение вулканической зоны южной Камчатки по геофизическим данным // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 12–26.
  23. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Самойлова О.М. Глубинная электропроводность Восточного побережья Северной Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2015. № 2. С. 65–80.
  24. Мороз Ю.Ф., Логинов В.А., Улыбышев И.С. Глубинный геоэлектрический разрез области сочленения Срединного, Ганальского выступов и Центрально-Камчатского прогиба // Вестн. Краунц. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 17–34.
  25. Пархоменко Э.И., Бондаренко Л.Т. Электропроводность горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1972. 179 с.
  26. Санина, И.А., Низкоус И. В., Гонтовая Л. И. и др. Структура Камчатской зоны субдукции по результатам сейсмической томографии // Докл. АН. 2005. Т. 404, № 5. С. 678–683.
  27. Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. 291 с.
  28. Смирнов Я.Б., Сугрбов В.М. Тепловой поток, гидротермальная активность и динамика развития глубинных зон областей кайнозойского вулканизма // Геодинамика, магнообразование и вулканизм. Петропавловск-Камчатский, 1974. С. 175–196.
  29. Смирнов Я.Б., Сугрбов В.М. Земной тепловой поток в Курило-Камчатской и Алеутской провинциях // Вулканология и сейсмология. 1980. № 1. С. 16–31.
  30. Смирнов Я. Б. Тепловое поле территории СССР. М.: ГУГК, 1980. 150 с.
  31. Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В. Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 91–107.
  32. Фролова Т.И., Перчук Л.Л., Буликова И.А. Магматизм и преобразование земной коры активных окраин. М.: Недра, 1989. 260 с.
  33. Хитаров Н.И., Слуцкий А.Б. Влияние давления на температуру плавления альбита и базальта (по данным измерения электропроводности) // Геохимия. 1965. № 12. С. 1395–1403.
  34. Хубуная С. А., Ерёмена Т. С., Соболев А. В. Формационная принадлежность калиевых трахиандезитобазальтов побочного извержения 2012–2013 гг. вулкана Плоский Толбачик по геохимическим признакам (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2016. № 1. С. 37–55.
  35. Bai Q., Kohlstedt D.L. Substantial hydrogen solubility in olivine and implications for water storage in the mantle // Nature. 1992. V. 357. P. 672–674.
  36. Bell D.R., Rothman G.R. Water in the earth's mantle: the role of nominally anhydrous minerals // Science. 1992. V. 255. P. 1391–1397.
  37. Duva A. Are the laboratory electrical conductivity data relevant to the Earth? // Acta Geodeat., Montanist, Acad. Sci. Hung. 1976. V. 11. (3–4). P. 485–496.
  38. Gorbato A., Dominguez J., Suarez G. et al. Tomographic imaging of the P-wave velocity structure beneath the Kamchatka peninsula // Geophys. J. Int. 1999. V. 137. P. 269–279.
  39. Gordienko V. Essential points of the advection – polymorphism hypothesis // NCGT Journal. 2015. N 2. P. 115–137. .
  40. Frischncht P.C. Fields about an oscillating dipole // Colorado School of Mines. 1967. V. 62, N 326. 78 p.
  41. Jiang, G., Zhao, D., Zhang. G. Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka // Tectonophysics. 2009. V. 495. P. 190–203.
  42. Karato, S. The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle // Nature. 1990. V. 347. P. 272–273.
  43. Keller G.V., Rapolla A. Physical volcanology. Amsterdam. New York, 1974. 133 p.
  44. Murase T., McBirney A.R. Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures // Bull. Geol. Soc. Amer. 1973. V. 84, N 11. P. 3563–3592.
  45. Nizkous I., Kissling E., Gontovaya L. et. al. Correlation of Kamchatka lithosphere velocity anomalies with subduction processes // Volcanism and subduction The Kamchatka Region geophysical monograph. Seri. 172. P. 97–106. Copyright 2007 by the AGU. 10/ 1029/172GM09 (350 pp).
  46. Rai C.S., Manghanani M.H. Electrical conductivity of ultramafic rock to 1820 Kelvin // Phys. Earth Planet. Inter. 1978. V. 17. P. 6–13.
  47. Shankland T.I., Waff H.S. Conductivity in fluid-bearing rocks // J. Geophys. Res. 1974. V. 79, N 32. P. 5409–5417.
  48. Waff H. S. Theoretical consideration of electrical conductivity

- in partially molten mantle and implications for geothermometry // J. Geophys. Res. 1974. V. 79, N 26. P. 1136–1157.
49. Wang D., Mookherjee M., Xu Y., Karato S. The effect of water on the electrical conductivity in olivine // Nature. 2006. V. 443. P. 977–980, doi:10.1038/nature05256.
50. Yoshino T., Matsuzaki T., Yamashita S., Katsura T. Hydrous olivine unable to account for conductivity anomaly at the top of the asthenosphere // Nature. 2006. V. 443. P. 973–976.

*Рекомендована к печати В.Г. Каплуном*

*Yu.F. Moroz, L.I. Gontovaya*

### **Deep structure of Kamchatka from MTS and seismotomography**

Deep magnetotelluric sounding (MTS) and seismic tomography data revealed key features in distribution of deep velocity and geoelectric heterogeneities in the crust and upper mantle of Eastern Kamchatka. Combined studies of electric conductivity and seismic velocity anomalies provide discussions on their possible origin. The geoelectric model consists of the crustal conducting layer at depths of 15–35 km extending along the middle part of Kamchatka. In the Central Kamchatka volcanic belt, the layer is close to the ground surface up to the depths of 15–20 km, where its conductivity increases. Horizontal conducting zones were revealed at a width of 50 km in the lithosphere of Eastern Kamchatka extending towards the Pacific Ocean. Horizontal zones are associated with large centers of current volcanism. The upper mantle of Kamchatka consists of the asthenospheric conducting layer that rises from a depth of 150 km in Western Kamchatka and extends to the depths of 70–80 km under the current volcanic belt.

The seismotomographic data from vertical and horizontal cross-sections of Eastern Kamchatka reveal low and high seismic velocity anomalies of P-waves. The anomalies indicate lateral layering, which is composed of the Earth's crust, rigid upper mantle, asthenospheric layer at the depth of 70–100 km and high-velocity layer related to a seismofocal zone. The cross-sections show low velocity anomalies that in most cases correspond to high-conductivity anomalies associated with high rock porosity saturated by liquid fluids. However, there are some dissimilarities which are likely linked to the electric conductivity depending on pore channels filled with liquid fluids providing direct line to electrical current. Seismic velocity at a greater extent depends on the total rock porosity comprising isolated and death channels that may be filled with liquid fluids not contributing to the electrical current transfer. Using the electric conductivity and seismic velocity ratio data the estimate of rock porosity in anomalous zones of the Earth's crust and the upper mantle showed that they are characterized by high electric conductivity and low seismic velocity. Based on this evaluation we identify zones of partial melting in the lithosphere and asthenosphere feeding active volcanoes.

**Key words:** magnetotelluric sounding (MTS), seismic tomography, electric conductivity, seismic velocity, rock porosity, mineralized solutions and magmatic melts, Kamchatka Peninsula.