

УДК 550.3

АВАЧИНСКО-КОРЯКСКАЯ ГРУППА ВУЛКАНОВ: ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ И ГЛУБИННЫЕ ПРОЦЕССЫ (КАМЧАТКА)

© 2023 г. В. А. Логинов^а, *, Л. И. Гонтовая^а, С. Л. Сеньюков^б, **

^аИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пуйна, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

^бКамчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”,
бульвар Пуйна, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

*e-mail: naick1609@mail.ru

**e-mail: ssl@emsd.ru

Поступила в редакцию 15.07.2022 г.

После доработки 15.09.2022 г.

Принята к публикации 03.11.2022 г.

Выполнен анализ результатов гравиметрических, сейсмических, электромагнитных исследований, а также данных о глубинной сейсмичности литосферы в районе активных вулканов Авачинско-Корякской группы, входящей в состав Восточно-Камчатского вулканического пояса. Разработана комплексная геофизическая модель земной коры и литосферной мантии данного района. На основе схемы распределения геофизических неоднородностей в земной коре, в частности под Авачинским вулканом, рассмотрены основные особенности внутрикоревой флюидонасыщенности и каналов продвижения глубинных флюидов в верхнюю часть коры. Согласно комплексной модели, предполагается, что напряжения, возникающие на границах зон с различными условиями дефлюидизации, являются одной из причин сейсмичности под действующими вулканами. С привлечением полученных данных региональной сейсмической томографии рассматривается общая схема глубинных процессов в литосфере и особенности системы магматического питания вулканов. Предполагается, что активные вулканы, в частности Авачинский, связаны с астеносферным слоем литосферной мантии на глубине примерно 70–120 км, откуда флюид/расплавы поступают в магматический очаг нижней коры, затем, под влиянием тепла из нижнекорового источника, формируется периферический очаг в верхней коре под конусом вулкана.

Ключевые слова: геофизическая модель, электропроводность, сейсмичность, флюиды, магматический очаг

DOI: 10.31857/S0203030622700031, EDN: ARDEHG

ВВЕДЕНИЕ

Район Авачинско-Корякской группы вулканов (АКГВ) входит в состав Восточно-Камчатского вулканического пояса (ВКВП), который протягивается вдоль восточного побережья Камчатки вплоть до Кроноцкого полуострова. Формирование АКГВ началось, вероятно, со среднего плейстоцена [Действующие вулканы ..., 1991]. Она представлена рядом действующих (Авачинский, Корякский) и неактивных (Козельский, Арик, Аар) вулканов северо-западного (СЗ) простирания, протягиваясь примерно параллельно Малко-Петропавловской (М-П) зоне поперечных СЗ дислокаций, что говорит об их генетической связи. Возможно, эта зона находится на продолжении позднемелового трансформного разлома, выделенного в северо-восточной (СВ) части Тихого океана [Селиверстов, 2009], а на северо-во-

стоке АКГВ граничит с Налычевской купольно-кольцевой структурой [Действующие вулканы ..., 1991]. В пределах М-П зоны поперечных дислокаций и АКГВ выполнен широкий спектр геолого-геофизических исследований, однако многие из задач, касающихся глубинного строения и геодинамики, остаются дискуссионными. Значительное место при их решении отводится флюидам, что особенно актуально для районов, где протекают активные тектонические и вулканические процессы и земная кора насыщена флюид/расплавами. Известно, что одному из геофизических методов (геоэлектрики) доступно выделение неоднородностей, удельное электрическое сопротивление в пределах которых в несколько раз превышает его значение во вмещающей среде. Основное влияние при этом оказывает присутствие водного флюида.

В настоящей работе рассматриваются соотношения электропроводящих и сейсмических (скоростных) неоднородностей в комплексе с расположением сейсмоактивных зон. Несмотря на то, что глубинные геофизические исследования в районе активных (Авачинского и Корякского) вулканов выполнены фрагментарно, используемый комплекс данных позволяет разработать геофизическую модель земной коры и литосферной мантии района. Такая модель может иметь не только научное, но и практическое значение, в частности, для разработки гидротермальной модели данного района и поиска гидротермальных месторождений, определения природы сейсмической активности района активных вулканов в связи с поиском предвестников возможных извержений и других задач. В работе использованы результаты геофизических исследований, выполненных в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, а также сейсмологических данных Камчатского филиала ФИЦ Единой Геофизической службы РАН.

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

При решении задач, направленных на изучение глубинного строения земной коры района АКГВ, использован широкий спектр геофизических методов, в частности гравиметрии, сейсмологии (искусственных и естественных источников сейсмических волн), геоэлектрики. Однако следует отметить фрагментарность выполненных исследований, затрудняющую комплексную интерпретацию полученных в разные годы результатов. Достаточно хорошо изучены структура и некоторые свойства верхней части земной коры в районе конуса Авачинского вулкана, хотя явно недостает детальных площадных наблюдений, которые позволили бы “увидеть” объемную модель геофизических неоднородностей и общую структуру земной коры, а также конкретнее охарактеризовать протекающие здесь глубинные процессы.

Данные гравиметрии в районе Авачинского вулкана

Согласно данным гравиметрии, АКГВ расположена в районе южной периферии крупного максимума поля силы тяжести, поставляемого с Налычевской купольно-кольцевой структурой [Действующие вулканы ..., 1991]. Южнее, параллельно вулканической группе, проходит зона высоких градиентов, фиксирующая понижение поля по направлению к АКГВ. Со стороны ЮЗ от вулканической группы, начиная от берега Авачинской бухты, наблюдается понижение уровня гравитационного поля по направлению к вулканам. Параметры поля предполагают наличие блоков по поверхности мелового фундамента, погру-

жающихся в сторону вулканов. В плане эта область совпадает с М-П зоной поперечных дислокаций. У ЮЗ подножий активных вулканов отмечена крупная гравитационная ступень, которая связывается с погружением мелового фундамента по глубинному разлому. В пределах района исследований разлом прослеживается вдоль вулканов до побережья Авачинского залива [Зубин и др., 1989] (рис. 1) и, вероятно, имеет продолжение в акватории [Попруженко и др., 1997]. В результате решения прямой задачи гравиметрии была подобрана гравитационная модель внутреннего строения района Авачинского вулкана и предполагаемого периферического очага. Согласно модели, основная масса очага (плотностная аномалия) расположена в интервале глубин 2–6 км ниже уровня моря, его поперечный размер около 10 км. Из расчетов следовало, что плотность вещества земной коры в пределах очага, даже включая его предполагаемую расплавленную часть, не должна превышать 2.7 г/см³. В плане очаг несколько вытянут к СВ от центральной части конуса.

