



## ИЗУЧЕНИЕ ЗОНЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНИЗМА НА КЕРЧЕНСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ ИНЖЕНЕРНО-СЕЙСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Б. А. Канарейкин<sup>1</sup>, А. И. Мальцев<sup>2</sup>, А. С. Харламов<sup>2</sup><sup>1</sup>Сибирский НИИ геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск, Россия; <sup>2</sup>ООО «Сибирская геофизическая служба», Новосибирск, Россия

По сейсмическим данным ОГТ, полученным в пределах Зсыпной антиклинали на участке проектного железнодорожного тоннеля (подъездные пути к Керченскому мосту), установлено геологическое строение верхней части разреза до глубин 150–200 м, определяемое тектоникой древнего (потухшего?) грязевого вулкана. Получена его структурная модель. В отложениях, подстилающих наземную грязевулканическую постройку (грифон), выделена «вдавленная» синклиналь – один из главных признаков грязевого вулканизма. Сейсмотомографические построения по параметрам скорости продольных и поперечных волн и по параметрам их отношений показывают значительную неоднородность верхней части разреза, связанную с особенностями строения грязевого вулкана. На флангах грязевулканических отложений (сопочные брекчии) выделена плотная сеть разрывных нарушений, представляющих опасность возможного прорыва метана при проходческих работах.

**Ключевые слова:** инженерная сейсморазведка, Керченский полуостров, грязевые вулканы, продольные отраженные волны, сейсмотомография, майкопские глины, вдавленная синклиналь.

## STUDYING THE ZONE OF MUD VOLCANISM MANIFESTATION ON THE KERCH PENINSULA BY ENGINEERING-SEISMIC METHODS

B. A. Kanareikin<sup>1</sup>, A. I. Maltsev<sup>2</sup>, A. S. Kharlamov<sup>2</sup><sup>1</sup> Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia; <sup>2</sup>Sibirskaya geofizicheskaya sluzhba, Novosibirsk, Russia

According to CDP seismic data obtained within the Zsyynoy anticline, the geological structure of the shallow subsurface has been established down to depths of 150–200 m at the site of the designed railway tunnel (approach lines towards the Kerch Bridge). This structure is determined by tectonics of an ancient (extinct?) mud volcano. Its structural model is developed. In the sediments underlying the ground mud volcanic construction (gryphon), a “depressed” syncline – one of the main signs of mud volcanism – is identified. The seismic tomography constructions with respect to the velocity parameters of longitudinal and transverse waves and their relationships show a significant heterogeneity of the shallow subsurface associated with the structural features of the mud volcano. On the flanks of mud volcanic deposits (mud volcanic breccias) a dense network of faults is identified that constitutes a danger of a possible methane breakthrough during drivage.

**Keywords:** engineering seismology, Kerch Peninsula, mud volcano, compressional-wave reflection, seismic tomography, Maikop clay, depressed syncline.

DOI 10.20403/2078-0575-2019-1-35-46

В настоящее время все строительные или проходческие работы на начальном этапе обязательно включают инженерно-геофизические изыскания. По заказу ГУП РК «Крымская железная дорога» в 2015 г. ООО «Сибирская геофизическая служба» и АО «СНИИГГиМС» совместно выполнили сейсмические исследования ОГТ в северо-восточной части Керченского полуострова на участке объездной железной дороги, предназначенной для обслуживания Керченского моста (рис. 1).

Для геологического строения этой части полуострова характерно широкое распространение современного грязевого вулканизма, обусловленного газопродуцирующими толщами майкопских глин [20, 21]. Грязевой вулканизм представляет определенную опасность при проходческих работах в связи с вероятными излияниями на дневную поверхность значительных масс грязебрекчии. Не меньшая опасность может возникнуть и в том случае, когда выработки будут вскрывать трещи-

ны, заполненные метаном. Участок работ расположен в западной окрестности Керчи в 1,5 км от действующего Восходовского (Джарджавского) грязевого вулкана, значимые извержения которого были 8 ноября 1938 г. и 16–17 марта 1982 г. К юго-западу от района работ на расстоянии 45 км 3 декабря 2017 г. произошло извержение грязевого вулкана на Новошепетовской сопке в окрестности с. Новоселовка. Грязевыми массами была затоплена площадь 5 га; возникли крупные протяженные трещины и провалы. С учетом этих событий можно было предположить, что участок работ находится в активном грязевулканическом районе. В предлагаемой статье представлены результаты инженерно-сейсмических исследований на участке проектного тоннельного перехода под магистральной автодорогой «Таврида». При интерпретации сейсмических материалов особое внимание уделялось выявлению возможных признаков грязевого вулканизма.



**Рис. 1.** Космоснимок восточной части Керченского полуострова и Керченского пролива. Район сейсмических работ (красный кружок)

### Геологическое строение района работ

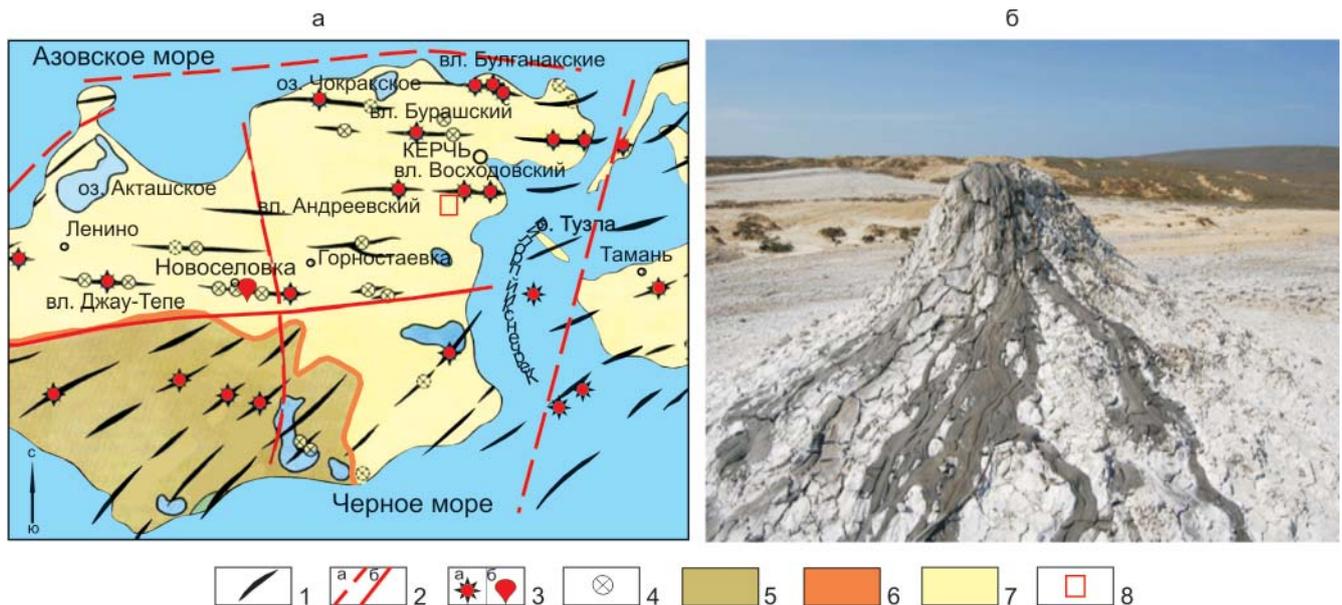
Самыми древними породами Керченского полуострова, выходящими на дневную поверхность, являются образования олигоцена ( $P_3$ , майкопская серия), представленные слоистыми известковистыми и алевролитовыми глинами и залегающие на размытой поверхности мела и юры (рис. 2, а). В их нижней части находится майкопская толща мощностью до 3000 м, характеризующаяся хорошими нефтегазоматеринскими свойствами [21]. Породы олигоцена перекрываются карбонатно-глинистой толщей среднего – верхнего миоцена ( $N_1^{2-3}$ ) мощностью в синклиналих 500–1000 м и до 20–100 м в антиклиналях. Нижняя их часть представлена чокракским горизонтом, верхняя входит в состав караганского и конкского горизонтов. Выше залегают плиоцен-четвертичные отложения ( $N_2-Q$ ), представленные глинисто-карбонатной толщей мощностью 20–80 м.

