



УДК 550.34:550.21

Ю. А. Кугаенко¹, В. А. Салтыков¹, А. В. Горбатилов²,
М. Ю. Степанова²

¹ Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: ku@emsd.ru

² Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва

Развитие модели глубинного строения средней части Толбачинского Дола

С целью развития представлений о глубинном строении магматической системы и питающих каналов Толбачинского Дола (южной региональной зоны шлаковых конусов вулкана Плоский Толбачик) в 2010–2012 гг. широкополосной цифровой аппаратурой выполнена съёмка фонового микросейсмического излучения вдоль трёх параллельных линейных профилей, заложенных через эруптивные центры разного возраста вкост основного магмоподводящего разлома. Применён метод низкочастотного микросейсмического зондирования (новая технология пассивной сейсмоки), использующий естественные сигналы — фоновое микросейсмическое излучение широкого диапазона частот. По данным микросейсмической съёмки построены глубинные разрезы до 20 км, отражающие распределения относительных скоростей поперечных сейсмических волн. Под тремя прорывами показаны элементы магматической системы, которые проявляются как низкоскоростные аномалии. Выявленные аномалии сопоставлены с данными по геофизической изученности глубинного строения исследуемого района и проинтерпретированы как разноглубинные области магматических очагов и соединяющих их питающих каналов. Показано, что элементы магматической питающей системы под тремя изученными эруптивными центрами схожи между собой. Выдвинуто предположение, что существует закономерность в конфигурации питающих систем извержений средней части Толбачинской региональной зоны ареального вулканизма.

Толбачинский Дол — крупная зона ареального базальтового вулканизма, протянувшаяся на юг от действующего вулкана Плоский Толбачик в южной части Ключевской группы вулканов. История вулканизма Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов и детальное описание БТТИ изложены в [1, 2, 12–14]. Средняя часть Толбачинского Дола представляет отдельный интерес и имеет ряд особенностей: сосредоточение здесь самых крупных шлаковых конусов (относительная высота около 300 м); контрастность состава поступающей на поверхность магмы; высокий коэффициент эксплозивности извержений последних 2 тыс. лет. Здесь находится Северный прорыв (1975 г.) Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ). Применение для регистрации сейсмических сигналов цифровой широкополосной аппаратуры и развитие принципиально новой технологии оценки параметров геологических объектов — методики низкочастотного микросейсмического зондирования [5] — позволило подойти к изучению глубинной структуры района БТТИ на современном уровне, уточнить ранее полученные результаты и выявить новые особенности глубинного строения Толбачинского Дола. С целью развития представлений о глубинном строении магматической системы и питающих каналов Толбачинского Дола в 2010–2012 гг. широкополос-

ной цифровой аппаратурой выполнена съёмка фонового микросейсмического излучения вдоль трёх параллельных линейных профилей, заложенных через эруптивные центры разного возраста вкост основного магмоподводящего разлома (рис. 1). В качестве источника информации о глубинном строении используются сейсмические сигналы естественной природы — фоновое микросейсмическое излучение в широком диапазоне частот.

Первый профиль пересек цепочку конусов Северного прорыва БТТИ 1975–1976 гг. Второй прошёл на 3 км южнее, через область более древних извержений, представленную вулканическими постройками горы Высокой (возраст — менее 1 тыс. лет) и горами 1004 и Пра-Высокой (возраст — около 2 тыс. лет). Третий профиль был заложен через голоценовый шлаковый конус Алайд (возраст — 1–1,5 тыс. лет). Шаг микросейсмической съёмки 500 м.

По данным микросейсмической съёмки построены глубинные разрезы до 20 км, отражающие распределения относительных скоростей поперечных сейсмических волн вдоль указанных профилей.

Вертикальные разрезы земной коры вдоль микросейсмических профилей П-1 и П-2 приведены на рис. 2. Разрезы демонстрирует сложное строение зоны современного ареального вулканизма. При интерпретации выявленных неоднородностей мы учи-