Сейсмическая модель верхней коры (Авачинский вулкан)

В районе Авачинского вулкана были выполнены исследования верхней части земной коры методом КМПВ (корреляционный метод преломленных волн). В качестве источников сейсмических волн использовались взрывы [Балеста и др., 1988]. Сейсмические наблюдения осуществлялись вдоль профиля, пересекающего СЗ склон конуса вулкана Авачинский с пропуском наблюдений (8 км) в центральной части конуса. По этой причине данные о строении коры под конусом получены в той ее части, которая просвечивалась сейсмическими лучами (ниже уровня моря). Двухмерная сейсмическая модель разрабатывалась по данным различного типа продольных (Р) сейсмических волн, поперечные (S) волны в данном эксперименте не использовались. Согласно скоростной модели, конус Авачинского вулкана (в направлении простирания ВКВП) расположен на границе двух блоков земной коры, которые характеризуются различной структурой и свойствами (скоростью сейсмических волн V_p) (рис. 2). ЮЗ блок – относительно низкоскоростной, СВ – охарактеризован повышенными значениями V_p . Они разделены близвертикальной расслоенной зоной (неоднородностью) шириной около 5 км с аномальными сейсмическими свойствами. В ее пределах скорость V_p в целом относительно повышена, с включением прослоев с инверсией V_p , что может быть связано с расслоенностью и флюидонасыщенностью этого блока коры; на глубину он прослеживается по точкам дифракции в зоне контакта с вмещающей средой примерно до глубины кристаллического фундамента (см. рис. 2).

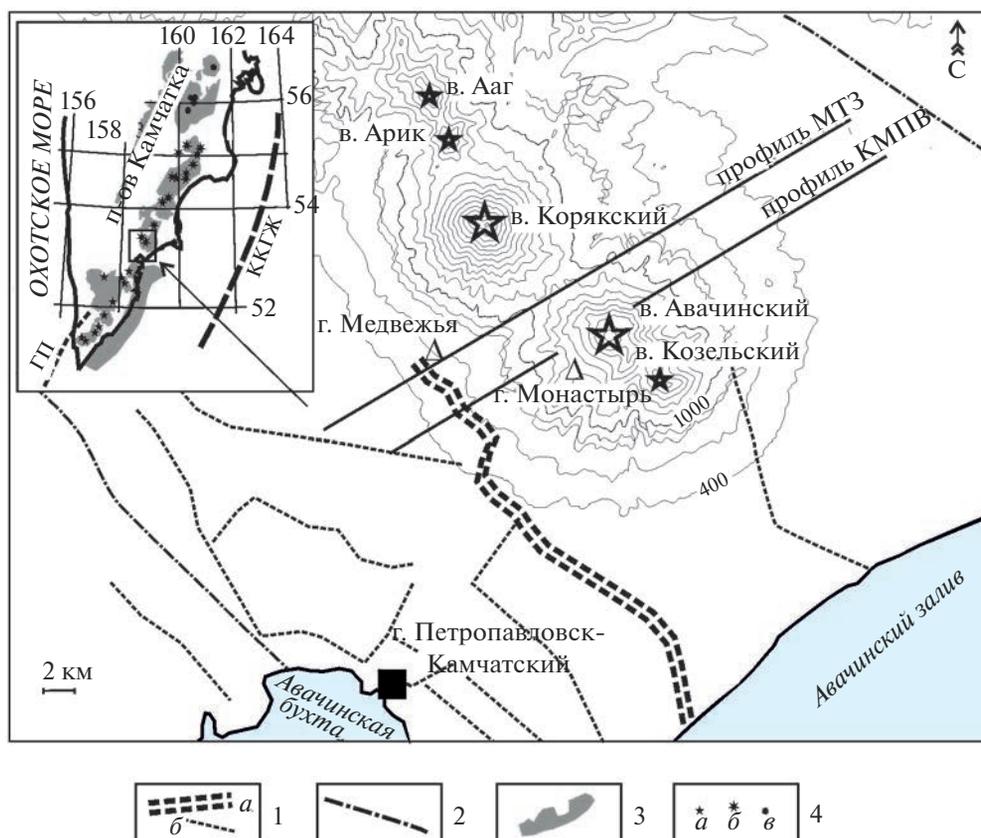


Рис. 1. Схема геофизических исследований методами МТЗ и КМПВ в районе Авачинско-Корякской группы вулканов. 1 – глубинный разлом (а) и другие тектонические нарушения (б) по гравиметрическим данным; 2 – глубинные разломы по геологическим данным [Зубин, Козырев, 1989]; на врезке: 3 – молодые эффузивы Камчатки, 4 – вулканы Южно-, Восточно- и Центральнo-Камчатского вулканических поясов (а, б, в соответственно); прямоугольником показанo расположение района исследований.

Вероятно, по сейсмическим данным, эту неоднородную зону можно связывать с областью магматического питания вулкана (магматической колонной), включающей магмовод и относительно уплотненный, проработанный дайками, силлами и другими образованиями земной коры [Балеста и др., 1988]. В структурном плане он располагается на перегибе мелового фундамента, поднятого в СВ блоке до уровня моря и опущенного в юго-западном направлении на глубину до 5 км. В пределах этой области протекают активные сейсмические события, гипоцентры вулканотектонических (ВТ) землетрясений отмечены до глубины консолидированной коры (см. рис. 2) и, вероятно, являются отражением процессов, связанных с перемещением флюидов и расплавов, поступающих из нижних горизонтов земной коры. Отметим, что для большинства мировых вулканов, исследованных в последние десятилетия методами сейсмической томографии, отмечены аномалии скорости сейсмических Р- и S-волн (V_p , V_s и параметра V_p/V_s) в верхней части земной коры, которые связываются с магматическими очагами.

Они, как правило, приурочены к прогибам фундамента и, как предполагается, формируются под воздействием тепла от более глубоких магматических источников. Вероятно, такова природа сейсмической неоднородности под конусом Авачинского вулкана (периферического магматического очага). По данным КМПВ, очаг выделен под конусом на глубине примерно 1–3 км ниже уровня моря в виде аномального включения с незначительным уменьшением скорости V_p в верхней части магматической колонны [Балеста и др., 1988]. Отметим, что значения V_p (примерно 4.8–5.0 км/с) и плотности (2.7 г/см^3) довольно высокие. Возможно, это связано с трещиноватостью пород, с заполнением трещин дайками или их пористостью и флюидонасыщенностью, что в условиях высоких РТ значений, согласно экспериментальным данным, приводит к повышению скорости V_p . Скорость V_s при этом может практически не изменяться (такой эффект связан с природой этих двух скоростных параметров). Сведения о состоянии среды в предполагаемой очаговой зоне были также получены по результатам анализа амплитудно-частот-

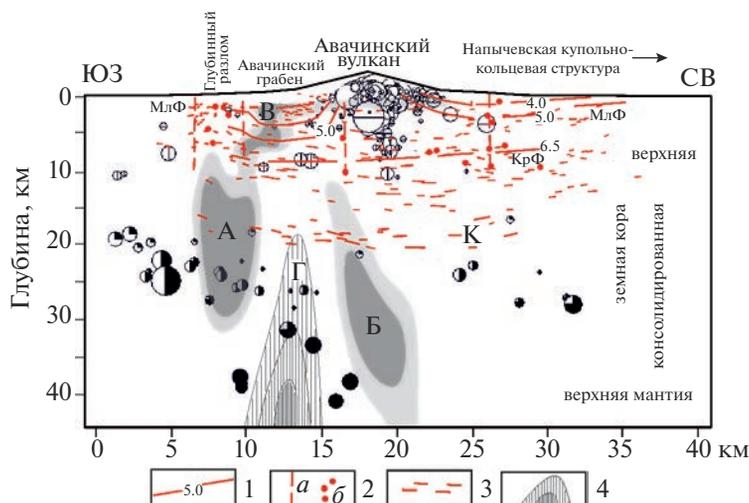


Рис. 2. Комплексная геофизическая модель земной коры в районе Авачинского вулкана (данные КМПВ выделены красным цветом).