Наиболее крупным структурным элементом Керченского полуострова является Керченско-Салымская синклиналь широтного простирания. К югу от нее на дневную поверхность выходят отложения олигоцена ( $P_3$ , майкопская серия), отделенные от более молодых пород Парпачским гребнем, который сложен образованиями среднего миоцена ( $N_1^2$ ).

В строении верхней части разреза выделяют два структурных этажа. Нижний представлен отложениями олигоцена, собранными в напряженные складки с углами наклона крыльев до 30–45° и более; породы верхнего с угловым несогласием залегают на размытой поверхности майкопских глин. Неоген-четвертичные породы также представлены складчатыми образованиями, но их амплитуды на порядок меньше, чем у майкопских глин. Генетически складки в майкопских глинах относятся к диапировым [9, 21]. В ядрах многих складок на поверхность выходят сильно перемятые майкопские глины. В малоразвитых складках отложения олигоцена не обнажаются. Такие складки относятся к криптодиапировым. Участок сейсмических работ расположен в пределах сводовой части Зсыпной антиклинальной (криптодиапировой) структуры.

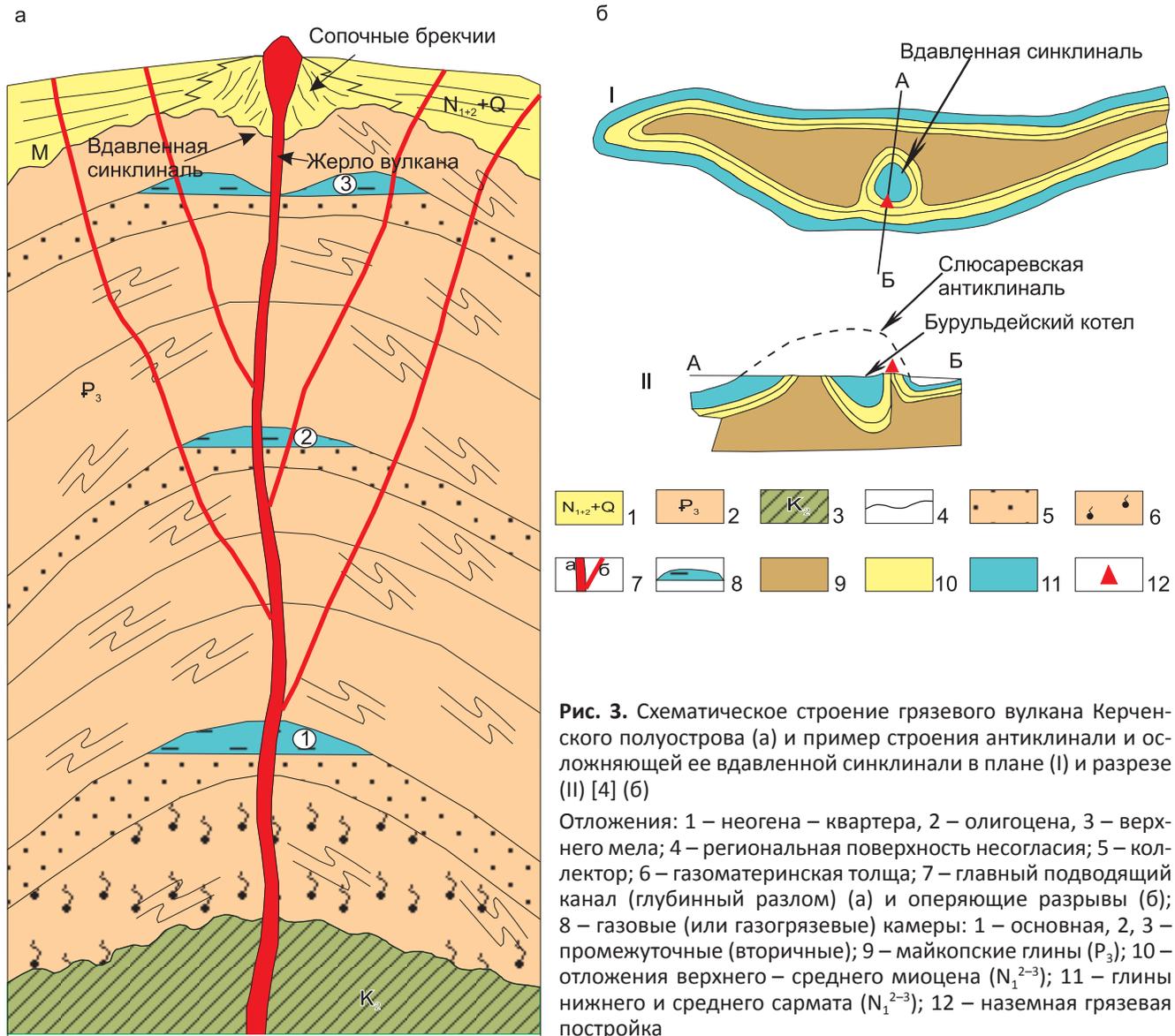
### Грязевой вулканизм

На большинстве складок Керченского полуострова и прилегающих акваторий Азовского и Черного морей отмечаются признаки грязевого вулканизма (см. рис. 2, а). На дневной поверхности грязевой вулканизм выражен в виде невысоких вулканических конусов, сложенных продуктами излияния грязевых вулканов (см. рис. 2, б) [21]. В подстилающих вулканическую постройку образованиях, как правило, формируются «вдавленные» синкли-



**Рис. 2.** Геологическая карта Керченского полуострова (а) и пример наземной постройки при грязевом вулканизме (б) [4]

1 – антиклинальные складки; 2 – разрывные нарушения (а – достоверные, б – предполагаемые); 3 – грязевые вулканы: а – действующие, б – Новошепетовский, извержение 03.12.2017; 4 – вдавленные синклинали; 5 – майкопские отложения ( $P_3$ ); 6 – Парпачский гребень ( $N_1^{2-3}$ ); 7 – неоген-четвертичные отложения ( $N_1^3-Q$ ); 8 – район работ



**Рис. 3.** Схематическое строение грязевого вулкана Керченского полуострова (а) и пример строения антиклинали и осложняющей ее вдавленной синклинали в плане (I) и разрезе (II) [4] (б)

Отложения: 1 – неогена – квартера, 2 – олигоцена, 3 – верхнего мела; 4 – региональная поверхность несогласия; 5 – коллектор; 6 – газоматеринская толща; 7 – главный подводящий канал (глубинный разлом) (а) и оперяющие разрывы (б); 8 – газовые (или газогрязевые) камеры: 1 – основная, 2, 3 – промежуточные (вторичные); 9 – майкопские глины (P<sub>3</sub>); 10 – отложения верхнего – среднего миоцена (N<sub>1<sup>2-3</sup></sub>); 11 – глины нижнего и среднего сармата (N<sub>1<sup>2-3</sup></sub>); 12 – наземная грязевая постройка

нали (рис. 3, б) [21]. В пределах участка работ находится конусовидная постройка грязевого вулкана (грифона) высотой 3,5 м и площадью основания около 1600 м<sup>2</sup>.

Большинство исследователей полагают, что природа грязевого вулканизма на Керченском полуострове обусловлена присутствием в разрезе мощной толщи майкопских глин, продуцирующих газ (преимущественно метан и двуокись углерода) [2, 4, 6, 21]. Начало проявления грязевого вулканизма относится к караганскому времени. После затухания деятельности вулканов к концу миоцена в четвертичное время отмечается повторное оживление грязевулканической деятельности [9]. В ряде работ предполагается более глубокое залегание источников газа в пределах Керченского и Таманского районов. В сопочных брекчиях некоторых скважин обнаружены породы мелового возраста [21]. По данным микросейсмозондирования корневые структуры грязевых вулканов Шуго и гора Карабетова (Таманский полуостров) обнаружены на глубинах от 15 до 25 км [14, 17, 18].

Как известно, горные сооружения Крыма являются фронтальной частью Скифской плиты, граничащей с Черноморской плитой [3]. Одним из возможных объяснений формирования газовых камер на таких глубинах может быть гипотеза о поддвижении тяжелой (преимущественно базальтового состава) Черноморской плиты под горные сооружения Крыма. За последние 10 млн лет Черноморская плита смещалась к северо-востоку со скоростью 0,1 см в год [19]. По другим предположениям, здесь имеет место модель не субдукции, а псевдосубдукции, т. е. надвигание горного Крыма (Скифской плиты) на Черноморскую плиту [20]. По обеим гипотезам, богатые органикой осадочные отложения Черноморской впадины могли быть затянuty под основание горных сооружений Крыма. Они могли служить альтернативными или дополнительными источниками газовой компоненты грязевых вулканов наряду с источниками в майкопской толще. Отметим, что подобного рода геодинамическая ситуация, установленная по данным локальной сейсмической томографии от землетрясений, была использована

для объяснения природы Лесновского и Южно-Сахалинского грязевых вулканов в южной части о. Сахалин [22].