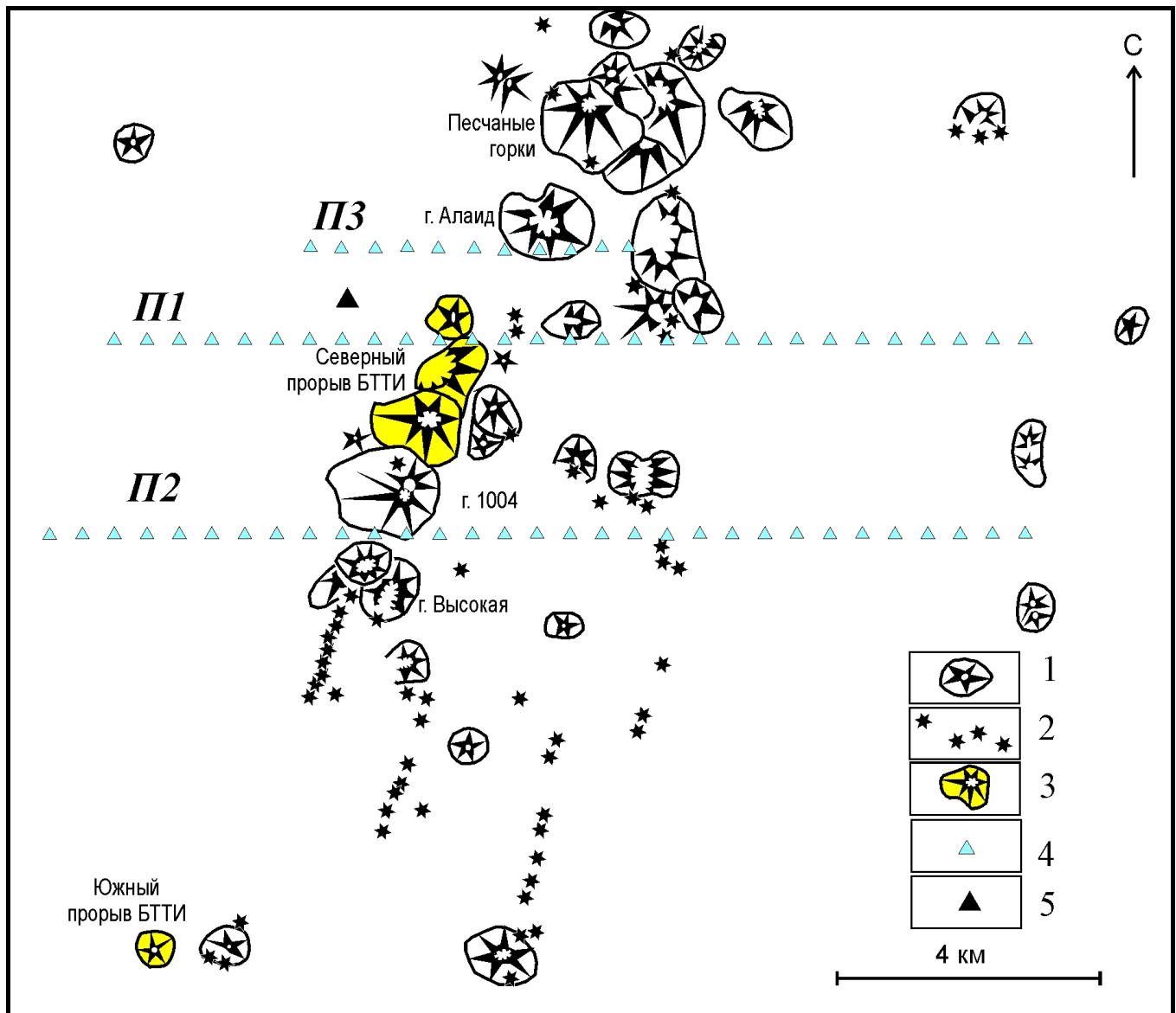


Рис. 1. Профили микросейсмической съёмки на схеме вулканических образований Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов (схема составлена Г. Б. Флеровым, приводится по рис. V.2 из монографии [1]): 1 — шлаковые конусы; 2 — эруптивные центры и бочки крупных шлаковых конусов, показанные вне масштаба; 3 — Новые Толбачинские вулканы — шлаковые конусы Северного и Южного прорывов БТТИ; 4 — голоценовые конусы прорыва гор 1004 и Пра-Высокой; 5 — точки профилей микросейсмической съёмки (П-1, П-2 и П-3); 6 — опорная сейсмическая станция.

тывали, что в обоих случаях профили прошли через зоны реально существовавших извержений, в ходе которых имел место подъём глубинного вещества к поверхности. Поэтому мы считаем возможным при интерпретации результатов наших построений употреблять термины «магматический очаг», «магмовод», «питающий канал извержения», не исключая из внимания и возможные обширные зоны трещиноватости, сопутствующие внедрению и образованию магматических тел.

