

УДК 550.834,550.344.56,553.98

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА ДЖАУ-ТЕПЕ

© 2020 г. Д. А. Преснов^{а, *}, Р. А. Жостков^а, Д. В. Лиходеев^а, Д. Е. Белобородов^а,
З. И. Дударов^{б, с}, С. М. Долов^б

^аИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

^бЕдиная геофизическая служба РАН, просп. Ленина, 189, Обнинск, Калужская область, 249035 Россия

^сКабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
ул. Чернышевского, 173, Нальчик, 360004 Россия

*e-mail: presnov@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 18.10.2019 г.

После доработки 20.01.2020 г.

Принята к публикации 27.02.2020 г.

Представлены результаты площадных сейсмических исследований глубинного строения крупнейшего грязевого вулкана Керченского п-ва Джау-Тепе. Впервые получено представление о субвертикальных флюидопроводящих структурах вулкана, обеспечивающих доставку материала к дневной поверхности в периоды активизации. Предлагается новый подход к интерпретации измерений относительных амплитуд микросейсмического шума, основанный на численном моделировании горизонтально слоистой среды. Результаты работы сопоставлены с известными геолого-геофизическими данными о регионе исследования.

Ключевые слова: грязевой вулканизм, микросейсмизм, сейсмический шум, поверхностные волны, Керченский п-ов, слоистая среда, флюидо-динамические системы.

DOI: 10.31857/S0203030620030050

ВВЕДЕНИЕ

Грязевой вулканизм – широко распространенное геологическое явление, которое является одной из наиболее интересных и одновременно недостаточно изученных форм проявления сосредоточенной разгрузки глубинных флюидов. Несмотря на значительный прогресс в изучении этого явления, его глубинные механизмы до сих пор остаются предметом фундаментальных научных изысканий. На данном этапе актуальность дальнейших исследований процессов холодной дегазации Земли в зонах сосредоточенной флюидной активности обусловлена необходимостью решения ряда практических инженерных задач, включая оценку связанных с этим явлением опасностей на территориях активных грязевулканических провинций России. Благодаря уникальным по интенсивности и разнообразию процессам глубинной дегазации Земли Черноморский регион обращает на себя внимание многочисленных исследователей и может рассматриваться как естественный полигон для изучения закономерностей грязевулканических процессов [Шнюков и др., 2006]. В Керченско-Таманской грязевулканической провинции определено более 100 грязевых вулканов, находящихся в разной степени ак-

тивности. Здесь встречаются все известные формы грязевулканических проявлений (континентальные и морские, погребенные и открытые, потухшие и активные) [Каевицер и др., 2016]. По результатам многолетних геофизических исследований Таманского полуострова [Рогожин и др., 2014] были выявлены масштабные проявления грязевого вулканизма и показано его существенное влияние на экологическую и инженерно-геологическую ситуации в регионе. Грязевые вулканы Керченского полуострова приурочены к локальным диапировым и криптодиапировым складкам, развитым в пределах узких валообразных антиклиналей, преимущественно северо-восточного простирания. Основными факторами, обусловившими грязевулканические проявления, являются: наличие мощных толщ пластичных глинистых пород майкопской серии, служащих исходным материалом для образования сопочной брекчии; присутствие пластовых вод, размягчающих глинистые породы, из которых образуется сопочная брекчия; наличие мощных источников углеводородных газов, накопление которых в предельных объемах приводит к образованию аномально высоких пластовых давлений, создающих активную движущую силу; наличие тектонических наруше-

ний, создающих благоприятное условие для выталкивания и выбросов сопочного материала с больших глубин на дневную поверхность. Повышенный интерес к грязевому вулканизму обусловлен, в первую очередь тем, что наличие грязепроявлений — это дополнительный поисковый признак при разведке нефтяных и газовых месторождений. Кроме того, действующие грязевые вулканы представляют определенную угрозу для расположенных поблизости сооружений [Канарейкин и др., 2019], а также для судоходства на мелководных участках в юго-восточной части Азовского моря и в Керченском проливе.

Фундаментальная проблема изучения глубинного строения и механизмов деятельности грязевых вулканов может эффективно исследоваться с использованием современных методов сейсморазведки, основанных на регистрации фонового сейсмического шума. Опыт комплексных геолого-геофизических работ на территории Керченско-Таманской грязевулканической провинции на вулканах Карabetова гора, Шуго, Пекло Азовское и Джарджавы [Глинский и др., 2008; Собисевич и др., 2014, 2015; Тверитинова и др., 2015; Овсяченко и др., 2017] позволил установить, что особенности глубинного строения отдельных грязевых вулканов в значительной степени обуславливают характер их деятельности. Другими словами, дальнейшее изучение механизмов деятельности отдельных грязевых вулканов и разработка соответствующих геофизических моделей тесно связаны с решением задач по определению глубин залегания их корневых структур и пространственной конфигурации отдельных элементов питающей системы.

Пассивные методы, основанные на регистрации микросейсмического шума, обычно используют в качестве зондирующего сигнала поверхностные волны, что является весьма привлекательным в связи с постоянным и практически повсеместным их присутствием [Спунгин, Зыков, 2018]. Методы сейсморазведки, основанные на использовании поверхностных волн, прочно вошли в практику геофизических работ, поскольку позволяют оперативно получить качественное представление о внутреннем строении приповерхностных слоев Земли при относительно нетрудоемких процедурах проведения полевых работ и обработки экспериментальных данных. Для изучения таких объектов как вулканы, имеющих существенно субвертикальную структуру неоднородностей, предпочтительно использовать амплитудные методы, основанные на анализе информации об интенсивности поверхностных волн [Горбатилов и др., 2008; Жостков и др., 2015]. Метод исследования, используемый в настоящей работе, основан на анализе амплитудно-частотного пространственного распределения микросейсмического поля. В ряде численных и

экспериментальных исследований [Горбатилов, Цуканов, 2011; Bowden, Tsai, 2017] было установлено, что локальные неоднородности земной коры оказывают влияние на амплитуду поверхностных волн, а именно: заглубленные высокоскоростные неоднородности вызывают уменьшение амплитуды микросейсмического шума на поверхности геофизической среды и наоборот. Причем влияние заглубленных неоднородностей оказывается преимущественно на волны, длины которых примерно вдвое больше глубины залегания.