Принципиальная схема строения грязевых вулканов Керченского полуострова, опирающаяся на предположение о связи грязевого вулканизма с майкопскими глинами, приведена на рис. 3, а. В их строении различают несколько главных элементов: газоматеринскую толщу, главный подводный канал (разрывное нарушение), главную и промежуточные газовые (или газогрязевые) камеры, наземную грязевую постройку, сложенную сопочными брекчиями (материалы выноса при извержении грязевого вулкана) [2, 5, 10, 16, 21]. При определенных РТ условиях материнская толща продуцирует газ, который накапливается в основной камере, а затем и в промежуточных. Постепенно в камерах формируется аномально высокое пластовое давление (АВПД). При достижении в любой из камер давления, превышающего прочность пород приповерхностной экранирующей толщи, газогрязевые массы прорываются на дневную поверхность, т. е. происходит извержение грязевого вулкана. После этого довольно часто обрушиваются наземные постройки, как результат опустошения промежуточной газогрязевой камеры и гравитационного проседания вышележащих сопочных брекчий. При этом по поверхности майкопских отложений формируется чашеобразная («вдавленная») синклиналь (см. рис. 3, б). Их образование по этой неглубоко залегающей поверхности позволяет предположить и неглубокое (50–100 м) залегание верхней газогрязевой камеры. В пользу такого предположения свидетельствуют и часто наблюдаемые невысокие температуры изливающихся грязевых масс (20–40 °С), хотя в отдельных случаях зафиксированы температуры до 80–90 °С. В завершающую стадию извержения по мере падения давления в основной и промежуточных камерах в жерле вулкана формируется глинистая пробка, запечатывающая подводный канал. По истечении некоторого времени давление в камерах снова возрастает, после чего извержение грязевого вулкана может повториться.

Грязевые (и магматические) вулканы следует рассматривать как некоторую метастабильную флюидодинамическую систему, которая долгое время может находиться в устойчивом равновесии. Выход системы из равновесия может инициироваться любым внешним воздействием антропогенного или естественного происхождения. Чаще всего прорыв метана и грязевых масс происходит в связи с землетрясениями, улучшающими проницаемость основного подводного канала и опережающих разрывов [1, 6, 11, 12, 14–16]. При этом по системе существующих и возникающих трещин, пересекающих промежуточные газовые камеры, возможна повышенная миграция газов и их выход на поверхность. Район Керченского полуострова находится в зоне повышенной сейсмической опасности (магнитуда земле-

трясений 6–7), и потому инициирование грязевулканической деятельности от землетрясений представляется вполне реальным событием. Улучшение проницаемости трещиноватых зон достигается даже при весьма малых (единицы Па) перепадах динамически напряжений, возникающих при прохождении сейсмических волн от землетрясений [8].

### Методика сейсмических работ

Сейсмические работы выполнены на шести профилях протяженностью от 300 до 700 м с использованием инженерной сейсмической станции (48 каналов) «SGD-SEL» (ООО НПК «СибГеофиз-Прибор», Новосибирск). Наблюдения осуществлялись на Z-компоненте с использованием геофонов GS-20DX. Возбуждение упругих колебаний производилось ударом кувалды по грунту с накоплением полезного сигнала от 6 до 12 воздействий. Работы выполнялись методом ОГТ с использованием симметричной системы наблюдений. Длина активной расстановки 235 м, расстояние между сейсмоприемниками 5 м, между пунктами возбуждения упругих колебаний 5 м. Полученный сейсмический материал (шаг дискретизации 1 мс, длительность записи 1 с) использовался для построения временных сейсмических разрезов ОГТ и сейсмотомографии по параметрам скорости продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн и их отношения ( $V_s/V_p$ ). Обработка сейсмических материалов ОГТ проводилась с использованием программного пакета ProMax, сейсмотомографические построения – программы Godograf.

### Волновая картина

На сейсмограммах четко прослеживаются додографы первых вступлений продольных волн, продольные отраженные волны и поперечные рефрагированные волны типа SV (рис. 4). Чтобы показать возможность прослеживания поперечных волн на Z-компоненте, было выполнено математическое моделирование волнового поля. В качестве модельных вертикальных графиков скорости продольных  $V_p(Z)$

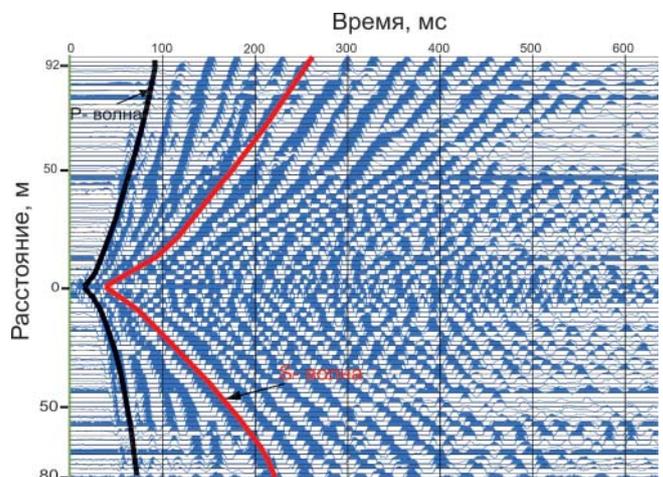
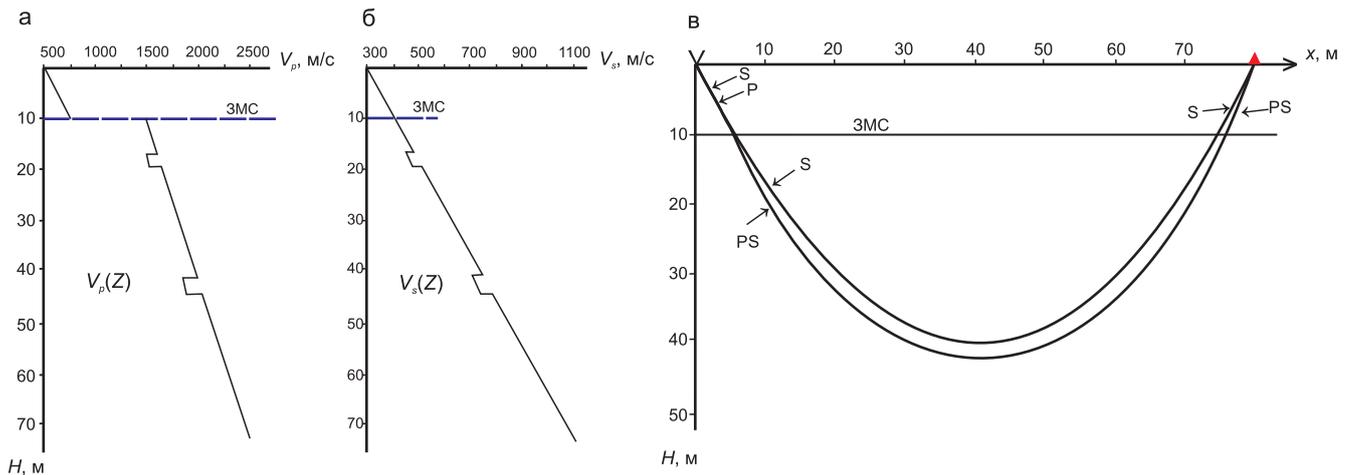
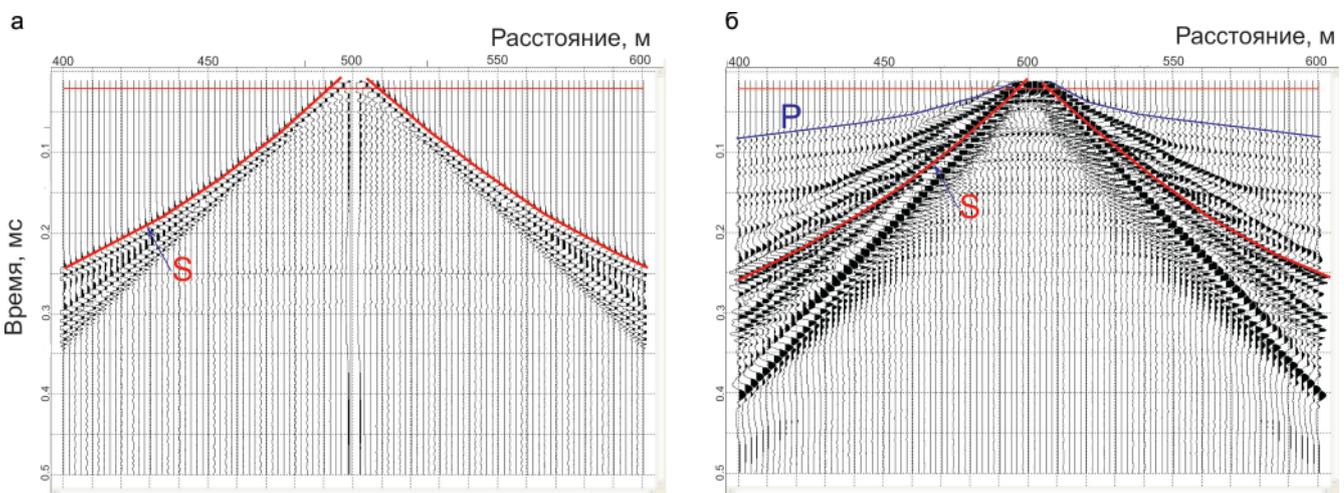