На разрезах (рис. 2) выделяются относительно низкоскоростные аномалии, которые могут быть магмоводами или объемами среды, содержащими некоторое количество магмы. Сопоставление П-1

и П-2 показывает, что разрезы аналогичны, на них выделяются очень похожие структуры, которые ниже будут описаны подробнее.

Подробнее разберем разрез П-1, пересекающий СП БТТИ (рис. 2а). Он рассматривается нами как базовый, что обусловлено уже имеющейся изученностью строения СП и выделенными в ходе этих исследований аномалиями, которые могут рассматриваться как магматические очаги или зоны питания извержения [1, 4]. Первые результаты исследований по этому профилю представлены нами в работе [10].

В первую очередь обратим внимание на низкоскоростные объекты $I_{СП}$, $II_{СП}$, $III_{СП}$. Им соответствуют неоднородности под новообразованными конусами

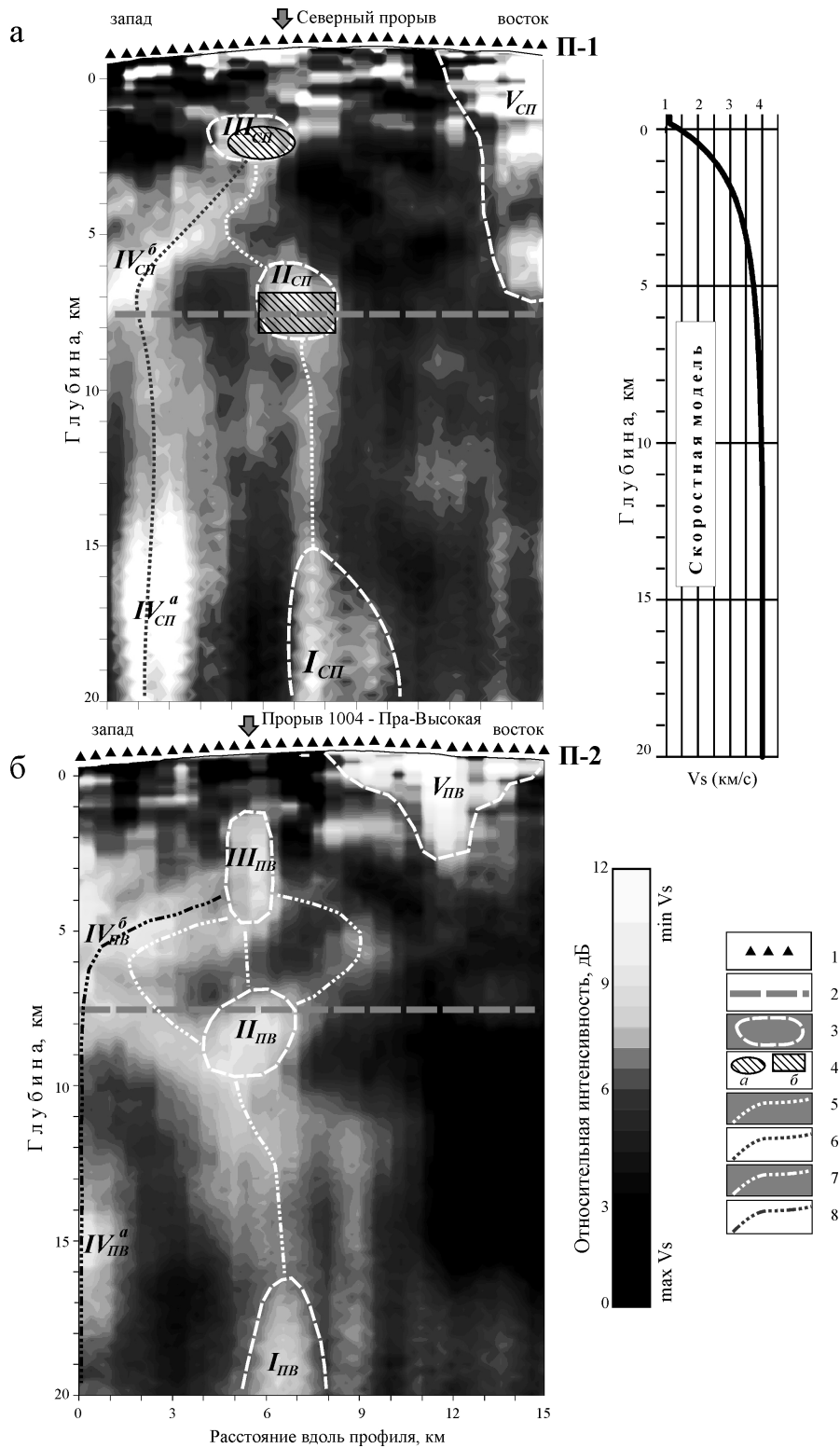


Рис. 2. Вертикальные разрезы вдоль микросейсмических профилей П-1 (а) и П-2 (б) (с элементами интерпретации). $I_{СП}$ – $VI_{СП}$, $I_{ПВ}$ – $VI_{ПВ}$ – низкоскоростные неоднородности, выделенные методом микросейсмического зондирования (описание приведено в тексте). 1 – реперы микросейсмической съёмки; 2 – граница кристаллического фундамента под Толбачинским Долом; 3 – границы выделенных низкоскоростных областей; 4 – аномалии, выявленные под СП БТТИ на глубине 2–3 км (а) и на границе кристаллического фундамента, на глубине 7–8 км (б), по [Большое..., 1984], проинтерпретированные как возможные магматические очаги; 5, 6 – возможные пути поступления магмы в очаг $III_{СП}$ под СП БТТИ (центральный и западный магмоводы); 7, 8 – возможные пути поступления магмы в очаг $III_{ПВ}$ под ПВ (центральный и западный магмоводы).

СП БТТИ, описанные в [1, 4] и других приведённых ниже работах:

$I_{СП}$ соответствует аномалии в диапазоне глубин 15–20 км (нижняя часть роя землетрясений, предвращавших начало извержения СП БТТИ; проводящая зона по данным МТЗ; центр деформаций по геодезическим данным; верхняя часть области генерации магмы по [9]);

$II_{СП}$ соответствует аномалии на границе кристаллического фундамента, на глубине 7–8 км (неоднородность по данным КМПВ под СП);