В настоящей работе анализируются площадные сейсмические наблюдения в районе крупнейшего грязевого вулкана Керченского полуострова Джая-Тепе, выполненные авторским коллективом в 2015 г. Предлагается новый подход к интерпретации измерений относительных амплитуд микросейсмического шума, основанный на численном моделировании горизонтально слоистой среды, с учетом последних данных о скоростной модели земной коры Керченского полуострова. Сейсмические изображения земных недр позволят впервые получить представление о внутреннем строении и механизме работы грязевулканического очага Джая-Тепе.

ОБЩАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемый объект в тектоническом отношении расположен в центральной части Юго-Западной равнины — к восточному периклинальному замыканию Туакского антиклинория. Вулкан располагается на своде широтно ориентированной Вулкановской антиклинали. Вулканическая постройка насажена на западную центриклиналь вдавленной синклинали, в которой на поверхность выведены отложения от чокрака до сармата [Белобородов, Тверитинова, 2019]. Джая-Тепе — крупнейший грязевой вулкан восточного Крыма, характеризуемый взрывным типом извержений — по целому ряду признаков заметно выделяется среди аналогичных структур Керченско-Таманской области. Вулкан расположен в пределах юго-западной равнины Керченского полуострова, в Ленинском районе и в непосредственной близости от села Вулкановка. По форме вулкан напоминает несколько асимметричный конус с уплощенной вершиной и паразитарным грифом в северо-восточной части. Вершина сложена сопочной брекчией со сравнительно свежими вторичными конусами и кальдерами. Вулканическая постройка заметно выделяется в современном рельефе, имеет абсолютную отметку 116 м над уровнем моря (60 м над равниной). Морфогенетически вулканическая постройка может быть отнесена ко второму типу [Холодов, 2012]: конусовидная, состоящая из перекрывающихся по-

кровов грязевых общей площадью около 1,5 км² и сформированная за счет периодического поступления на поверхность полужидких глинистых масс. Склоны вулкана прорезаны глубокими оврагами. С 1864 по 1942 гг. были отмечены семь эпизодов вулканической активизации, некоторые из них – крайне интенсивные, сопровождавшиеся выбросами брекчии на высоту до 50 м и возгоранием выделяющегося газа; общий объем изверженных продуктов оценивается в 55 млн м³ (110 млн т). В 1982 и 2004 гг. были отмечены случаи однократного грязевулканического излияния в спокойном режиме [Шнюков и др., 2006]. Сотрудники экспедиции МГУ в 1995 г. наблюдали слабую активность одиночного грифона, приуроченного к одной из трещин проседания [Akhmetjanov et al., 1996].

По прошествии двадцати лет, в ходе наших полевых работ 2015 г. вершинный кратер оказался совершенно сухим, а грифонная деятельность у подножия постройки не зафиксирована. В то же время, с северной стороны у подножия вулканической постройки было обнаружено свежее поверхностное нефтепроявление (рис. 1, разведочная скважина; см. № 4-Вк в работе [Борисова и др., 1989]). На рис. 2 представлен общий вид образовавшегося пятна и приближенное изображение скважины с выплескивающимся флюидом. Сопочная брекчия Джау-Тепе содержит довольно большое количество обломков пород – в основном разнообразных известняков и песчаников. Среди примечательных находок были включения самородной серы 3–5 см в диаметре, присутствие которой отмечалось и ранее [Шнюков и др., 2006]. Сравнительный анализ минерального состава выявил отличия сопочных глин Джау-Тепе и глин майкопской серии, в частности было установлено [Титова и др., 2013], что основным породообразующим минералом сопочных глин является гидрослюда, они обогащены каолинитом и отличаются значительной карбонатизацией. Исследование состава газов Джау-Тепе по данным [Шнюков и др., 2006] показало, что вулкан характеризуется весьма необычным составом газовой компоненты: преимущественно тяжелые углеводороды (83.3%) с примесью азота (11.5%) и углекислого газа (5.2%), причем преобладающий компонент типичных грязевулканических флюидов – метан [Лаврушин, 2012] отсутствует. Возможно, этот результат требует дополнительного исследования, так как является важным индикатором для разработки различных гипотез о глубине зарождения флюидов [Валяев, Дрёмин, 2015].

Следует отметить, что территориальное расположение Джау-Тепе в пределах Вулкановской нефтегазоносной площади делает его очень удобным объектом для проведения полевых геофизических работ, практически – это готовый геофи-

зический полигон с хорошей изученностью [Борисова и др., 1989]. Напомним, что ранее на Вулкановской площади разведочным бурением выявлено геологическое строение антиклинальной структуры, в ядре которой обнажаются нижнемайкопские глины, а крылья сложены нерасчлененной толщей глин средне- и верхнемайкопского возраста. Строение антиклинали симметричное, углы падения крыльев невелики. На основании обобщения материалов бурения был составлен сводный стратиграфический разрез отложений Вулкановской площади до глубины более 2 км [Борисова и др., 1989]. Разрез сложен, главным образом, отложениями майкопской серии, представленными глинами жирными слоистыми в нижнем миоцене до глубины 1 км и глинами, песчанистыми глинами в олигоцене мощностью 1 км. Одной из скважин, пробуренной на борту вдавленной синклинали, вскрыты известковистые глины среднего сармата с прослоями грязевулканических брекчий, подстилаемых батисифоновым горизонтом верхнего майкопа. Наиболее полные результаты предшествующих исследователей обобщены на геолого-геофизическом разрезе (рис. 3), построенном по данным бурения и сейсмической разведки МОГТ [Борисова и др., 1989]. Отметим, что питающий канал грязевого вулкана определен по аналитическим построениям и отображен на разрезе простым разломом в области горизонтальных расстояний 4 км. При этом область от 4 до 5 км характеризуется практически полным отсутствием сейсмической информации, обусловленным, по видимому, тектоническими нарушениями и наличием субвертикального грязевулканического канала, недоступного для классической сейсмо-разведки.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В рамках полевых работ, направленных на исследование глубинного строения грязевого вулкана Джау-Тепе, использовался геофизический метод низкочастотного микросейсмического зондирования, который хорошо зарекомендовал себя в деле изучения глубинного строения грязевых вулканов Тамани и Крыма, зон активных разломов, нефтегазоносных площадей и других неоднородных структур земной коры [Французова, Данилов, 2016; Собисевич и др., 2015; Маловичко и др., 2014]. В соответствии с технологией проведения работ [Горбатилов, 2008], была разработана схема площадной съемки, которая подразумевает измерение микросейсмического фона в семи точках, в каждом из семи линейных профилей с шагом 250 м (см. рис. 1), один из которых непосредственно пересекал вулканическую постройку – точки А1–А7 на рис. 1. При этом, можно таким образом выбрать измерительные пункты, чтобы образовался