Рис. 4. Пример полевой сейсмограммы



**Рис. 5.** Модельные вертикальные графики скорости продольных (а) и поперечных (б) волн и лучевая схема распространения поперечной (S) и обменной (PS) волн (в)



**Рис. 6.** Расчетные волновые поля для вертикальных графиков скорости  $V_p(Z)$  и  $V_s(Z)$ , приведенных на рис. 5, а, б: а – для графика скорости  $V_s(Z)$ , б – для графиков скорости  $V_p(Z)$  и  $V_s(Z)$  (программа Tesseral-Pro)

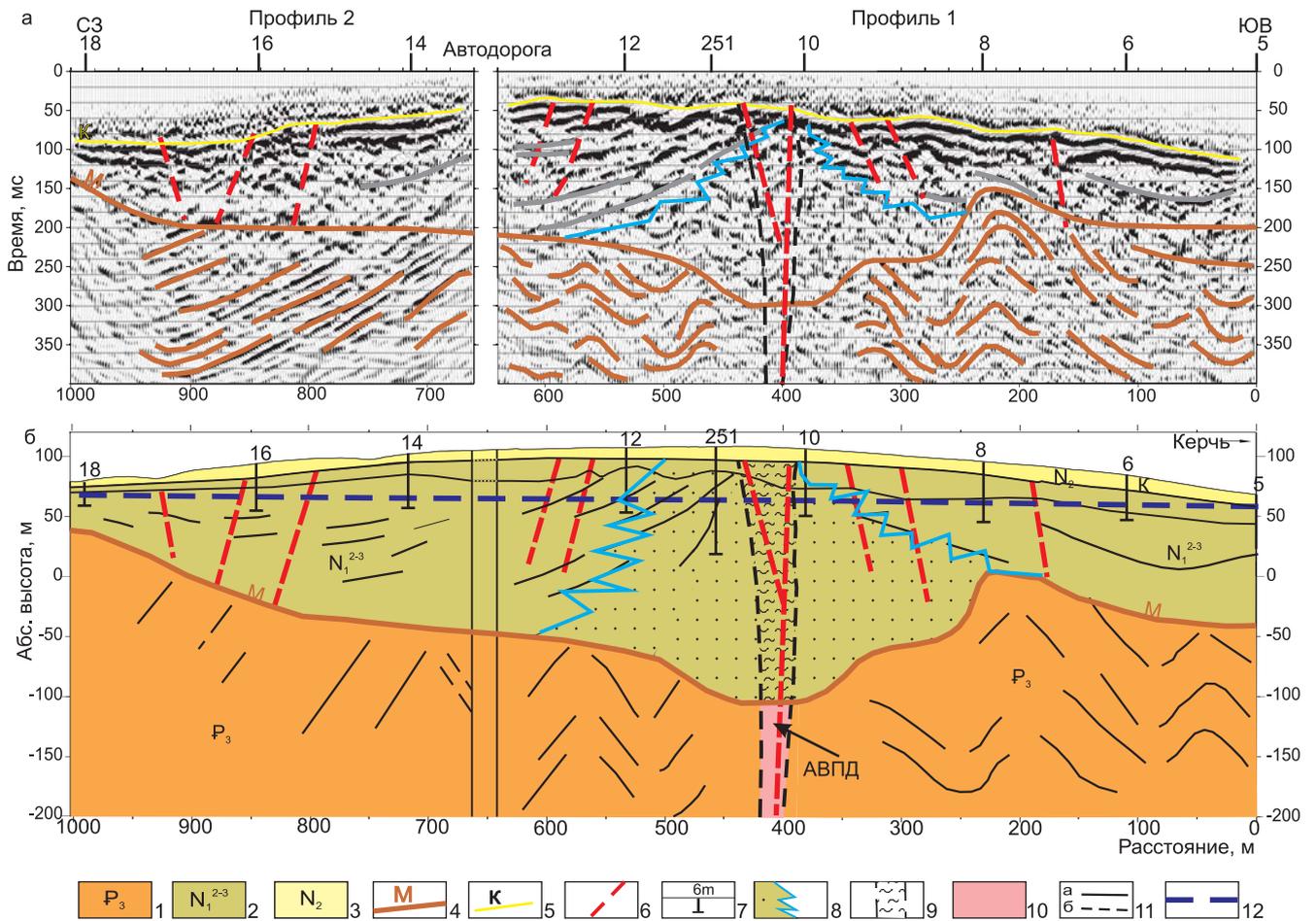
и поперечных  $V_s(Z)$  волн использовались материалы первых вступлений продольных волн и табличные скорости продольных и поперечных волн для глинисто-карбонатных пород [13] (рис. 5, а, б). Расчеты выполнены аспирантом СНИИГиМС Б. Н. Недомовым с использованием программы Tesseral-Pro. Волновое поле рассчитывалось от точечного излучателя продольных и поперечных волн с регистрацией Z-компоненты (рис. 6), синтетические сейсмограммы в данной программе строились конечно-разностным методом. На рис. 6, а приведено волновое поле с использованием только вертикального графика скорости  $V_s(Z)$ . На сейсмограмме в первых вступлениях прослеживается рефрагированная поперечная волна. На рис. 6, б показано полное волновое поле для среды, описываемой моделями скорости  $V_p(Z)$  и  $V_s(Z)$ . Из сравнения указанных рисунков видно, что в полном волновом поле четко выделяется рефрагированная поперечная волна. Уверенный характер прослеживания поперечной волны в данном случае может быть обусловлен ее интерференцией с обменной рефрагированной волной типа PS (обмен на подошве зоны малых скоро-

стей), разность времен прихода которых составляет несколько миллисекунд (см. рис. 5, в).

### Результаты сейсмических работ по материалам ОГТ

Глубина освещения геологической среды на временных сейсмических разрезах ОГТ достигает 300–500 м ( $t_0 = 350–400$  мс) (см. рис. 7, а, 8, а). На разрезах выделяются два сейсмокомплекса. Нижний ( $t_0 = 200–400$  мс) представлен наклонными и криволинейными отражателями, верхний ( $t_0 = 0–200$  мс) можно разделить по латерали на две зоны. Центральная зона, тяготеющая к антиклинальному поднятию, характеризуется хаотическими сейсмофациями. В ее крайних частях фиксируются в основном слабо наклонные и субгоризонтальные отражатели.