$III_{СП}$ соответствует аномалии на глубине 2–3 км (неоднородность по комплексу геофизических данных: КМПВ, МТЗ и электромагнитного индукционного зондирования; оптимальная глубина формирования магматического очага по [8]).

На рис. 2а на полученный нами разрез наложены контуры неоднородностей (малоглубинных магматических очагов), выделенных на глубинах 2–3 км и 7–8 км по геофизическим данным и представленных в работах [1] и др. Продемонстрировано, что наши результаты (низкоскоростные неоднородности), полученные независимым методом, соответствуют представлениям о расположении магматических очагов под СП по данным выполненных ранее комплексных исследований БТТИ.

В центральной части разреза $\Pi-1$ под СП выделяется субвертикальная низкоскоростная аномалия (область, вмещающая подводный канал извержения), соединяющая области $I_{СП}$, $II_{СП}$, $III_{СП}$ между собой. Канал имеет дифференцированный характер (неоднородный, с расширениями) и может рассматриваться как центральный (относительно СП) магмовод. Участок канала, соединяющий магматические камеры $II_{СП}$ и $III_{СП}$, не вертикален.

Представляет отдельный интерес низкоскоростная структура в западной части разреза, связывающая аномальные зоны $IV_{СП}^a$ и $IV_{СП}^b$ между собой и с приповерхностной аномалией (магматической камерой) $III_{СП}$. Нельзя исключить, что это — самостоятельный (западный) магмовод.

Таким образом, на разрезе $\Pi-1$ выделены две пространственно независимые относительно низкоскоростные зоны, которые могли являться проводниками магмы в верхнюю часть земной коры — центральный и западный магмоводы (рис. 2а).

На рис. 2а видно, что в верхней части разреза $\Pi-1$ и западный, и центральный магмоводы сообщаются с приповерхностным магматическим очагом $III_{СП}$. Это позволяет предположить, что магма различного состава могла поступать в приповерхностный очаг $III_{СП}$ из разных глубинных источников по двум пространственно обособленным и несвязанным каналам.

Непосредственно под СП наблюдается приповерхностная низкоскоростная аномалия, пространственно связанная с областью лавового поля, образовавшегося в 1975 г., которое лежит западнее цепоч-

ки новообразованных конусов на линии прохождения $\Pi-1$.