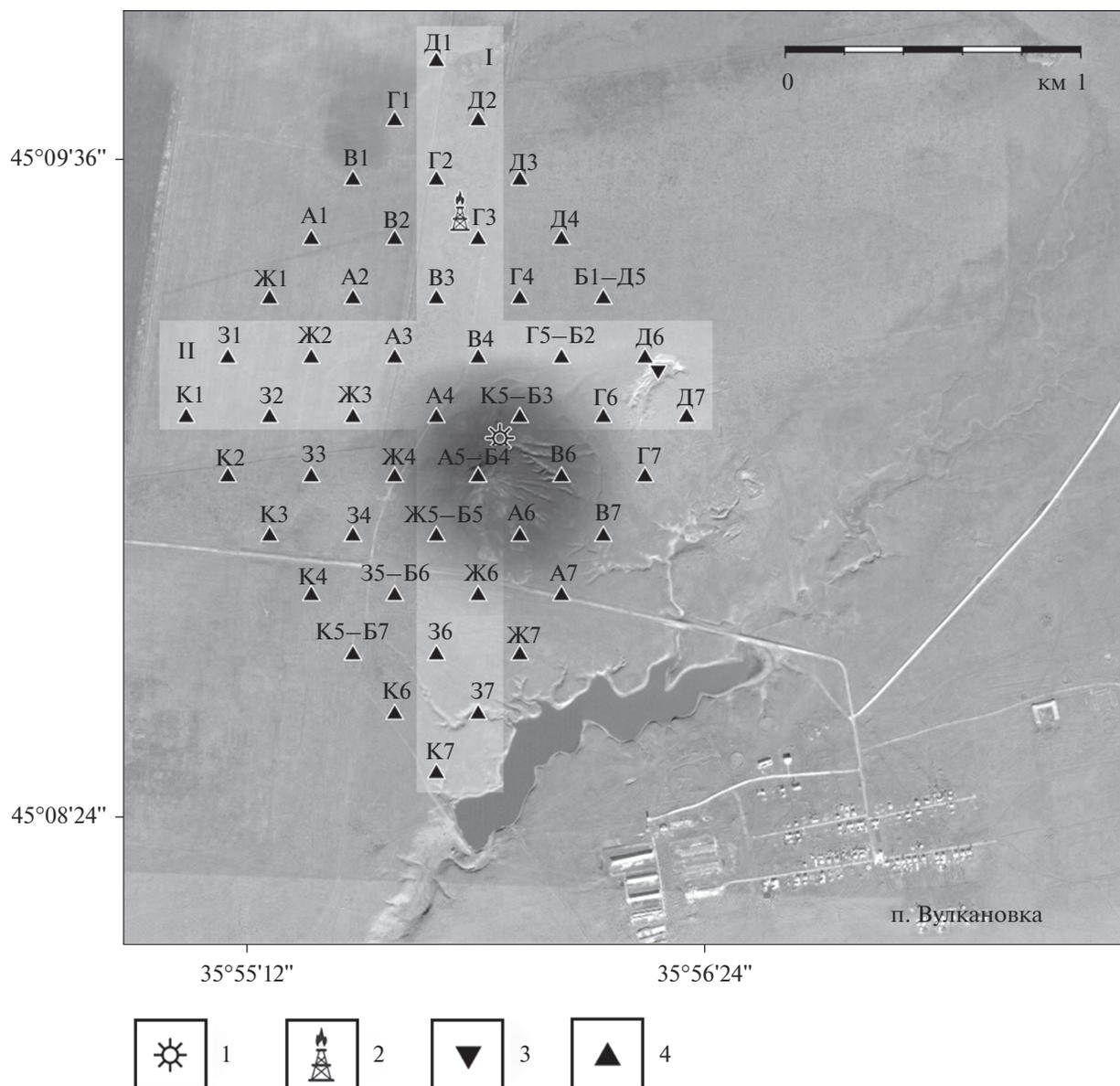


Рис. 1. Грязевой вулкан Джау-Тепе и схема выполнения сейсмических измерений. 1 – новый кратер грязевого вулкана; 2 – разведочная скважина; 3 – вдавленная синклираль; 4 – пункты сейсмических измерений.

второй профиль, пересекающий вулканическую постройку в направлении перпендикулярном первому – точки Б1–Б7 на рис. 1. Поле микро-сейсм в данном методе считается диффузным и рассматривается как суперпозиция цугов фундаментальных мод Рэлея с различным частотным наполнением, которые преобладают в естественном микросейсмическом фоне. Поэтому необходимо правильно соотносить между собой данные полевых измерений в случае, если они выполняются не одновременно. Для этой цели используется опорная точка, которая независимо функционирует во время всех измерений, после чего выполняется нормировка спектров накопленных

сигналов на спектр соответствующей записи опорной станции, т.е. таким способом одновременно решается проблема нормировки получаемых спектров, поскольку реальный микросейсмический спектр имеет сложную форму. Опорная точка была расположена в месте, исключающем наличие различных антропогенных помех, на удалении в 8 км от вулкана. Так как измерения по каждому из профилей А, Б, В, Г, Д, Ж, З и К (см. рис. 1) производились в разное время, из необходимости стационарности микросейсмического шума, измерения в точках перпендикулярного профиля Б были выполнены повторно. Результирующая площадь, охваченная предложенной расстановкой, состав-

(a)



(б)



Рис. 2. Фотографии местности: а – современное нефтепроявление в районе грязевого вулкана; б – приближенное изображение законсервированной скважины.

вила 2.25 км^2 . По данным численного моделирования разрешение метода можно оценить как четверть длины волны по горизонтали и треть длины волны по вертикали [Горбатилов, Цуканов, 2011], соответственно при принятом шаге между измерительными пунктами и длине профиля максимальная глубина, при которой достигается достаточное разрешение, составляет 4 км.