На рис. 7, б приведен глубинный геолого-геофизический разрез по сводному профилю 1–2, проходящему по оси проектного тоннеля. Нижняя часть разреза (нижний геологический комплекс) представлена толщей, собранной в мелкие складки, и может быть соотнесена с отложениями олигоцен-



**Рис. 7.** Временной сейсмический разрез ОГТ (а) и глубинный геолого-геофизический разрез (б) по сводному профилю 1–2

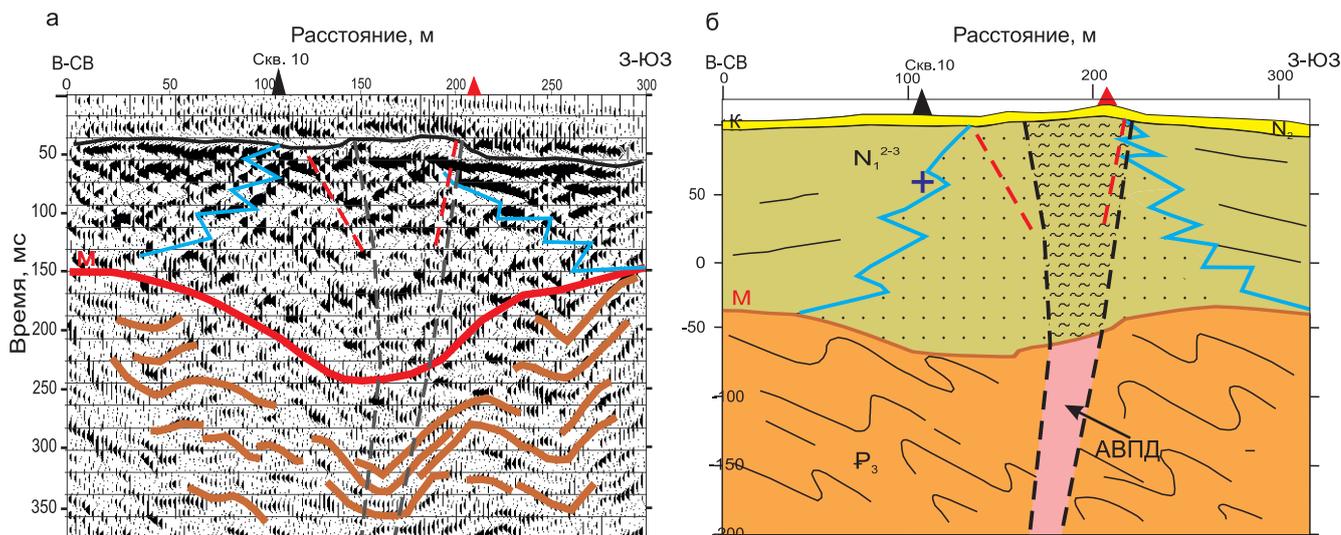
1 – олигоцен (майкопская свита); 2 – миоцен (чокракская свита); 3 – плиоцен (куяльницкая свита); 4 – кровля майкопской толщи; 5 – подошва куюльницких отложений; 6 – дизъюнктивные дислокации; 7 – буровые скважины; 8 – сопочные брекчии; 9 – проекция жерла грязевого вулкана; 10 – зона АВПД; 11 – отражающие границы; а – уверенные, б – неуверенные; 12 – ось проектного тоннеля

на ( $P_3$ ) (майкопскими глинами). Условная граница М, огибающая эту дислоцированную толщу, отождествляется с кровлей майкопских глин. На фоне антиклинального поднятия дневной поверхности по расположенному ниже горизонту М фиксируется синклиальный прогиб.

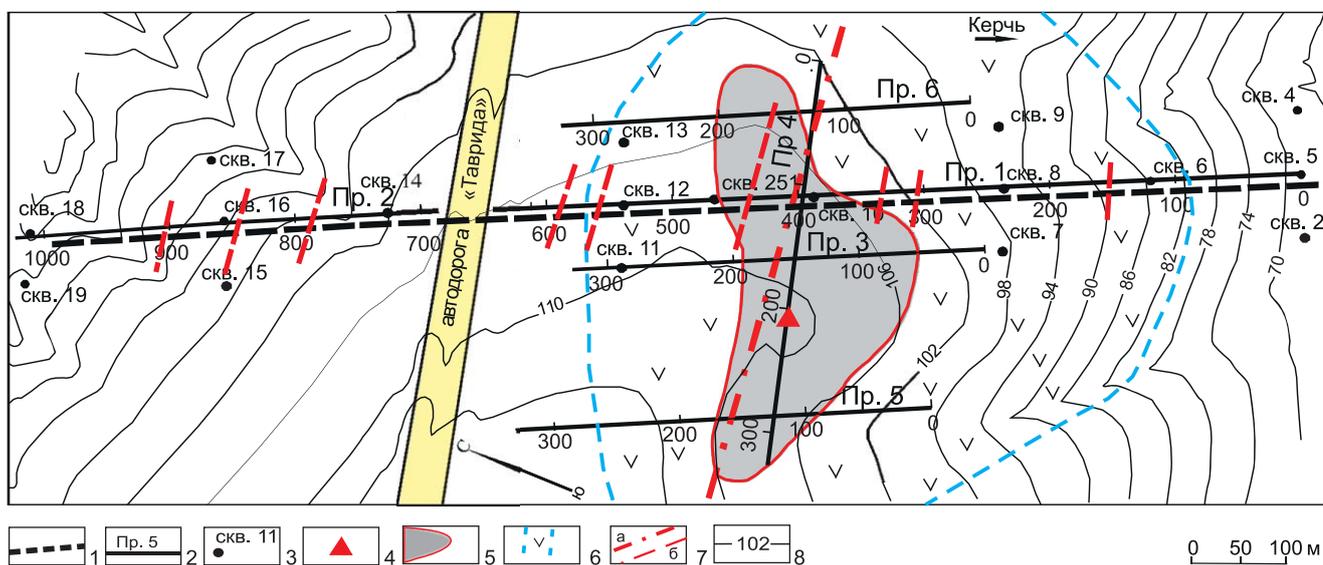
Верхний геологический комплекс, расположенный выше горизонта М, по привязке к скважинам соответствует отложениям миоцена ( $N_1^{2-3}$ ) – чокракский и караганско-конкский горизонты – и плейстоцена ( $N_2$ ). На большей части геолого-геофизического разреза, особенно на его флангах, в верхнем комплексе преобладают слабо наклонные отражатели, которые воссоздают образ антиклинального поднятия. Центральная часть верхнего комплекса представлена хаотичными отражателями и может быть соотнесена с продуктами грязевого вулканизма – сопочными брекчиями. Данные бурения согласуются с такой интерпретацией: в сводовой части антиклинали отмечаются повышенная неоднородность отложений миоцена – плиоцена, более частое чередование маломощных (0,3–0,8 м) прослоев гипса и мергеля. Важной особенностью строения верхне-

го этажа является присутствие достаточно плотной сети дизъюнктивных дислокаций. Часть разрывных нарушений, расположенных в своде антиклинали, проникает в отложения олигоцена и может соответствовать главному газогрязевому подводящему каналу.

Геолого-геофизический разрез по профилю 4, проходящий через наземную грязевулканическую постройку, характеризуется теми же особенностями, которые были отмечены на разрезе по профилю 1–2 (рис. 8). Выделяемый по горизонту М локальный прогиб может быть отождествлен с вдавленной синклиалью, а хаотическая зона верхнего комплекса – с сопочными брекчиями. В некоторой степени условно в сводовой части антиклинали показана проекция жерла грязевого вулкана. В нижней части жерлового канала предположительно находится зона АВПД, в настоящее время перекрытая глинистой пробкой затвердевших майкопских глин от предыдущего извержения и отложениями сопочных брекчий. Глубина залегания кровли АВПД (верхней газогрязевой камеры) оценена в 150–200 м. Отсутствие исторических сведений о деятельности гря-



**Рис. 8.** Временной сейсмический разрез ОГТ (а) и глубинный геолого-геофизический разрез (б) по профилю 4  
Усл. обозн. см. на рис. 7; + – пересечение профиля с осью проектного тоннеля



**Рис. 9.** Карта распространения грязевулканических фаций Зсыпного грязевого вулкана  
1 – ось проектного железнодорожного тоннеля; 2 – сейсмические профили и их номера; 3 – разведочные скважины;  
4 – конус грязевого вулкана на дневной поверхности; 5 – жерловые фации грязевого вулкана; 6 – сопочные брекчии;  
7 – разломы: а – глубинные, б – малоглубинные; 8 – изолинии рельефа, м