1 — изолинии скорости сейсмических Р-волн (км/с); 2 — линии предполагаемых разломов (а) и точки дифракции (б); 3 — отражающие площадки; 4 — аномалия пониженных значений электропроводности (Г); А, Б, В — области аномалий повышенных значений электропроводности. Легенда гипоцентров землетрясений приведена на рис. 3а.

ных характеристик сейсмических Р-волн. На их основе подтверждена глубина периферического очага под конусом (1–3 км ниже уровня моря). Он связывается с аномальной зоной, вероятно, содержащей высокотемпературные флюид/расплавы [Балеста и др., 1989]. Последние годы на Камчатке при изучении систем магматического питания активных вулканов и выявления магматических очагов, в частности, периферического под вулканом Авачинский, используется метод лучевой сейсмической томографии с использованием данных ВТ землетрясений [Bushenkova et al., 2019]. В качестве основного признака, на основании которого выделен периферический очаг, принято аномально высокое значение параметра V_p/V_s под конусом вулкана на глубине в среднем 2 км ниже уровня моря.

Наиболее контрастно в сейсмической модели верхней коры (ЮЗ блок разреза) выражена относительно низкоскоростная зона, связываемая со структурой Авачинского грабена, ширина которой достигает в среднем до ~10 км (см. рис. 2). Со стороны СВ и ЮЗ, грабен контролируется глубинными разломами, хорошо выраженными в сейсмических данных. Вероятно, на СВ такая разломная зона взаимосвязана с активными процессами внедрения флюид/расплавов в “тело” вулкана. Она контролируется точками дифракции и ВТ землетрясениями в области контакта с магматической колонной, а на ЮЗ — с процессами формирования общей структуры земной коры АКГВ. В пределах грабена скорость сейсмических волн (V_p) понижена в среднем на 0.5–1.0 км/с по сравнению с соседними блоками коры. Грабен характеризуется хорошо выраженной в сейсмическом разрезе

расслоенностью, что может быть связано с высокой степенью флюидонасыщенности метеорными и, возможно, глубинными (в основании грабена) флюидами. ЮЗ граница грабена контролируется глубинным разломом, который протягивается вдоль подножий вулканов до побережья Авачинского залива (см. рис. 1). Он хорошо выражен в геолого-геофизических данных, характеризуется повышенным уровнем сейсмической активности, а на сейсмическом разрезе КМПВ контролируется точками дифракции, гипоцентрами землетрясений и другими особенностями. В целом общая структура верхней коры вдоль профиля КМПВ находится в хорошем соответствии с результатами сейсмической “шумовой” томографии [Koulakov et al., 2014].

На сейсмическом разрезе КМПВ в консолидированной коре выделена отражающая граница (раздел К), природа которой при относительно малоглубинных исследованиях КМПВ оставалась не совсем ясной. Глубина границы, морфология, некоторые сейсмические свойства (в частности, тонкая расслоенность), сейсмическая активность говорят о том, что эта граница сформирована в результате глубинных процессов, связанных с формированием структуры верхней и консолидированной части коры под вулканом. Она подстилает слой коры с относительно пониженными значениями скорости V_p (примерно 6.8 км/с) и признаками разуплотнения (трещиноватости, повышенной проницаемости). Возможно, такие особенности средней части земной коры под вулканом являются результатом метаморфических процессов, протекающих с активным выделением флюидов и их “быстрым” перемещением

вдоль тонко расслоенной отражающей (и ослабленной) границы **К**.

Данные геоэлектрики и комплексная модель земной коры (АКГВ)

В районе активных вулканов выполнены детальные магнитотеллурические зондирования (МТЗ) по профилю, который пересекает перевал между конусами вулканов Корякский и Авачинский. Профиль располагается примерно параллельно сейсмическому профилю КМПВ. Расстояние между профилями ≈ 3 км (см. рис. 1). Положение профиля МТЗ связано не только с относительной доступностью проведения полевых наблюдений; здесь в 2008–2009 гг. было зарегистрировано значительное повышение уровня сейсмической активности в районе Корякского вулкана с инъекциями магмы в области его конуса [Гордеев и др., 2009]. Гипоцентры глубоких землетрясений, предваряющих период активизации, располагались в районе ЮВ подножия вулкана и перевала в нижней коре на глубине примерно 20–30 км и более. Таким образом, активизировалась область нижней коры в районе грабена и контролирующего грабен глубинного разлома, который протягивается вдоль склонов активных вулканов (см. рис. 1). Отметим, что в ЮЗ части профиля МТЗ, примерно в районе глубинного разлома (у подножия вулкана Корякский), расположен небольшой лавовый конус (г. Медвежья), возраст конуса относят к позднему плейстоцену–раннему голоцену (данные М.Ю. Пузанкова). Представлялось важным изучить особенности структуры электропроводности земной коры, а также ее взаимосвязь с другими геофизическими неоднородностями и особенностями сейсмичности в слоях земной коры, которые в целом определяют характер протекающих в районе вулканов глубинных процессов. Методика исследований и интерпретации полевых измерений приведена в работе [Мороз, Логинов, 2019]. По данным инверсии кривых МТЗ построена геоэлектрическая модель земной коры вдоль профиля до глубины более 40 км, т. е. практически до раздела Мохо (рис. 3). Наиболее заметным тектоническим элементом в электромагнитном поле верхней коры представляется Авачинский грабен. Он был выявлен и ранее по комплексу геолого-геофизических данных, однако взаимосвязь грабена с глубинной структурой земной коры представлялась не совсем ясной. В целом, в поле электромагнитных аномалий грабен выделяется как зона относительно низких значений удельного электрического сопротивления (ρ). Однако в ее пределах (в частности со стороны ЮЗ борта грабена) четко просматривается узкая и протянутая до глубины ~ 7 км и более (т.е. до глубины кристаллического фундамента) интенсивная аномалия повышен-

ной электропроводности, значения ρ в ее пределах составляют первые единицы и менее Ом м (аномалия **(В)**), см. рис. 2, 3). Она связывается с глубинным разломом вдоль ЮЗ подножий активных вулканов. В ЮЗ части профиля МТЗ аномалия проецируется примерно в район г. Медвежьей (ЮЗ борт грабена). Разлом четко проявляется в результатах геофизических методов (см. выше). Судя по установленной взаимосвязи электромагнитных аномалий **(А)** и **(В)**, он прослеживается глубоко в консолидированной коре и является глубинным разломом, в пределах которого протекают активные сейсмические процессы; гипоцентры событий приурочены к основанию аномалии **(А)**. В связи с этим можно предположить, что нижняя часть грабена может содержать глубинные флюиды, которые, возможно, образуются в результате метаморфических процессов. Таким образом, на основе полученных результатов можно предположить, что Авачинский грабен является структурой глубинного заложения. Он контролируется активным глубинным разломом в консолидированной части коры, где протекают активные глубинные процессы, обеспечивающие поступление глубинных флюидов в нижнюю часть грабена.