Каждый измерительный комплект состоял из вертикального широкополосного сейсмометра велосиметра СМЗ-ОС, с гладкой амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне частот 0.03–10 Гц, регистратора RefTek 130В, включающего в себя модуль GPS для временной синхронизации и элементов питания. Всего в данном исследовании было использовано 8 измерительных

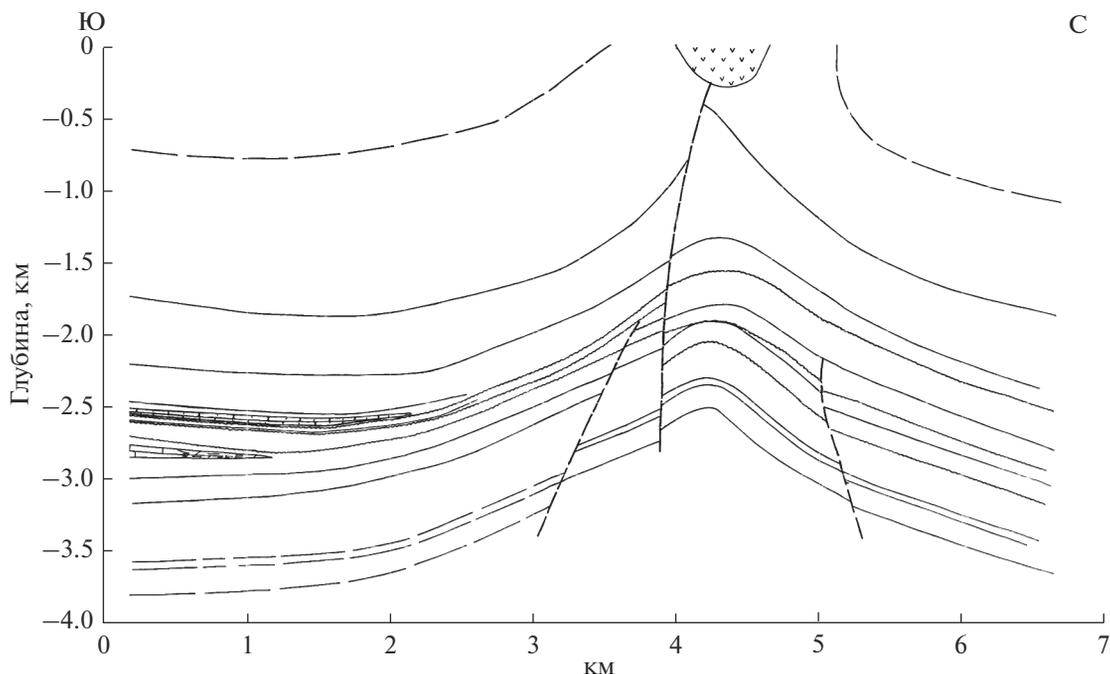


Рис. 3. Сейсмогеологический разрез по профилю, проходящему вблизи профиля I Юг–Север (см. рис. 1), пересекающего вулканическую постройку [Борисова и др., 1989].

комплектов, что позволило значительно ускорить проведение полевых работ. Среднее время установки одной измерительной точки составило 30 мин, а полностью работа была выполнена за 5 дней. Использование сейсмометров одной модели, позволяет упростить подготовку данных и не учитывать фазовые задержки, вносимые прибором. При интерпретации амплитуд, в соответствии с описанным выше подходом, на первый план выходит точность измерения амплитуды, по той причине, что даже незначительные изменения чувствительности датчика, могут приводить к существенным отклонениям в результирующем сейсмическом изображении. Именно это обстоятельство является причиной не столь сильного распространения амплитудных методов, по сравнению с фазовыми. Перед проведением полевых работ, все используемое оборудование было откалибровано на вибростенде ГС РАН в г. Обнинск, а также была выполнена сверка измерительных комплектов непосредственно в поле, на опорной точке.

Обработка экспериментальных данных выполнялась с использованием разработанного в пакете Matlab программного кода [Лиходеев и др., 2017]. Предварительно выполнялся визуальный контроль записей микросейсмического шума, из анализа исключались участки, содержащие локальные антропогенные воздействия. В результате, для каждой измерительной точки была оценена спектральная амплитуда микросейсмического

шума в пятиминутном временном интервале. В соответствии с методикой исследования параметры среды под каждым измерительным пунктом характеризует относительная интенсивность амплитуды микросейсмических сигналов, которая рассчитывается путем нормировки каждого спектра на значение спектра в опорной точке. Полученное значение усреднялось за период времени от 3 до 4 ч, причем из расчета исключались пятиминутные интервалы с большим среднеквадратичным отклонением. Эта процедура позволяет избавиться от влияния типа источника волнового возмущения и пути его распространения на результирующую величину. На рис. 4 представлены сглаженные отношения спектральных амплитуд в измерительных точках на профилях I и II, пересекающих грязевулканическую постройку, где ось ординат отображает частоту (см. подпись слева) и совпадает на обоих графиках (а) и (б). Цветовая шкала на рис. 4 и далее отображается в дБ, что соответствует десятичному логарифму отношения амплитуд. Для контроля результатов было выполнено сравнение распределения спектральных амплитуд вдоль профилей (Б1–Б7) и (Д5, Г5, В5, А5, Ж5, 35, К5), измерения на которых выполнялись в разное время, а координаты точек совпадали (см. рис. 1). Результаты сопоставления продемонстрировали достаточную схожесть относительных амплитуд, что свидетельствует о том, что измеряемый параметр действительно несет информацию о геологической структуре и не зависит от