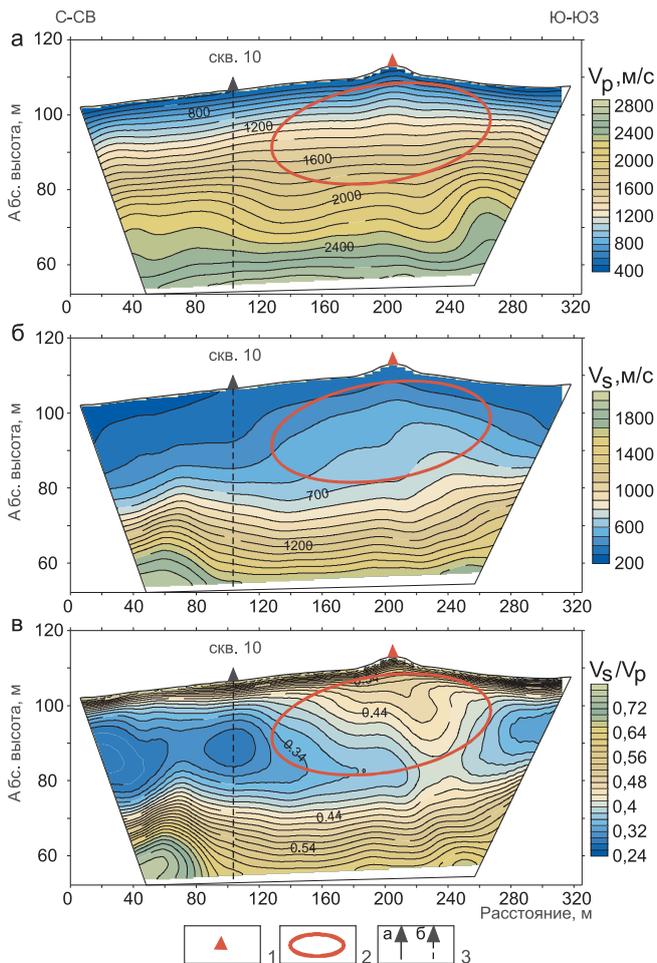
зегового вулкана может указывать, что в настоящее время он находится в относительно стабильном состоянии, а запечатывающие его жерло глинистые массы служат экраном, сдерживающим напор газа в зоне АВПД.

Аналогичные особенности строения геолого-геофизических разрезов получены по всем шести сейсмическим профилям. Площадные наблюдения позволили получить карту распространения грязевулканических фаций (рис. 9). Деструктивная сейсмическая зона, отвечающая жерловым фациям, и зона развития сопочных брекчии располагаются на периклинали антиклинальной складки и ориентированы по простиранию основного разрывного нарушения. Выделенные фациальные зоны сформировались на ранних стадиях активизации грязевого

вулкана. Область их распространения следует рассматривать как грязевулканический очаг [21].

### Результаты сейсмотомографии

Для более детальной оценки сейсмических свойств верхней части неоген-четвертичных отложений выполнены сейсмотомографические построения с использованием годографов продольных рефрагированных волн, регистрируемых в первых вступлениях, и поперечных рефрагированных волн, регистрируемых в последующих вступлениях. Стартовыми моделями для этих построений служили зависимости  $V_p(Z)$ ,  $V_s(Z)$  (см. рис. 4) без их изменения по латерали. Расчет проводился с использованием квадратных ячеек с длиной сторон 5 м и шагом по вертикали и горизонтали также 5 м. Как правило,



**Рис. 10.** Сейсмотомографические разрезы по параметрам  $V_p$  (а),  $V_s$  (б) и  $V_s/V_p$  (в). Профиль 4

1 – конус грязевого вулкана на дневной поверхности; 2 – аномальные зоны; 3 – скважины: а – пробуренные на профиле, б – снесенные

хорошая сходимость расчетов проявлялась уже при десятой итерации.

Сейсмотомографические разрезы для всех профилей были получены по параметрам скорости продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн и их отношению  $\gamma = V_s/V_p$  (рис. 10, 11). Скорость продольных волн на разрезах изменяется сверху вниз от 400 до 2200–2400 м/с на глубине 40 м, поперечных – от 300 до 1100–1300 м/с. По параметру  $\gamma$  на сейсмотомографическом разрезе выделяются три слоя: верхний (мощность 2–7 м,  $\gamma$  0,44–0,60), средний (инверсионный) (20–30 м,  $\gamma$  0,28–0,40) и нижний (15–20 м,  $\gamma$  0,44–0,60). Отметим, что глубина исследования на сейсмотомографических разрезах значительно меньше, чем по данным ОГТ, – около 40–45 м.

На сейсмотомографических разрезах по профилю 4 по всем скоростным параметрам выделяются локальные аномальные зоны, приуроченные к участку наземной грязевулканической постройки (см. рис. 10). Наиболее рельефно аномалии отображаются по параметрам  $V_s$  и  $\gamma$ . В окрестности вулканической постройки отмечается значительное

повышение скорости  $V_s$  в интервале глубин 0–30 м (см. рис. 10, б). Особенно контрастно отображается аномалия по параметру  $\gamma$ , указывающая на резкую неоднородность среднего слоя по латерали (см. рис. 10, в). Конусообразная форма аномалии согласуется с ожидаемой конфигурацией верхней части питающего канала и может отвечать жерловым фациям. Под основанием наземной грязевулканической постройки грунты (фации сопочных брекчий) отмечаются повышенными значениями параметра  $\gamma$  0,4–0,7, что, видимо, обусловлено большой газонасыщенностью этой части разреза. Синклиальная форма изолиний параметра  $\gamma$  в нижнем слое имеет наложенный характер и, скорее всего, связана с эффектом проседания вулканической постройки. Отметим, что предложенное объяснение не является единственным. Скоростные параметры зависят от множества геологических и структурных факторов. В частности, установленная особенность поведения параметра  $\gamma$  в зоне развития эруптивных фаций может быть связана с увеличением содержания в этих образованиях карбонатного материала, выпадающего при декомпрессии в процессе подъема грязевых масс к поверхности [1]. По данным бурения отмечено незначительное увеличение количества прослоев мергелей в сводовой части антиклинали, что также могло повлиять на изменение сейсмических параметров по латерали.

Для фланговых участков средней части сейсмотомографического разреза свойственны пониженные значения  $\gamma = 0,30–0,38$ , что может указывать на снижение газонасыщенности грунтов и повышение их влажности.

На сейсмотомографических разрезах по сводному профилю 1–2 верхняя часть неогеновых отложений до глубин порядка 40 м также неоднородна (см. рис. 11). Наиболее контрастно эта неоднородность проявляется по параметру  $\gamma$  (см. рис. 11, в). Здесь, как и на профиле 4, в средней части разреза прослеживается аномальная зона повышенных значений данного параметра, приуроченная к сводовой части антиклинали. Центральная часть аномальной зоны по аналогии с профилем 4 может быть отождествлена с жерловыми фациями основного нарушения (главного подводящего канала). На погруженных участках разреза отмечается снижение значений параметра  $\gamma$ , которое, как и на профиле 4, следует связать с увеличением влажности глин неогена и плиоцена. Аномальные зоны, выделенные по данным сейсмотомографии, в целом согласуются с сейсмофациальными зонами по данным ОГТ (см. рис. 9).

Полученные сейсмотомографические разрезы освещают строение верхней части вулканического аппарата до глубин 40–45 км, но не достигают глубины залегания верхней газогрязевой камеры. Повышенные значения параметра  $\gamma$  в окрестности вулканического очага могут указывать на консолидацию пород, снижение их пористости и повышен-