Модель электропроводности земной коры сопоставлена с сейсмической моделью КМПВ и особенностями сейсмичности под конусом Авачинского вулкана (см. рис. 2). Безусловно, распределение гипоцентров в коре несколько отличается (см. рис. 2, 3), отражая детали глубинного процесса. Что же касается геофизических аномалий, в частности глубинных геоэлектрических, то размер аномалий (как и небольшое расстояние между профилями) и разрешающая способность метода позволяют связать эту модель с данными КМПВ под конусом Авачинского вулкана. Детали глубинного строения, конечно, отличаются вдоль вулканической зоны, однако основные особенности глубинной модели, особенно при близком положении профилей КМПВ и ГСЗ, вряд ли имеют значительные отличия (речь, конечно, не идет о самой верхней части разреза).

Как следует из комплексной геофизической модели (см. рис. 2), гипоцентры землетрясений в большинстве своем приурочены к участкам интенсивных аномалий электропроводности. Наиболее глубокая аномалия **(Б)** расположена в нижней части консолидированной коры. На разрезе КМПВ она проецируется непосредственно под конус Авачинского вулкана, именно к ней приурочена серия гипоцентров событий, создающих активную зону вдоль практически вертикально ориентированной аномалии **(Б)** в нижней коре. Возможно, она протягивается и глубже, в верхнюю часть литосферной мантии. Судя по интенсивности аномалии, ее значительных размерах и сейсмической активности, эту область можно

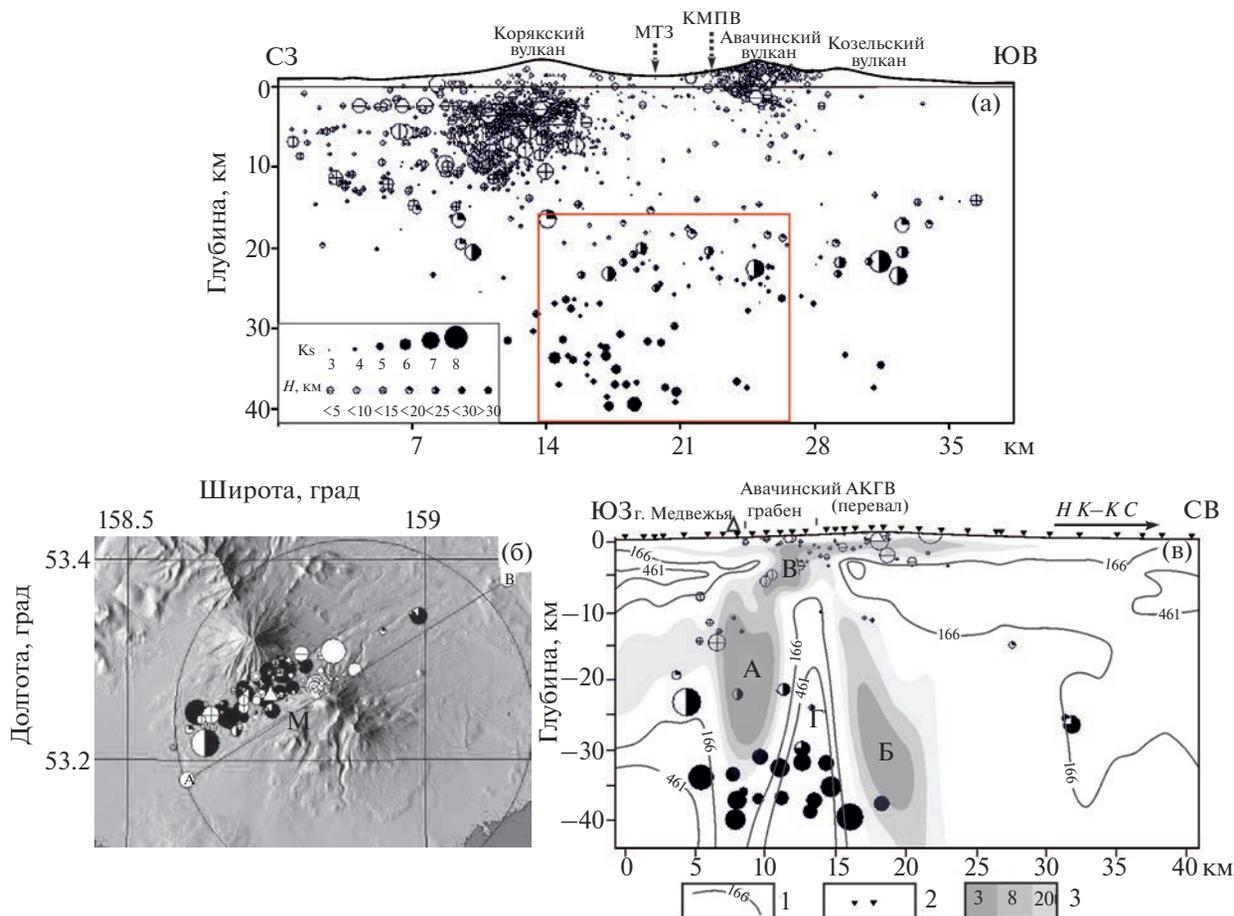


Рис. 3. Особенности электропроводности и сейсмичности в земной коре (Авачинский перевал). а – схема гипоцентров землетрясений в вертикальном сечении (СЗ–ЮВ) земной коры за период 1994–2020 гг., красным прямоугольником показана область повышенной сейсмичности в период 2008–2009 гг.; б – карта эпицентров землетрясений в районе профиля МТЗ в период активизации вулкана Корякский; в – геоэлектрический разрез по данным МТЗ в сопоставлении с сейсмичностью вдоль профиля. 1 – изолинии значений у.э.с. (Ом м); 2 – пункты наблюдений МТЗ; 3 – области наиболее высоких значений электропроводности (Ом м) в земной коре. Стрелка указывает положение Налачевской купольно-кольцевой структуры (Н К–К С).

связывать с глубинным магматическим очагом, возможно, общим, питающим Корякский и Авачинский вулканы. Заметим, что аномалия (Г) (низкой электропроводности) оконтурена гипоцентрами глубоких землетрясений повышенной интенсивности. Судить о природе этой аномалии сложно, так как мы “не видим” ее возможного продолжения глубже раздела Мохо. Отметим, что относительно сильные землетрясения на больших глубинах в зонах контакта блоков со значительными различиями параметров электропроводности могут быть связаны с процессами дефлюидизации (например, Спитакское землетрясение 07.12.1988 г. [Бердичевский и др., 1996]).

О ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ

Результаты изучения структуры, свойств, состояния верхней мантии методами геофизики, в част-

ности сейсмологии и геоэлектрики, широко освещаются в научной литературе. Согласно лабораторным данным, скорости сейсмических волн мантийных пород разного состава мало различаются между собой. По этой причине смена составов не может создавать значительных скоростных вариаций. В большей степени на значения скорости могут влиять изменения температурного режима, напряженного состояния, фазовые переходы, эклогитизация коровых пород, степень флюидонасыщенности и другие факторы. Предполагается, что все эти факторы могут являться причиной расслоенности верхней мантии (включая ее литосферную часть), которая подчеркивается протяженными сейсмическими границами. Сопоставление данных глубинных сейсмических зондирований и с использованием мощных искусственных источников сейсмических волн показало, что в районах материков и океанов наиболее устойчивой границей такого типа является

граница (или раздел) на глубине примерно 80–100 км. По своей распространенности ее можно рассматривать в качестве глобальной границы N, именуемой в сейсмологии как 8-градусная сейсмическая граница [Павленкова, 1995]. Она разделяет жесткий слой верхней части верхней мантии и ослабленный (астеносферный) слой повышенной пластичности, который, по данным глубинной геоэлектрики, отмечается повышенными значениями параметра электропроводности. Во многих районах активного вулканизма магматические очаги современных вулканов также обнаруживаются в верхней мантии на глубине, соответствующей разделу N. Так, по результатам петрологического анализа пород очаги плавления, из которых на поверхность поступили молодые лавы Камчатки, располагаются в интервале глубин от 70 ± 10 до 140 ± 20 км [Фролова и др., 1989]. При рассмотрении конвективных процессов в зонах субдукции, связанных с формированием магматических очагов в мантийном клине, приводится значение глубины (~ 100 км), на которой теряет устойчивость перидотит. Он здесь распадается на безводный перидотит и водную жидкость, поднимающуюся вертикально [Stern, 2002; Evans, Ritter, 1997]. По результатам геофизических исследований во многих активных регионах в отмеченном интервале глубин выделены, в частности, сейсмические неоднородности, которые связываются с мантийными магматическими очагами.

Современные представления о структуре и свойствах литосферной мантии Камчатки базируются, в основном, на данных интерпретации записей сейсмических волн от землетрясений, взятых из региональных каталогов КФ ФИЦ ЕГС РАН. Наиболее общие особенности отражены в структуре гипоцентров в пределах “падающей” под Камчатку сейсмофокальной зоны (СФЗ) и ее энергетических характеристиках. Гипоцентры событий в СФЗ распределены неравномерно, что особенно заметно в области разделов коры и верхней мантии, а также на глубине примерно 100 км (возможно, раздела N), глубже которого изменяется внутренняя структура СФЗ. Известно, что подавляющая часть выделенной энергии землетрясений в пределах фокального слоя (75%) приходится на верхний (0–40 км) слой литосферы, где по условиям температур и давлений возможно хрупкое разрушение пород. В то же время в интервале 0–100 км выделяется 90% сейсмической энергии, что, вероятно, свидетельствует об изменении физических свойств литосферы. Глубже ~ 100 км изменяется геометрическая форма СФЗ, в частности, наклон и ширина, а в интервале ~ 200 км СФЗ “рассыпается”, образуя неупорядоченное поле гипоцентров [Селиверстов, 2009]. Однако к этому интервалу бывают приурочены довольно сильные события (к примеру, Жупановское землетрясение 2016 г., $K_s = 15.7$), что может быть связано с фазо-

выми переходами вещества верхней мантии на этой глубине или какими-то другими процессами. Исследование скоростных характеристик (в значениях V_p) литосферы в области гипоцентров землетрясений в СФЗ у берегов Камчатки и, в частности, Авачинского залива, показало хорошо выраженную скоростную неоднородность фокального слоя и его сложную внутреннюю структуру. Наиболее контрастные осложнения скоростного поля приурочены к интервалу глубин ~ 90 – 120 км, здесь отмечаются и заметные горизонтальные смещения высокоскоростных неоднородностей СФЗ [Славина и др., 2007 и др.]. Таким образом, особенности пространственного распределения гипоцентров землетрясений косвенно свидетельствуют о ее неоднородности фокального слоя по глубине и его “закономерной” расслоенности вдоль, в данном случае, Восточно-Камчатского вулканического пояса. В последние десятилетия на Камчатке для изучения особенностей строения литосферных и более глубоких слоев верхней мантии широко используется метод лучевой сейсмической томографии на базе времен пробега сейсмических волн местных и удаленных землетрясений, регистрируемых региональной сетью станций КФ ФИЦ ЕГС РАН. Результаты этих экспериментов широко опубликованы в отечественных и зарубежных изданиях [Толбачинское ..., 2017]. Для построения трехмерных скоростных моделей нами разработаны различные подходы и алгоритмы решения обратной задачи. Однако все они, по сути, “работают” в рамках частного случая более общей классической задачи прикладного анализа – восстановления функции по ее значениям в некоторых точках. Отсюда очевидны сложности сейсмотомографической инверсии для геологической среды (геотомографии) и причины некоторого отличия скоростных моделей, разработанных разными авторами.

В работе [Добрецов и др., 2012] приведен результат региональной томографической инверсии (масштаб – первые тысячи км) на базе данных глобальных и региональных землетрясений для Курило-Камчатской вулканической дуги и, в частности, юга Камчатки. В работе анализируются возможные причины изменения формы, мощности, угла наклона слэба (т.е. наклонного слоя относительно повышенной скорости Р-волн), который погружается, по мнению авторов, под вулканическую дугу до глубины переходного слоя между верхней и нижней мантией и глубже (до ~ 800 км). В приведенной скоростной модели юга Камчатки, с нашей точки зрения, представляет интерес четко выраженный разрыв аномалии повышенной скорости V_p на глубине в среднем ~ 200 км. Известно, что примерно на такой глубине была обнаружена граница Леманн (Инге Леманн), на ко-