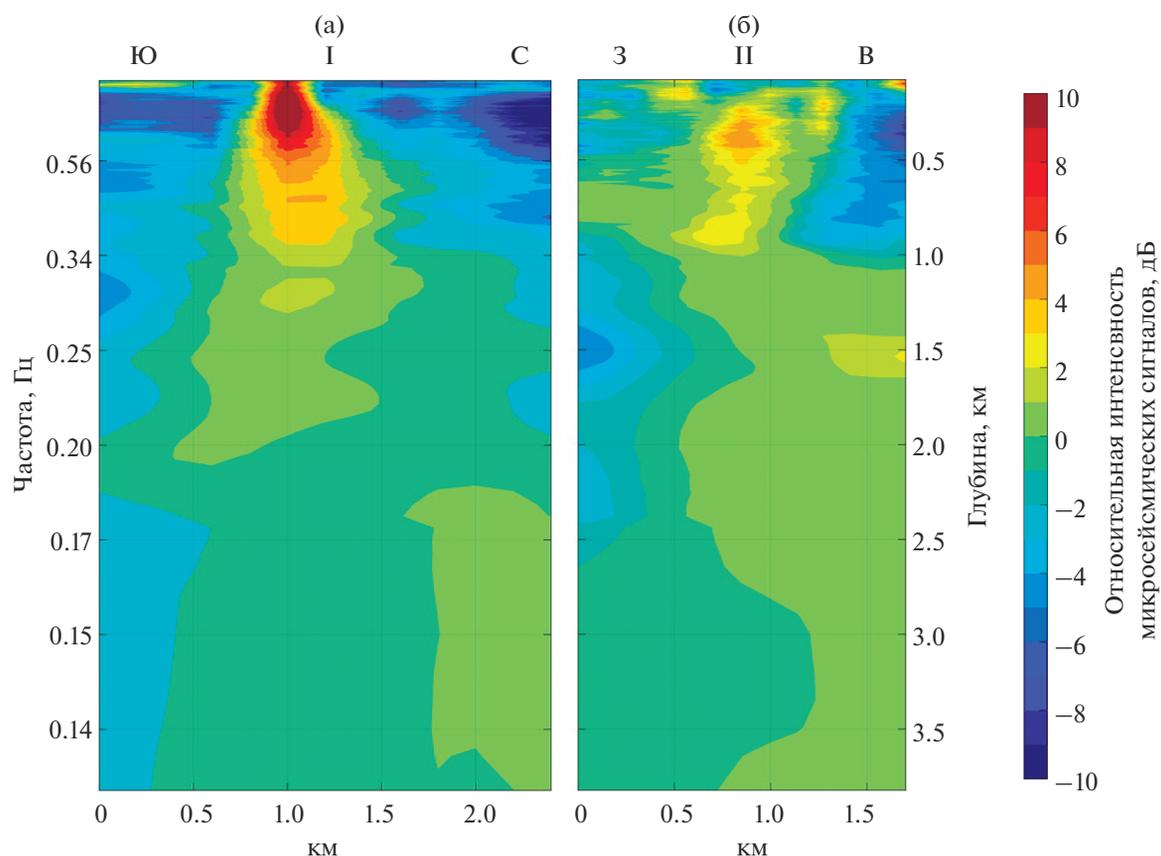


Рис. 4. Распределение спектральных амплитуд микросейсмического шума вдоль профилей, пересекающих вулканическую постройку Джау-Тепе.
а – I Юг–Север и б – II Запад–Восток.

изменчивых во времени параметров шумового сейсмического поля.

Обычно, при построении геофизического разреза среды в изучаемом регионе используется линейная эмпирическая связь между глубиной расположения неоднородности и длиной волны рассматриваемой волны Рэлея. Однако, как известно из результатов исследования дисперсионных свойств поверхностных волн, эта зависимость совсем не линейная [Горбатиков, Цуканов, 2011]. На это обстоятельство было указано и в работе [Жостков и др., 2015], где подчеркивалось, что амплитуда поверхностной волны определяется не только неоднородностью среды, расположенной на глубине порядка половины длины волны, но и всеми вышележащими параметрами среды, через которые распространяется поверхностная волна. Как было отмечено в работе [Яновская, 2017] амплитудные, как и скоростные, характеристики шумового микросейсмического поля удобно описывать на основе теории поверхностных волн, а именно в рамках математической модели горизонтально слоистой среды. Такой подход применяется при инверсии дисперсионных кривых

скорости поверхностных волн (см. например [Жожевников, Соловей, 2010; Яновская, 2015]), когда к экспериментально измеренной кривой подбирается рассчитанная теоретически в рамках слоистой модели кривая. Если распространить этот метод и на амплитуды поверхностных волн, то первым этапом интерпретации данных должна быть численная оценка чувствительности амплитуды поверхностных волн к вариациям параметров слоистой среды, расположенных на различной глубине. Такой подход набирает популярность в последние годы, отметим, в частности, работу [Eddy, Ekström, 2014], в которой анализировалась чувствительность амплитуды поверхностной волны Рэлея к различным неоднородностям геологической среды на основе экспериментальных данных масштабной сейсмической сети.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Первым этапом интерпретации сейсмических наблюдений обычно является выбор региональной скоростной модели среды. В настоящем исследовании мы основывались на результатах ра-

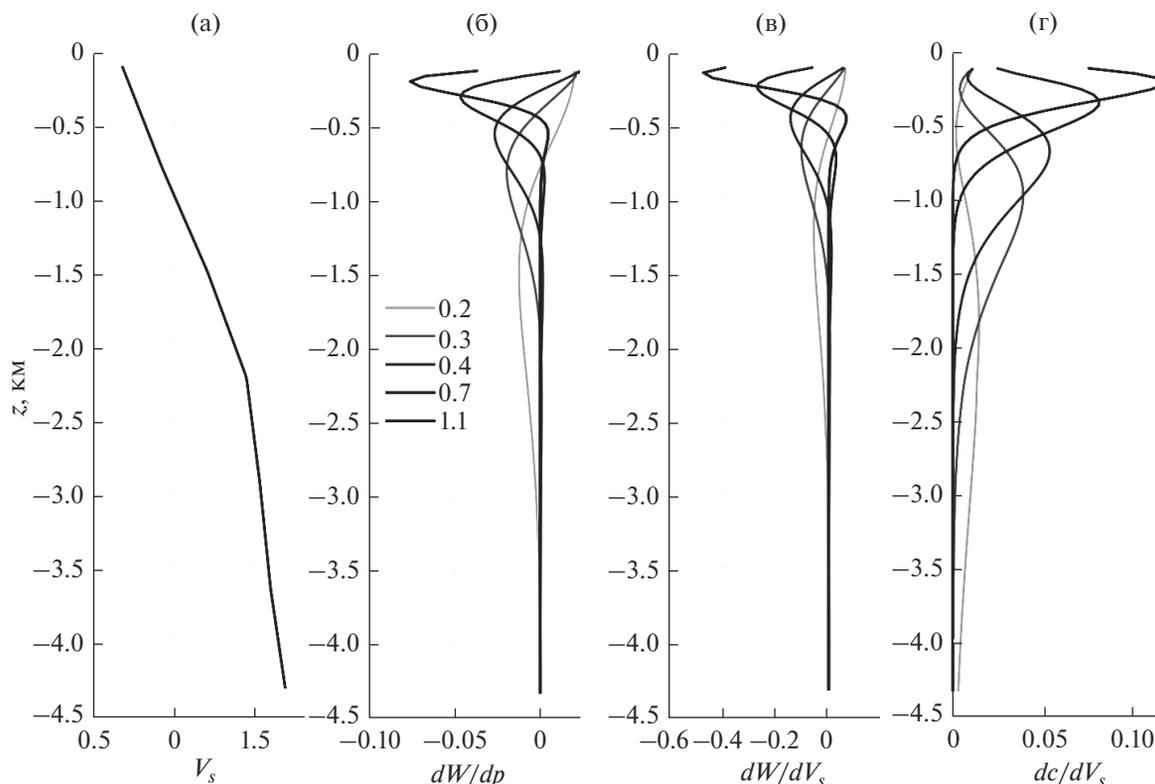


Рис. 5. Чувствительность относительной амплитуды поверхностных волн к изменению плотности (б) и скорости поперечных волн (в) с глубиной, относительно начальной модели среды (а), чувствительность фазовой скорости к изменению скорости поперечных волн (г) с глубиной. В рамке указаны значения частот в Гц, для которых выполнялся расчет.