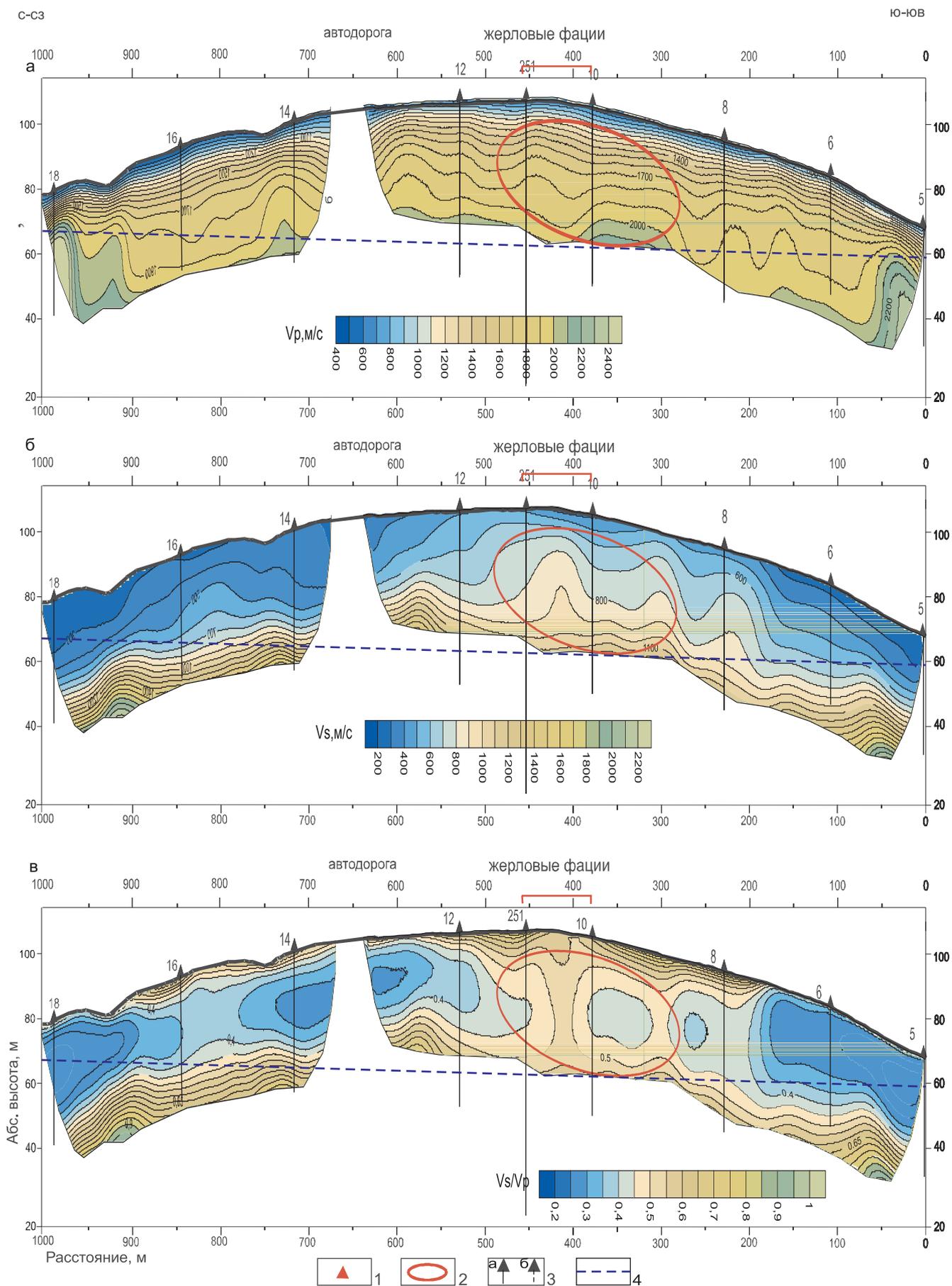


Рис. 11. Сейсмотомографические разрезы по параметрам  $V_p$  (а),  $V_s$  (б) и  $V_s/V_p$  (в). Профиль 1–2

1 – конус грязевого вулкана на дневной поверхности; 2 – аномальные зоны; 3 – скважины: а – пробуренные на профиле, б – снесенные; 4 – ось проектного тоннеля

ную газонасыщенность, сформировавшиеся в период вулканического затишья.

Главную опасность при проходке тоннеля в рассматриваемом случае могут представлять не эруптивные фации, а многочисленные разрывные нарушения, расположенные по их периферии и проникающие в газогрязевую камеру. Поэтому проходка тоннеля в окрестности Зсыпного вулкана в первую очередь сопряжена с опасностью прорыва метана по разрывам, опережающим главный подводный канал. Такое заключение авторами данной работы было сделано ранее [7] и подтвердилось: при проходке тоннеля со стороны северо-западного портала в начале 2018 г. произошел взрыв метана.

### Выводы

По материалам сейсмических работ установлено неоднородное структурное строение верхней части разреза Зсыпной антиклинали, которое до глубин 150–200 м определяется грязевулканической тектоникой. Волновое поле и сейсмотомографические разрезы содержат информацию об основных структурных особенностях строения грязевулканических образований. Эта информация может быть использована как индикатор при установлении природы сейсмических аномалий, обусловленных грязевулканической деятельностью.

Проектируемый тоннель расположен в пределах древнего (потухшего?) грязевого вулкана типа провала грязевулканической постройки. Исследованный Зсыпной грязевой вулкан примыкает к системе действующих Восходовских (Джарджавских) грязевых вулканов. По характеру извержения Зсыпной вулкан может быть отнесен к грязевым вулканам типа Джау-Тепе, характеризующимся длительными интервалами покоя (десятки и сотни лет), но мощными объемами извергающихся разжиженных глин и брекчий. При строительстве железнодорожного тоннеля необходимо учитывать долговременный, но трудно предсказуемый сценарий развития грязевулканической деятельности Зсыпного вулкана.

Грязевые вулканы представляют разветвленную флюидодинамическую систему. Разрывные нарушения, проникающие до глубины грязевулканической камеры, могут оказаться весьма чувствительными к антропогенным и сейсмическим воздействиям и сопровождаться внезапными выбросами метановых и иных газов. Начавшаяся проходка тоннеля в окрестности Зсыпного вулкана подтвердила этот прогноз.

*Авторы выражают искреннюю благодарность доктору физ.-мат. наук И. Ю. Кулакову (СО РАН) за сделанные замечания, которые способствовали улучшению качества работы.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбатиков А. В., Собисевич А. Л., Овсяченко А. Н. Развитие модели глубинного строения Ахтырской флексурно-разрывной зоны и грязевого

вулкана Шуго // Докл. РАН. – 2008. – Т. 421, № 5. – С. 670–674.

2. Горкун В. Н., Сирый И. М. Опыт расчета глубины залегания и объема выбрасываемого газа при извержении грязевых вулканов на Южном Сахалине // Геология и геофизика. – 1967. – № 2. – С. 30–42

3. Горшков Г. П. Региональная сейсмогеотектоника территории юга СССР. Альпийский пояс. – М.: Наука, 1984. – 271 с.

4. Грязевые вулканы Керченско-Таманской области (атлас) / Е. Ф. Шнюков, Ю. В. Соболевский, Г. И. Гнатенко и др. – Киев: Наукова Думка, 1986. – 152 с.

5. Ершов В. В. Геохимические характеристики продуктов грязевого вулканизма Керченского полуострова // Тектоника, глубинное строение и минералогия востока Азии: IX Косыгинские чтения: матер. Всерос. конф., 13–15 сентября 2016 г. – Хабаровск, 2016. – С. 120–122.

6. Ершов В. В. Подходы к содержательной интерпретации проявлений сейсмичности в деятельности грязевых вулканов // Тектоника, глубинное строение и минералогия востока Азии: IX Косыгинские чтения: матер. Всерос. конф., 13–15 сентября 2016 г. – Хабаровск, 2016. – С. 249–252.

7. Канарейкин Б. А., Мальцев А. И., Харламов А. С. Инженерно-сейсмические исследования в районе грязевых вулканов // V Междунар. науч.-практ. конф. «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы». – Воронеж: Научная книга, 2017. – С. 131–133.

8. Караганов Г. Г. Геомеханика разломов. – М.: ГЕОС, 2016. – 423 с.

9. Лебедева Н. Б. Условия и некоторые вопросы механизма образования глиняных диапиров Керченско-Таманской области // Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 219–239.

10. Лимонов А. Ф. Грязевые вулканы // Науки о Земле. Соросовский образовательный журнал. – 2004. – Т. 8, № 1. – С. 63–69.

11. Мельников О. А., Ершов В. В. Грязевой (газоводолитокластитовый) вулканизм острова Сахалин: история результаты и перспективы исследований // Вестн. ДВО РАН. – 2010. – № 6. – С. 87–93.

12. Мельников О. А., Левин В. В., Ершов В. В. Необычное извержение Главного Пугачевского газоводолитокластитового («грязевого») вулкана на Сахалине зимой 2005 г. // Докл. РАН. – 2006. – Т. 411, № 1. – С. 85–88.

13. Никитин В. Н. Основы инженерной сейсмологии. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 171 с.