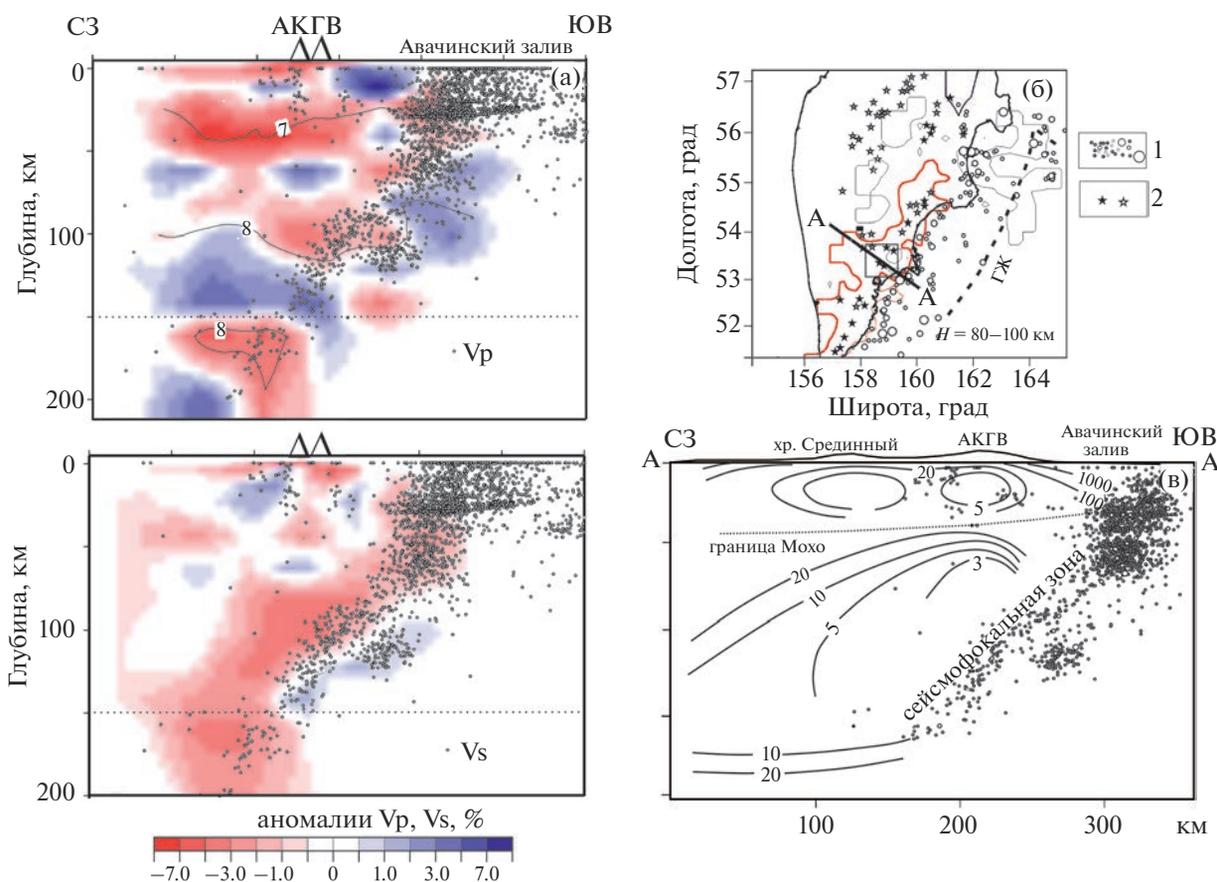


Рис. 4. Геофизические неоднородности литосферы в районе АКГВ.

а – вертикальное сечение (СЗ–ЮВ) объемной скоростной модели литосферы (в аномалиях скорости V_p и V_s), пунктирной линией на моделях показан нижний уровень высокого разрешения; б – расположение района исследований: 1 – гипоцентры землетрясений, 2 – активные и потухшие вулканы соответственно, красным цветом показан контур изолинии, ограничивающий область пониженных значений сейсмической скорости V_p и V_s в районе ВКВП; в – схема аномалий электропроводности литосферы в изолиниях у.э.с.

торой понижается скорость прохождения сейсмических волн, возможно, из-за фазовых переходов, изменения пластичности астеносферы или других причин. Природа этой границы остается не совсем ясной. Она проявляется под материками, не всегда – под океанами; была обнаружена в районе Байкальского рифта на глубине в среднем около 230 км (устное сообщение С.А. Ефимова). Вероятно, данные об этой границе и ее природе могли бы представлять значительный интерес для понимания природы глубинных процессов верхней мантии Камчатки тем более, что примерно в таком же интервале глубин отмечено характерное изменение “рисунка” фокального слоя.

Об особенностях структуры литосферы Восточной Камчатки, в частности, в районе АКГВ, можно судить по результатам сейсмотомографической инверсии времен пробега сейсмических волн от местных региональных землетрясений, зарегистрированных Камчатской сетью станций

КФ ФИЦ ЕГС РАН. Расположение станций на полуострове и гипоцентров землетрясений позволило построить относительно корректную объемную скоростную (V_p , V_s , V_p/V_s) модель земной коры и верхней мантии для района, охватывающего Восточно-Камчатский и Центрально-Камчатский вулканические пояса до глубины не более 150 км (рис. 4а). Несмотря на различия подходов разных авторов, скоростные модели сходны по наиболее контрастным скоростным характеристикам, что свидетельствует об их устойчивости при решении обратной задачи [Gorbatov et al., 1999; Гонтовая и др., 2003; Nizkous et al., 2006]. В области мантийного клина под Восточно-Камчатским вулканическим поясом выявлена хорошо выраженная расслоенность литосферы. Она включает слой земной коры, слой повышенной скорости жесткой части верхней мантии и слой относительно пониженной скорости (ослабленный, астеносферный слой) в интервале глубин