боты [Егорова и др., 2018], где по данным ГСЗ была построена скоростная колонка продольных волн $V_p(z)$ для Феодосийско-Керченской зоны. Профиль скоростей продольных волн $V_p(z)$ был пересчитан нами в разрез скоростей поперечных волн $V_s(z)$ до глубины 4.5 км и разбит на 120 равномерно распределенных слоев с шагом ~ 35 м (рис. 5а). Таким образом, была выбрана исходная однородная модель горизонтально слоистой среды. Одним из способов решения прямой задачи поверхностных волн в вертикально неоднородной среде является метод матричного пропагатора (или метод Томсона–Хаскелла), для расчета использовался алгоритм, предложенный ранее [Presnov et al., 2016]. В дальнейшем будем придерживаться стандартного подхода интерпретации поверхностных волн, по аналогии с результатами работы [Яновская, 2015], где была вычислена чувствительность групповой скорости поверхностной волны Рэлея к параметрам среды, расположенным на различной глубине. Для оценки чувствительности относительной амплитуды поверхностной волны Рэлея к вариациям параметров разреза выполнялась численная оценка частной производной равная отношению приращения относительной амплитуды вертикальной компоненты к из-

менению скоростей продольных волн $\partial W/\partial V_p$, поперечных волн $\partial W/\partial V_s$ и плотности $\partial W/\partial \rho$. Такие частные производные вычислялись нами для фиксированных частот f и при возмущении в слоях, расположенных на различной глубине z . На рис. 5 для пяти частот $f = 0.2; 0.3; 0.4; 0.7; 1.1$ Гц (оттенки серого) приведены рассчитанные значения частных производных, показывающие чувствительность относительной амплитуды волны Рэлея к изменению плотности (б) и скорости поперечных волн (в) в слоях, расположенных на различной глубине. Результаты расчета показали, что чувствительность относительной амплитуды к вариациям скоростей продольных волн $\partial W/\partial V_p$ гораздо ниже, чем $\partial W/\partial V_s$, поэтому этот график здесь не приводится. На рис. 5г для примера приведена чувствительность фазовой скорости к вариациям скорости поперечных волн. Представленным частотам соответствуют длины волн фундаментальной моды поверхностной волны Рэлея $\lambda = 6; 3.9; 2.6; 1.3; 0.7$ км.

Анализируя графики, заметим, во-первых, что кривые чувствительности относительных амплитуд имеют достаточно сложный нелинейный вид. Более того, чувствительность амплитуды меняет знак, что означает, что увеличение скорости (или

плотности) в слое может приводить как к убыванию амплитуды, так и к ее возрастанию. Отметим, что на это было указано и в работе [Яновская, 2017]. Рассчитанные частные производные позволяют перейти к инверсии относительных амплитуд для восстановления параметров среды в линейном приближении, однако рассмотрение обратной задачи выходит за рамки настоящего исследования. Во-вторых, важным является то, что для рассматриваемой исходной модели кривые чувствительности фазовой скорости (см. рис. 5г) имеют максимум на глубине около половины длины волны, что согласуется с основным свойством поверхностных волн. Однако, для кривых чувствительности относительных амплитуд (см. рис. 5б, 5в) оказывается, что максимум смещен к ближе к поверхности. Это означает, что, если придерживаться методики стандартной интерпретации данных метода микросейсмического зондирования, то значение эмпирического коэффициента в нашем случае необходимо принять равным 0.3. Напомним, что в стандартной интерпретации [Горбатиков и др., 2008] пересчет спектральных относительных интенсивностей в глубинный разрез выполняется с использованием региональной дисперсионной кривой скорости поверхностной волны Рэлея (в нашем случае дисперсионная кривая рассчитывалась теоретически на основе слоистой модели, см. рис. 5а) и эмпирического коэффициента, характеризующего глубину проникновения каждой частотной компоненты, принимаемого обычно равным 0.4.

Таким образом, на рис. 4а и 4б представлены, полученные с учетом результатов численного моделирования, глубинные геофизические разрезы (шкала глубин справа) для двух профилей, пересекающих в крест грязевулканическую постройку. Тоновая шкала на рис. 4 показывает относительную интенсивность реакции среды по разрезу на прохождение рэлеевских волн с различной глубиной проникновения. Увеличение интенсивности реакции среды соответствует пониженным значениям скоростей (теплые тона) и свидетельствует о наличии флюидопроницаемых структур и областей накопления грязевулканических продуктов. Уменьшение реакции соответствует повышенным значениям скоростей (холодные тона) и обнаруживает непроницаемые консолидированные породы. Анализируя полученные результаты отметим, что достаточно уверенно выделяются области повышенных значений интенсивности микросейсмических сигналов непосредственно под вершиной вулкана, которые связаны с присутствием грязевулканической питающей системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный нами результат рис. 4а дополняет геолого-геофизический разрез рис. 3 в зоне гори-

зонтальных расстояний 3.5–5.5 км. На геофизическом изображении до глубины 4 км (см. рис. 4а), которое сопоставляется с общей мощностью майкопских и надмайкопских отложений, четко фиксируется крутопадающая зона с повышенными значениями относительной интенсивности микросейсмических сигналов, отвечающая участкам флюидопроницаемых структур – с активизированным (размягченным) состоянием глин майкопа в центральной части антиклинальной зоны. Участок, соответствующий, приповерхностному грязевулканическому очагу, расположен непосредственно под грязевулканической постройкой на глубинах до 1000 м. К северо-востоку от грязевулканической постройки (см. рис. 4б) фиксируются относительно плотные блоки, имеющие куполообразную форму, которые, отражают падение горных пород на западном крыле синклинали складки, интерпретируемой как структура вдавненной синклинали [Шнюков и др., 2006] (рис. 6). Помимо вертикальных неоднородностей на профиле прослеживаются наклонные неоднородности, отвечающие, вероятно, слоистой структуре осадочных кайнозойских толщ. Можно выделить зону питающего канала и камер грязевого вулкана, представленными флюидопроницаемыми структурами с величиной относительной интенсивности в диапазоне от –2 до 2 дБ. Отметим, что на глубинах более одного километра грязевулканический канал смещается (см. рис. 4б) относительно вершины грязевого вулкана (горизонтальное расстояние 1 км – на рис. 4а и 0.75 км – на рис. 4б) в северо-восточном направлении на расстояние более 0.5 км.