Перейдем к рассмотрению разреза $\Pi-2$, пересекающего более древний прорыв ПВ (рис. 2б). Он аналогичен разрезу $\Pi-1$. Низкоскоростные неоднородности, выделяемые в центральной части разреза $\Pi-2$, коррелируют с основными выделенными нами и описанными выше элементами глубинной структуры СП БТТИ под профилем $\Pi-1$: $I_{ПВ}$ соответствует аномалии $I_{СП}$, $II_{ПВ}$ — промежуточному очагу ПСП на границе кристаллического фундамента, $III_{ПВ}$ — приповерхностному очагу $III_{СП}$. По аналогии с разрезом $\Pi-1$, группа аномальных объектов $I_{ПВ}$, $II_{ПВ}$, $III_{ПВ}$ может рассматриваться как система разноглубинных магматических очагов, связанная центральным (относительно ПВ) магмоводом. Западный магмовод представлен аномалиями $IV_{ПВ}^a$ и $IV_{ПВ}^b$ в левой части рис. 3б и частично выходит за пределы профиля $\Pi-2$. Выявленные на разрезе $\Pi-2$ глубинные структуры могут быть связаны как с образованием около 2 тыс. л. н. гор 1004 и Пра-Высокой, так и с последним извержением горы Высокой около 1 тыс. л. н.

На обоих разрезах пути продвижения магмы к поверхности в кристаллическом фундаменте (на глубинах больше 7–8 км) имеют субвертикальный характер, а в вулканогенно-осадочной оболочке форма магмоводов меняется: мы видим наклонные и силлоподобные структуры без ярко выраженных вертикальных каналов.

Обратим внимание ещё на одну скоростную аномалию, которая проявляется на разрезах $\Pi-1$ и $\Pi-2$ в восточной части Толбачинского Дола. Она представлена зонами $V_{СП}$ и $V_{ПВ}$ на глубинах выше кристаллического фундамента. Мы связываем её с областью современных сейсмических проявлений и выделенной в ходе БТТИ Толудской эпицентральной зоной (ТЭЗ), которая детально проанализирована в [1, 6, 7].

Проявления геодинамической активности ТЭЗ с прекращением БТТИ не закончились. По данным геодезических работ эта область в течение по крайней мере 7 лет после извержения продолжала испытывать поднятие [11]. В настоящее время она остаётся наиболее сейсмоактивной частью южного сектора Ключевской группы вулканов. Очевидно, что микросейсмические профили достигли лишь края ТЭЗ. По нашим данным она имеет пониженные прочностные свойства, а полученные ранее результаты демонстрируют её связь с перемещением магмы в питающей системе вулканов и изменением напряженно-деформированного состояния среды, что сопровождается сейсмической активностью низкого энергетического уровня. Эта область требует дополнительного комплексного исследования.

Предварительные результаты по $\Pi-3$ (пока только по центральной части этого профиля, проходящего через конус Алаид) представлены на рис. 3. Оконтурированы три выявленные низкоскоростные аномалии $I_{ПА}$, $II_{ПА}$, $III_{ПА}$. Показаны соединяющие их