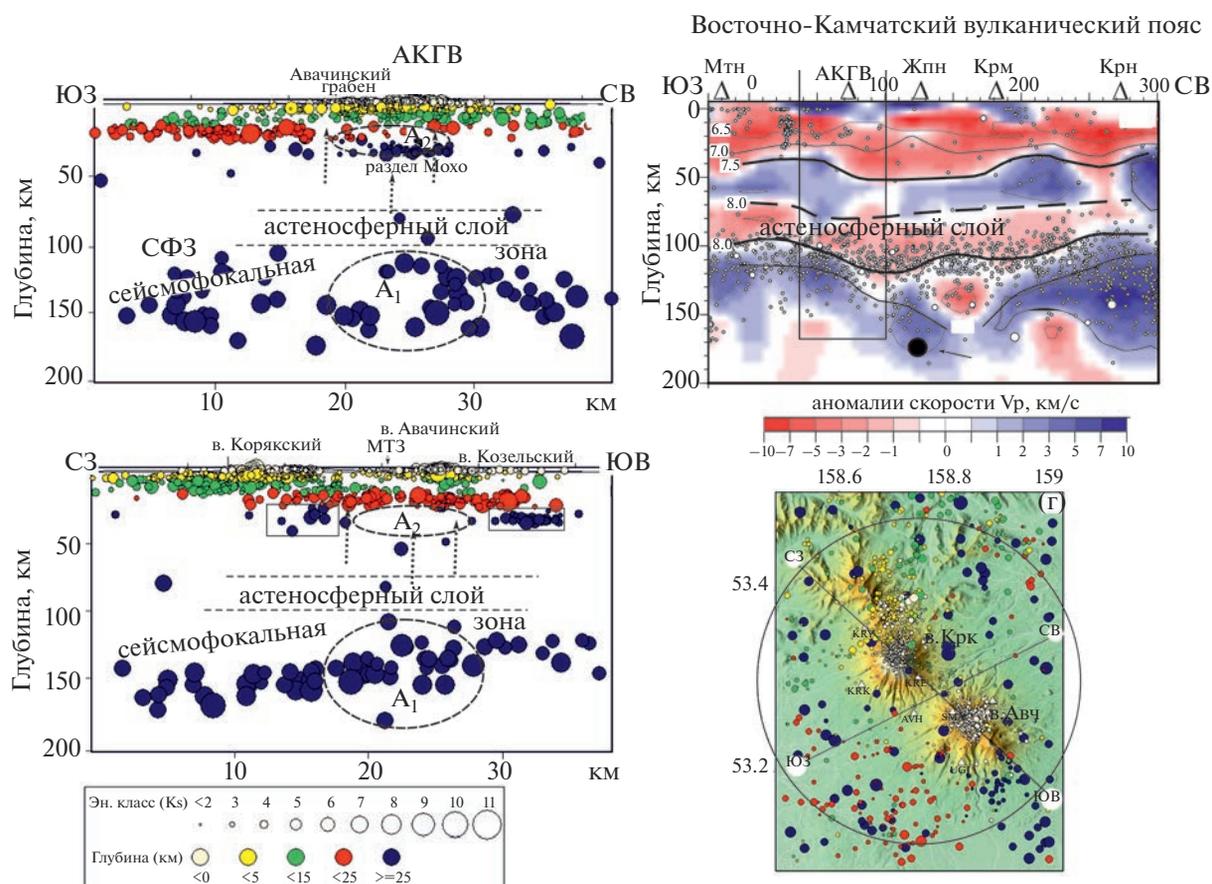


Рис. 5. Геофизическая неоднородность литосферы как отражение глубинной геодинамики в районе АКГВ. а, в – схема глубинных процессов в литосфере под вулканами: А₁, А₂ – мантийные и коровые геофизические аномалии, рамками выделены зоны предполагаемых глубинных разломов, стрелками показаны предполагаемые пути перемещения флюид/расплавов; б – фрагмент вертикального сечения скоростной модели литосферы в районе ВКВП (рамкой выделен район исследований), стрелкой показан гипоцентр землетрясения (2016 г., K_s = 15.7, H = 178 км), сокращенные названия вулканов: Мтн – Мутновский, Жпн – Жупановский, Крм – Карымский, Крн – Кроноцкий; г – схема эпицентров землетрясений в литосфере района исследований.

70–120 км. Фокальный слой охарактеризован в целом повышенными значениями сейсмической скорости, однако нарушен участками пониженной скорости (рис. 5б). Расслоенность литосферы выражена в области мантийного клина и на вертикальном сечении северо-западного простира- ния, хотя здесь сейсмические разломы менее вы- держаны и, вероятно, разбиты разломами (см. рис. 4а). Под АКГВ в скоростном поле выделяет- ся зона относительно пониженных значений сей- смических скоростей (V_p и V_s) в интервале глубин примерно 70–120 км. Вероятно, к ней приурочена зона магматического питания активных вулканов АКГВ. Этой зоне соответствует расположенная в верхней части литосферы аномалия повышенных значений электропроводности [Мороз, 1991] (см. рис. 4в). В целом, комплекс аномальных геофи- зических характеристик выявленной под вулка- нами неоднородности свидетельствует о высокой степени расплав/флюидонасыщенности среды в

ее пределах. Отметим, что эта неоднородность рас- положена на уровне некоторого изменения наклона фокального слоя и нарушения “закономерного рас- положения” гипоцентров в его пределах.

В скоростной модели представляется важным отметить аномалию пониженной скорости в низах коры и верхней части литосферной мантии (зоне перехода земная кора–верхняя мантия), которая представлена на вертикальном сечении под вулканическим поясом в виде глубокой депрес- сии, нижняя граница которой проходит по разде- лу Мохо (см. рис. 5б) [Nizkous et al., 2006]. АКГВ расположена на ЮЗ краю этой предполагаемой депрессии, Карымский вулканический центр – на СВ. Одной из контрастных аномалий пони- женной скорости, которая четко выделяется на всех скоростных моделях, разработанных разны- ми авторами, является поперечная скоростная структура СЗ простираения, которой соответству-

ет М-П зона поперечных дислокаций и АКГВ; она прослеживается до побережья Авачинского залива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов гравиметрических, сейсмических, электромагнитных исследований, дополненных данными о сейсмической активности земной коры и верхней мантии, позволил разработать комплексную геофизическую модель литосферы в районе Авачинско-Корякской группы вулканов.

1. Активные вулканы АКГВ приурочены к прогибам мелового и кристаллического фундаментов, а также отражающего (предположительно, тонко расслоенного) раздела в средней коре. Возможно, этот раздел сформировался в результате метаморфических процессов, сопровождающихся выделением флюидов, которые поступают в верхнюю, покрывающую эту границу, толщу верхней коры. С границей связана слабая сейсмическая активность, очевидно, вызванная горизонтальными тектоническими смещениями, способствующими более интенсивному продвижению глубинных флюидов. Флюиды, вероятно, могут поступать также из более глубокого источника в виде флюид/расплавных включений. Предполагается, что с подобными глубинными процессами могут быть связаны периоды активизации вулканов.

2. В нижней коре, непосредственно под конусом Авачинского вулкана и прогибами границ мелового и кристаллического фундаментов, установлена узкая высокопроводящая неоднородность, которая может протягиваться глубже раздела Мохо в литосферную мантию. Судя по свойствам, форме и характеру взаимосвязи с приповерхностной структурой верхней коры, эта геоэлектрическая неоднородность соответствует глубинному (нижнекоровому) магматическому очагу вулкана (или активным вулканам АКГВ) либо глубинному разлому, по которому в земную кору поступают глубинные флюид/расплавы из магматического очага верхней мантии. Этот процесс, в частности под Авачинским вулканом, сопровождается активной сейсмичностью, вероятно, связанной с процессами дефлюидизации. Особенности распределения геофизических неоднородностей совместно с картиной сейсмичности позволили установить некоторые особенности флюидной модели под вулканом и пути передвижения флюидов и расплавов по глубинным разломам и границам раздела в земной коре.

3. В результате длительной вулканической активности, что привело к формированию проги-

бов коровых границ раздела, сформировался глубинный разлом, который в настоящее время прослеживается вдоль ЮЗ подножий вулканов. Разлом активен и связан с областью относительно высоких значений электропроводности в средней части коры, свидетельствующей о насыщенности этой области глубинными флюидами.

4. Согласно электромагнитным данным, Авачинский грабен представляется структурой глубинного заложения и контролируется глубинным разломом, по которому в нижнюю часть грабена могут поступать глубинные флюиды. Аномально низкие значения электрического сопротивления в пределах грабена свидетельствуют о высокой степени тектонической раздробленности и аномальном флюидном режиме. В какой-то мере это может объясняться поступлением соленой морской воды по глубинному разлому, который протягивается вдоль склонов вулканов до побережья Авачинского залива и, возможно, в акваторию.

5. На основе региональной сейсмической томографии ранее была разработана скоростная модель литосферы Восточной Камчатки. Она включает слой земной коры, жесткий слой литосферной мантии и астеносферный (ослабленный) слой в верхней части верхней мантии на глубине примерно 70–120 км. Магматические очаги в верхней мантии приурочены к этому интервалу глубин. В районе АКГВ мантийный очаг в верхней мантии устанавливается по сейсмическим (данным сейсмотомографии) и электромагнитным данным. В целом Малко-Петропавловская зона поперечных (СЗ простираения) дислокаций и район АКГВ располагаются в пределах обширной поперечной скоростной аномалии, которая протягивается до акватории залива и хорошо проявляется в скоростной сейсмотомографической модели до глубины не менее 80–100 км.