Для получения более детальных разрезов рассмотрим горизонтальные сечения грязевулканической постройки Джау-Тепе на фиксированных частотах. На рис. 7 представлен условный вид сверху на вулканическую постройку. Для построения горизонтального сечения использовались данные приемников, расположенных в узлах сетки, нанесенной на рисунке. С использованием результатов численного моделирования полученные разрезы можно отнести к следующим глубинам: а – 1.75 км; б – 1.06 км; в – 0.74 км; г – 0.37 км. Белым цветом на рисунке отмечена контурная линия, проходящая по уровню 0.4 дБ, который может соответствовать достаточно плавной границе перехода между консолидированными породами и раздробленными структурами грязевулканической питающей системы. Область, охваченная контурной линией, имеет близкое к субширотному простираению на различных глубинах, за исключением приповерхностной части. Обращает на себя внимание также увеличение площади этой фигуры с ростом глубины и фактическое отсутствие нижней границы корневой питающей системы вулкана. Однако необходимо отметить, что это обстоятельство может быть связано и с

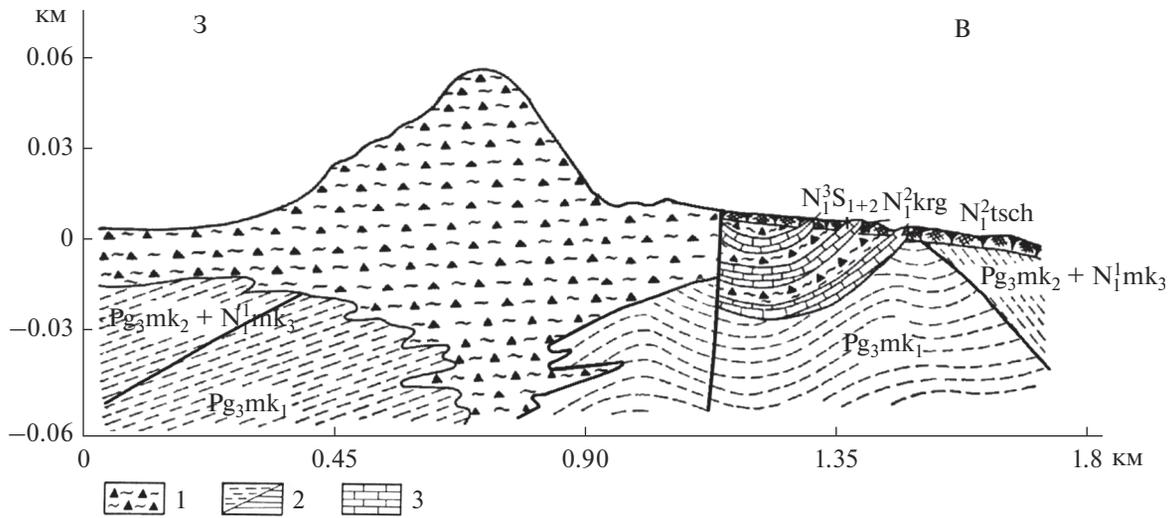


Рис. 6. Геологический разрез сопочного поля Джау-Тепе и выдавленности вдоль профиля П, по [Шнюков и др., 2006] с исправлениями, масштаб осей разный.

1 – сопочная брекчия; 2 – глины сланцеватые; 3 – сарматские известняки. $N_1^3S_{1+2}$ – сарматский ярус; N_1^2krk – караганский горизонт; N_1^1tsch – чокракский горизонт; $N_1^1mk_3$, Pg_3mk_2 , Pg_3mk_1 – майкопская серия.