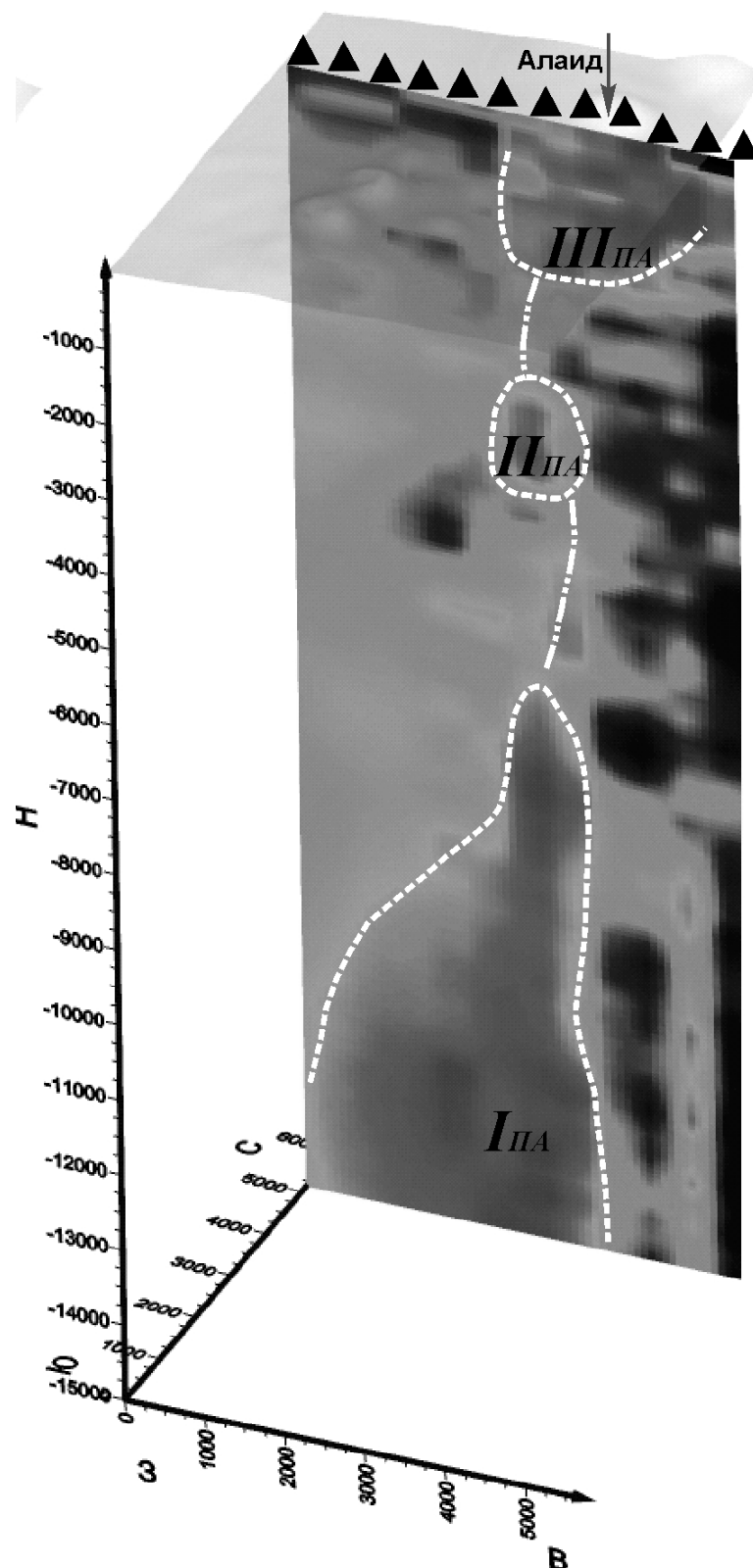


Рис. 3. Рис. 3. Вертикальный разрез вдоль центральной части микросейсмического профиля П-3. $I_{ПА}$, $II_{ПА}$, $III_{ПА}$ — низкоскоростные неоднородности, выделенные методом микросейсмического зондирования в окрестностях конуса Алаид.

низкоскоростные каналы. В западной части разреза возможно выявление низкоскоростной структуры, сходной с $IV_{ПВА}$, $IV_{ПВ}^b$ и $IV_{СП}^a$, $IV_{СП}^b$, но пока этот объект выходит за границу полученного изображения. В целом разрез похож на результаты работ на П-1 и П-2, но глубина аномалий несколько меньше. Интерпретация этого разреза соответствует приведённому выше обсуждению аномалий на П-1 и П-2. Работа над построением разреза П-3 продолжается по дополнительным данным.

Рассмотренные выше прорывы являются разнесенными во времени эпизодами, но пространственно близкими (соседними) событиями эруптивной активности Толбачинского Дола, сходными по характеру извержений и составу пород [2]. Поэтому продемонстрированная схожесть их глубинного строения (до глубины 20 км) представляется неслучайной. Мы предполагаем, что на примере трёх разновозрастных прорывов обнаружена закономерность в конфигурации питающих систем извержений Толбачинской региональной зоны ареального вулканизма (в её средней части).