5. В пределах Восточно-Камчатского вулканического пояса АКГВ расположена в районе ЮЗ периферии Налычевской купольно-кольцевой структуры, которой соответствует обширная положительная гравитационная аномалия. Исходя из некоторых особенностей скоростных характеристик (безусловно, требующих более детальных исследований), все же представляется возможным допустить следующее. В рассматриваемой части вулканического пояса существует глубокая депрессия (по разделу Мохо), на ЮЗ которой расположена АКГВ, а на северо-востоке – Карымский вулканический центр. В целом вся эта тектоническая “конструкция” каким-то образом связана с более глубокой частью верхней мантии, где могут протекать сложные глубинные процессы, например, фазовые переходы. Их отражением, в свою очередь,

может быть высокая сейсмическая активность верхней мантии в этом районе типа Жупановско-го землетрясения (2016 г., $K_s = 15.7$, $H = 178$ км).

Некоторые выводы не являются окончательными и бесспорными. Очевидно, что дальнейшее развитие рассматриваемой авторами задачи связано с необходимостью разработки количественных комплексных геолого-геофизических моделей глубинного строения, свойств, состояния земной коры и верхней мантии этого активного вулканического района. Выполнение таких исследований имеет важное практическое значение, связанное с программой дальнейшего развития Камчатского края.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

В статье использованы данные, полученные в рамках темы НИР АААА-А19-119031590060-3 Госзадания № 075-00576-21 КФ ФИЦ ЕГС РАН на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Гринь Н.Е. и др.* Возможности сейсмического метода при изучении зон питания современных вулканов // Вулканология и сейсмология. 1989. № 6. С. 42–53.
- Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев А.А. и др.* Сейсмическая модель Авачинского вулкана (по данным КМПВ – ГСЗ) // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 43–55.
- Бердичевский М.Н., Борисова В.П., Голубцова Н.С. и др.* Опыт интерпретации МТ зондирований в горах Мало-го Кавказа // Физика Земли. 1996. № 4. С. 99–117.
- Гонтовая Л.И., Левина В.И., Санина И.А. и др.* Скоростные неоднородности литосферы под Камчаткой // Вулканология и сейсмология. 2003. № 2. С. 1–9.
- Гордеев Е.И., Дроздин В.А., Дубровская И.К. и др.* Корякский вулкан – современное состояние и активизация 2008–2009 гг. // Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии “Вулканизм и геодинамика”. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 588–590.
- Действующие вулканы Камчатки / Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. Т. 2. 415 с.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов Ю.Д.* Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 12. С. 633–661.
- Зубин М.И., Козырев А.И.* Гравиметрическая модель строения Авачинского вулкана (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1989. № 1. С. 81–94.
- Мороз Ю.Ф., Логинов В.А.* Глубинная геоэлектрическая модель Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 2. Вып. 42. С. 9–24.
- Мороз Ю.Ф.* Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М: Наука, 1991. 181 с.
- Павленкова Н.И.* О региональной сейсмической границе в самых верхах мантии // Физика Земли. 1995. № 12. С. 1–14.
- Попруженко С.В., Зубин М.И.* Тектоника и некоторые особенности сейсмичности шельфовой зоны Авачинского залива и прилегающих районов // Вулканология и сейсмология. 1997. № 2. С. 74–81.
- Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. 291 с.
- Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Бабанова Д.Н. и др.* Исследование особенностей строения фокальной зоны Камчатки на участке Авачинский залив – мыс Лопатка // Геофизические исследования. М.: ИФЗ РАН, 2007. № 8. С. 117–126.
- Толбачинское Трещинное извержение 2012–2013 гг. (ТТИ-50) / Отв. ред. Е.И. Гордеев, Н.Л. Добрецов. Новосибирск: СО РАН, 2017. 421 с.
- Фролова Т.И., Перчук Л.Л., Бурикова И.А.* Магматизм и преобразование земной коры активных окраин. М.: Недра, 1989. 262 с.
- Bushenkova N., Koulakov I., Senyukov S. et al.* Tomographic Images of Magma Chambers Beneath the Avacha and Koryaksky Volcanoes in Kamchatka // JGR Solid Earth. 2019. V. 124. P. 9694–9713.
- Evans J.R., Ritter J.R.R.* Deep structure of Medicine Lake volcano, California // Tectonophysics. 1997. V. 275. № 1/3. P. 221–241.
- Gorbatov 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. № 2. P. 269–279.
- Koulakov I., Jaxybulatov K., Shapiro N. et al.* Asymmetric caldera-related structures in the area of the Avacha group of volcanoes in Kamchatka as revealed by ambient noise tomography and deep seismic sounding // J. of Volcanol. and Geotherm. Res. 2014. V. 285. P. 36–46.
- Nizkous I., Sanina I., Kissling E. et al.* Velocity properties of ocean-continent transition zone lithosphere in Kamchatka region according to seismic tomography data // Physics of the Solid Earth. 2006. V. 42. № 4. P. 286–296.
- Stern R.J.* Subduction Zones // Reviews of geophysics. 2002. V. 40. № 4. P. 1012–1049.

Avachinsky and Koryaksky Group of Volcanoes: Geophysical Inhomogeneity of the Lithosphere and Deep Processes (Kamchatka)

V. A. Loginov^{1, *}, L. I. Gontovaya¹, and S. L. Senyukov^{2, **}

¹*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

²*Kamchatka Branch of the Federal Research Center “Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences”, bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

*e-mail: naick1609@mail.ru

**e-mail: ssl@emsd.ru

The article presents the results of our gravimetric, seismic and electromagnetic research, as well as the data on deep seismicity of the lithosphere in the area of the active Avachinsky and Koryaksky group of volcanoes, which is the part of the East Kamchatka volcanic belt. We managed to develop the comprehensive geophysical model of the Earth's crust and lithospheric mantle of this area. Based on the distribution scheme of the Earth's crust geophysical inhomogeneities in general, and particularly beneath Avachinsky Volcano, we revealed specific features for both intracrustal fluid saturation and conduits through which deep fluids rise to the upper part of the crust. According to the comprehensive model, stresses arising at the margins of zones with different defluidisation conditions, in particular, in the lower part of the crust, and characterizing by contrasting electrical conductivity values, are one of the most important reasons for active seismicity beneath active volcanoes. The general scheme of the deep lithospheric processes and the volcanoes magma feeding system specific features are based on the obtained results and the data on the local seismic tomography. It is assumed that Avachinsky Volcano, being a part of the active Avachinsky and Koryaksky group of volcanoes, is connected with the asthenospheric layer at a depth of ~70–120 km, from which fluid/melts enter into the magma chamber located in the lower crust and then, under the influence of the heat from the lower crustal source, the peripheral chamber is formed in the upper crust beneath the volcano's cone.

Keywords: geophysical model, electrical conductivity, seismicity, fluids, magma chamber