14. Овсяченко А. Н., Собисевич А. Л., Сысолин А. И. О взаимосвязи современных тектонических процессов и грязевого вулканизма на примере горы Карабетова (Таманский полуостров) // Физика Земли. – 2017. – № 4. – С. 118–129.

15. О новом активном извержении одного из «грязевых» (газоводолитокластитовых) вулка-



нов на Сахалине и природе грязевого вулканизма / О. А. Мельников, К. Ф. Сергеев, А. В. Рыбин, Р. В. Жарков // Докл. РАН. – 2005. – Т. 400, № 4. – С. 536–541.

16. Панахи Б. М. Сейсмичность областей развития грязевых вулканов (Азербайджан и регион Каспия): автореф. дис. ... д. г.-м. н. – М.: ОИФЗ РАН, 1998. – 36 с.

17. Собисевич А. Л., Жостков Р. А. О движении флюидонасыщенной грязебрекчии в выводящих структурах грязевых вулканов // Геофизические исследования. – 2013. – Т. 14, № 4. – С. 46–56.

18. Собисевич А. Л., Горбатиков А. В., Овсюченко А. Н. Глубинное строение грязевого вулкана горы Карabetова // Докл. РАН. – 2008. – Т. 422, № 4. – С. 542–546.

19. Ушаков С. А. Природа складчатости осадков на дне Черного моря в зоне перехода к Крыму и Кавказу // Докл. АН СССР. – 1977. – Т. 233. – С. 932–935.

20. Хаин В. Е. Геотектоника с основами геодинамики. – М.: Изд-во КДУ, 2008. – 589 с.

21. Холодов В. Н. Грязевые вулканы: закономерности размещения и генезис. Ст. 1. Грязевулканические провинции и морфология грязевых вулканов // Литология и полезные ископаемые. – 2002. – № 1. – С. 227–241.

22. Possible sources of hydrothermal activity and mud volcanism in southern Sakhalin inferred from local earthquake seismic tomography / I. Koulakov, A. S. Serdyukov, A. V. Konovalov, et al. // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2017. – Vol. 18, no. 5. – P. 1–16.

## REFERENCES

1. Gorbatikov A.V., Sobisevich A.L., Ovsichenko A.N. Development of the model of the deep structure of the Akhtyr flexure- fracture zone and Shugo mud volcano. *Doklady Earth Sciences*, 2008, vol. 421A, no. 6, pp. 969–973.

2. Gorkun V.N., Siryk I.M. [Experience in calculating the depth and volume of emitted gas during the eruption of mud volcanoes in South Sakhalin]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 1967, no. 2, pp. 30–42. (In Russ.).

3. Gorshkov G.P. *Regional'naya seismogeotektonika territorii yuga SSSR. Al'piyskiy poyas* [Regional seismogeotectonics of the USSR south. Alpine belt]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 271 p. (In Russ.).

4. Shniukov E.F., Sobolevskii Iu.V., Gnatenko G.I., et al. *Gryazevye vulkany Kerchensko-Tamanskoy oblasti (atlas)* [Mud volcanoes of the Kerch-Taman region (atlas)]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1986. 152 p. (In Russ.).

5. Ershov V.V. [Geochemical characteristics of the mud volcanism products of the Kerch Peninsula]. *Tektonika, glubinnoe stroenie i minerageniya vostoka Azii: IX Kosygin'skie chteniya: materialy Vserossoyskoy konferentsii, 13–15 sentyabrya 2016 g.* [Tectonics, deep structure and minerageny of Eastern Asia: IX Kosygin

readings: proceedings of the All-Russian Conference, September 13–15, 2016]. Khabarovsk, 2016, pp. 120–122. (In Russ.).

6. Ershov V.V. [Approaches to the substantive interpretation of the seismicity manifestations in the activities of mud volcanoes]. *Tektonika, glubinnoe stroenie i minerageniya vostoka Azii: IX Kosygin'skie chteniya: materialy Vserossoyskoy konferentsii, 13–15 sentyabrya 2016 g.* [Tectonics, deep structure and minerageny of Eastern Asia: IX Kosygin readings: proceedings of the All-Russian Conference, September 13–15, 2016]. Khabarovsk, 2016, pp. 249–252. (In Russ.).

7. Kanareikin B.A., Maltsev A.I., Kharlamov A.S. [Engineering and seismic studies in the area of mud volcanoes]. *V mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Ekologicheskaya geologiya: teoriya, praktika i regional'nye problem"* [V International Scientific and Practical Conference "Environmental Geology: Theory, Practice and Regional Problems"]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2017, pp. 131–133. (In Russ.).

8. Karaganov G.G. *Geomekhanika razlomov* [Geomechanics of fractures]. Moscow, GEOS Publ., 2016. 423 p. (In Russ.).

9. Lebedeva N.B. [Conditions and some issues of the mechanism of formation of clay diapirs of the Kerch-Taman region]. *Skladchatye deformatsii zemnoy kory, ikh tipy i mekhanizm obrazovaniya* [Folded deformations of the earth's crust, their types and mechanism of formation]. Moscow, AS USSR Publ., 1962, pp. 219–239. (In Russ.).

10. Limonov A.F. [Mud Volcanoes]. *Nauki o Zemle, Sorosovskiy obrazovatel'nyi zhurnal*, 2004, vol. 8, no. 1, pp. 63–69. (In Russ.).

11. Melnikov O.A., Sergeev K.F., Rybin A.V., Zhar'kov R.V. [On the new active eruption of one of the mud (gas-water-clastic) volcanoes in Sakhalin and the nature of mud volcanism]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya RAS*, 2006, vol. 411, no. 1, pp. 85–88.

12. Melnikov O.A., Levin V.V., Ershov V.V. Unusual eruption of the main Pugachevsky gas-water-lithoclastic volcano in Sakhalin in winter 2005. *Doklady Earth Sciences*, 2006, vol. 411, no. 8, pp. 1209–1211.

13. Nikitin V.N. *Osnovy inzhenernoy seysmiki* [Fundamentals of Engineering Seismic]. Moscow, Moscow University Publ., 1981. 171 p. (In Russ.).

14. Ovsichenko A.N., Sobisevich A.L., Sysolin A.I. On the relationship between recent tectonic processes and mud volcanism by the example of Mt. Karabetov (Taman Peninsula). *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2017, no. 4, pp. 606–617.

15. Melnikov O.A., Sergeev K.F., Rybin A.V., Zhar'kov R.V. [Nature of mud volcanism: evidence from the latest eruption a mud (gas-water-lithoclastic) volcano in Sakhalin]. *Doklady Earth Sciences*, 2006, vol. 400, no. 1, pp. 168–192.

16. Panakhi B.M. *Seysmichnost' oblastey razvitiya gryazevykh vulkanov (Azerbaydzhan i region Kaspiya* [Seismicity of the development of mud volcanoes



(Azerbaijan and the Caspian region). Authot's abstract of doctoral thesis]. Moscow, OIFZ RAN Publ., 1998. 36 p. (In Russ.).

17. Sobisevich A.L., Zhostkov R.A. [On the movement of fluid-saturated mud-breccia in the output structures of mud volcanoes]. *Geofizicheskiye issledovaniya – Geophysical research*, 2013, vol. 14, no. 4, pp. 46–56. (In Russ.).

18. Sobisevich A.L., Gorbatikov A.V., Ovsiuchenko A.N. Deep structure of the Mt. Karabetov mud volcano]. *Doklady Earth Science*, 2008, vol. 422, no. 1, pp. 1181–1185.

19. Ushakov S.A. [Nature of the folding of sediments on the Black Sea bottom in the transition zone to the Crimea and the Caucasus]. *Doklady AN SSSR –*

*Proc. of the AS USSR*, 1977, vol. 233, pp. 932–935. (In Russ.).

20. Khain V.E. *Geotektonika s osnovami geodinamiki* [Geotectonics with the basics of geodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2008. 589 p. (In Russ.).

21. Kholodov V.N. [Mud volcanoes: patterns of location and genesis. Art. 1 Mud volcanic provinces and the morphology of mud volcanoes]. *Litologiya i poleznye iskopayemye*, 2002, no. 1, pp. 227–241. (In Russ.).

22. Koulakov I., Serdyukov A., Konovalov A., et al. Possible sources of hydrothermal activite and mud volcanism in southern Sakhalin inferred from local earthquake seismic tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 1–16.

© Б. А. Канарейкин, А. И. Мальцев, А. С. Харламов, 2019