– питающие каналы извержений имеют сложную конфигурацию, они близки к вертикальным формам в кристаллическом фундаменте и становятся наклонными на менее глубоких горизонтах; их особенностью является дифференцированный характер – чередование участков канала и ограниченных низкоскоростных областей, которые могли сформироваться в местах скопления или повышенного содержания магмы и могут интерпретироваться как магматические очаги;

– на глубинах 15–20 км располагается верхняя часть зоны магматического питания вышележащих вулканических прорывов. Она может быть единой для всей цепочки конусов осевой части Толбачинского Дола, такое предположение сформулировано в работе [9];

– промежуточный магматический очаг формируется близ границы кристаллического фундамента в диапазоне глубин 6–9 км;

– верхний малоглубинный очаг располагается непосредственно под зоной прорыва в диапазоне глубин 1,5–4 км от поверхности, что по [8] соответствует оптимальной глубине формирования периферического очага;

– под западной частью Толбачинского Дола, в 4–6 км от основного канала извержения, проходит низкоскоростная структура, в верхней своей части соединяющаяся с верхними приповерхностными очагами прорывов; мы предлагаем рассматривать её как возможный дополнительный или альтернативный путь поступления магмы в приповерхностный очаг.

Отметим, что пространственная периодичность эксплозивных центров в районе СП БТТИ исследовалась в работе [3], где было высказано предположение, что «внедрение магмы перед образованием каждого конуса в районе Северного прорыва происходит

одинаковым образом» и это свойство является долговременным для всего рассматриваемого района. У нас пока нет уверенности, что под СП и прилегающей к нему эруптивной зоной мы наблюдаем периодическую глубинную структуру. Но очевидно, что схожесть образовавшихся вулканических построек и периодичность их расположения вдоль глубинного разлома, общность свойств конусов по характеру эруптивной деятельности, обнаруженное нами подбодие глубинных скоростных разрезов вдоль профилей, проходящих через разновозрастные трещинные прорывы, не случайны. Возможно, прояснить эти проблемы удастся при разработке 3-D модели центральной части Толбачинского Дола, создаваемой нами на основе проведённых площадных наблюдений по аналогичной методике.

Исследования поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (грант 13–05–00 117).

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение 1975–1976 гг. / Отв. ред. Федотов С. А. М.: Наука, 1984. 683 с.
2. Брайцева О. А., Мелекесцев И. В., Флёров Г. Б. и др. Голоценовый вулканизм Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов // Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. Гл. V. С. 177–222.
3. Викулин А. В. О длине приповерхностной трещины, через которую осуществляется питание конусов Северного прорыва Толбачинского извержения 1975 г. // Вулканология и сейсмология. 1984. №3. С. 82–87.
4. Геологические и геофизические данные о Большом Толбачинском извержении 1975–76 гг. М.: Наука, 1978. 256 с.
5. Горбатиков А. В., Степанова М. Ю., Кораблев Г. Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. №7. С. 66–84.
6. Горельчик В. И., Зобин В. М., Чубарова О. С. Сейсмичность и динамические характеристики очагов землетрясений в районе Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975–1978 гг. // Вулканология и сейсмология. 1981. №3. С. 73–98.
7. Горельчик В. И., Чубарова О. С., Гарбузова В. Т. Сейсмичность района Северной группы вулканов Камчатки, 1971–1983 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. №1. С. 90–100.
8. Ермаков В. А., Геншафт Ю. С. Механизм извержения Северного прорыва Толбачинского дола в 1975 г. // ДАН СССР. 1980. Том. 255. №5. С. 1076–1080.
9. Ермаков В. А., Ермаков А. В. Геолого-петрологические модели извержения 1975–76 гг. на Толбачинском долу (Ключевская группа вулканов) // Геофизические исследования. М.: ИФЗ РАН, 2006. Вып. 5. С. 53–115.
10. Кугаенко Ю. А., Салтыков В. А., Горбатиков А. В. и др. Новые данные о глубинном строении Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения // ДАН. 2011. Том. 441. №4. С. 539–543.

11. *Магуськин М. А., Левин В. Е., Бахтияров В. Ф.* Деформации земной поверхности в районе Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. в период 1978–2000 гг. и их возможные причины // *Вулканология и сейсмология*. 2003. № 6. С. 55–61.
12. *Федотов С. А., Балеста С. Т., Двигало В. Н. и др.* Новые Толбачинские вулканы // *Действующие вулканы Камчатки*. В 2-х т. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 214–274.
13. *Федотов С. А., Жаринов Н. А., Гонтовая Л. И.* Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об её извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // *Вулканология и сейсмология*. 2010. № 1. С. 3–35.
14. *Федотов С. А., Уткин И. С., Уткина Л. И.* Периферический магматический очаг базальтового вулкана Плоский Толбачик, Камчатка: деятельность, положение и глубина, размеры и их изменение по данным о расходе магм // *Вулканология и сейсмология*. 2011. № 6. С. 3–20.