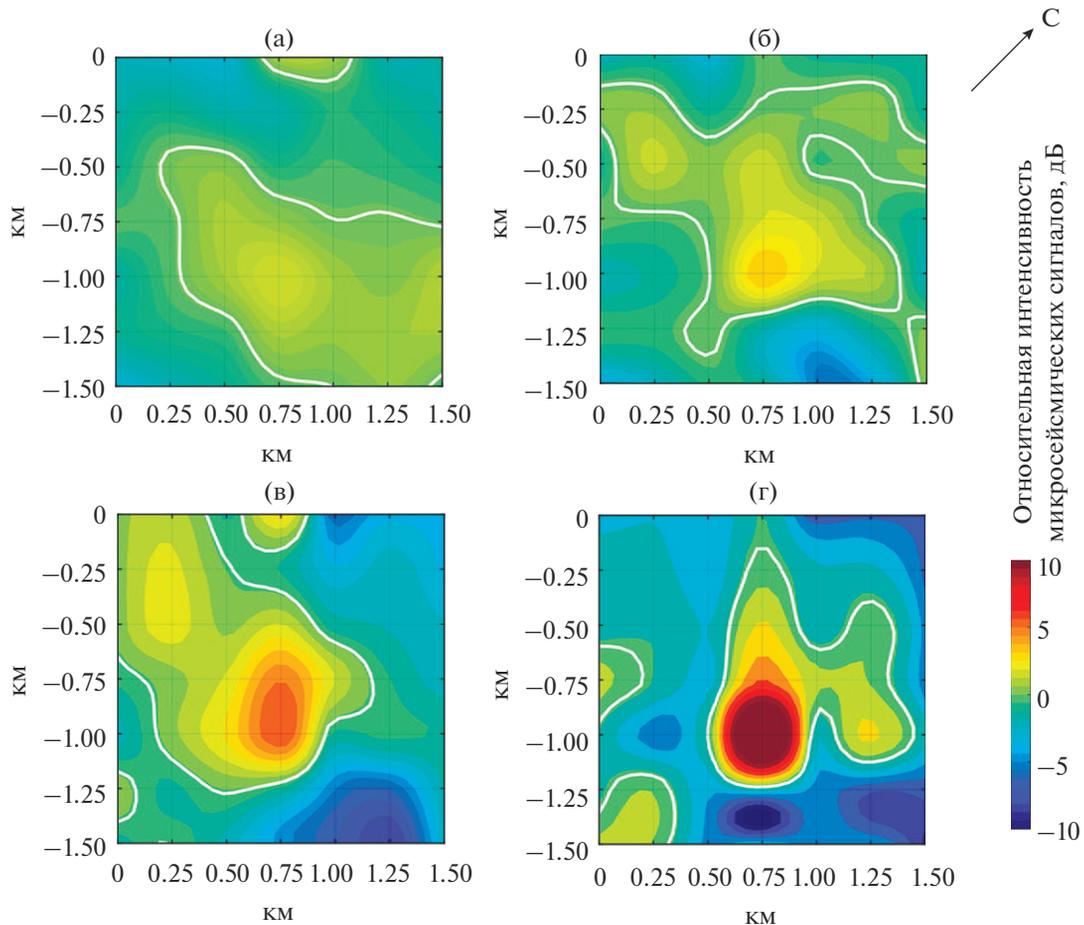


Рис. 7. Горизонтальное распределение относительных амплитуд для различных частотных диапазонов: а – 0.23 Гц, б – 0.33 Гц, в – 0.42 Гц, г – 0.71 Гц.

приближением разрешающей способности метода к своему ограничению. Замеченное выше смещение питающего канала на глубинах более 1 км наблюдается и на рис. 7. Здесь областям с пониженными значениями относительной интенсивности соответствует структура вдавленной синклинали, состоящая из более плотных пород и расположенная в северо-восточной части.

Таким образом, в результате выполнения полевых геолого-геофизических исследований впервые получено представление о пространственной конфигурации субвертикальных флюидопроницаемых структур, обеспечивающих систему глубинного питания грязевого вулкана Джау-Тепе. Оконтуры области вдавленной синклинали, антиклинальной складки субширотного простирания и корневой питающей системы вулкана, имеющей достаточно сложную структуру. Новые данные не противоречат существующим представлениям о строении Вулкановской площади (см. рис. 3) и подчеркивают уникальность вулкана Джау-Тепе. Результаты интерпретации геофизических разрезов позволили получить новые данные о глубинном строении грязевого вулкана Джау-Тепе и впервые составить представление о пространственной структуре его корневой питающей системы. Полученные результаты расширяют наши представления об условиях формирования глубинных флюидопроводящих структур в западной части Керченско-Таманской грязевулканической провинции и вносят свой вклад в решение проблемы комплексной оценки эндогенных опасностей южных регионов России.

Развиваемый в работе подход к интерпретации экспериментальных данных относительных амплитуд микросейсмического фона на основе численного моделирования горизонтально слоистой среды позволил продемонстрировать, что относительная амплитуда является еще одним измеряемым параметром поверхностных волн, который может быть включен в процедуру инверсии дисперсионных кривых. Важной особенностью относительной амплитуды является достаточно высокая чувствительность к вариациям плотности, что позволяет наложить дополнительные ограничения на искомую модель среды. Кроме того, в результате обработки экспериментальных данных показана независимость измеряемого параметра от временных вариаций сейсмического шумового фона.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность члену-корр. РАН А.Л. Собисевичу и кандидату г.-м. н. Т.Ю. Тверитиновой (МГУ им. М.В. Ломоносова) за обсуждение результатов геофизического эксперимента и ценные комментарии. А также анонимным рецензентам, заме-

чания которых позволили существенно повысить качество статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 14-05-90421, № 18-35-00541) и в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белобородов Д.Е., Тверитинова Т.Ю.* Трещинные структуры грязевых вулканов и вмещающих толщ Керченско-Таманской грязевулканической области // Материалы шестой молодежной тектонофизической школы-семинара. М.: ИФЗ РАН, 2019. С. 77–83.
- Борисова Л.И., Рамская Н.Е., Хорюшина З.П.* Отчет о результатах нефтегазопроискового бурения на Северо-Вулкановской площади по состоянию на 1989 г. Симферополь: Крымгеология, 1989. 246 л.
- Валяев Б.М., Дрёмин И.С.* Дегазация Земли и природа процессов нефтегазонакопления (изотопно-геохимические и геодинамические аспекты) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2015. № 2. С. 33–49.
- Глинский Б.М., Собисевич А.Л., Фатьянов А.Г., Хайретдинов М.С.* Математическое моделирование и экспериментальные исследования грязевого вулкана Шуго // Вулканология и сейсмология. 2008. Т. 2. № 5. С. 69–77.
- Горбатилов 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.
- Горбатилов А.В., Цуканов А.А.* Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С. 96–112.
- Егорова Т.П., Баранова Е.П., Гобаренко В.С., Муровская А.В.* Строение земной коры Горного Крыма вдоль профиля “Севастополь–Керчь” по результатам ГСЗ и локальной сейсмической томографии // Геотектоника. 2018. № 4. С. 77–95.
- Жостков Р.А., Преснов Д.А., Собисевич А.Л.* Развитие метода микросейсмического зондирования // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 2. Вып. 26. С. 11–19.
- Канарейкин Б.А., Мальцев А.И., Харламов А.С.* Изучение зоны проявления грязевого вулканизма на Керченском полуострове инженерно-сейсмическими методами // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2019. № 1. С. 35–46.
- Каевицер В.И., Словоцков И.Б., Кривоцов А.П., Разманов В.М., Смолянинов И.В., Элбакидзе А.В.* Подводные грязевые вулканы Таманского полуострова (по данным гидролокационных исследований) // Вулканология и сейсмология. 2016. № 4. С. 27–33.
- Кожевников В.М., Соловей О.А.* Трехмерная модель мантии центральной Азии по данным дисперсии фазовых скоростей волн Рэлея // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 30–39.
- Лаврушин В.Ю.* Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления // Тр. ГИН РАН. Вып. 599 / Отв. ред. Б.Г. Поляк. М.: ГЕОС, 2012. 348 с.

- Лиходеев Д.В., Дударов З.И., Жостков Р.А., Преснов Д.А., Долов С.М., Данилов К.Б.* Исследование глубинного строения вулкана Эльбрус методом микросейсмического зондирования // *Вулканология и сейсмология*. 2017. № 6. С. 28–32.
- Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Лиходеев Д.В., Заключковская А.С., Преснов Д.А.* Развитие системы разно-масштабного сейсмического мониторинга в районе вулкана Эльбрус // *Сейсмические приборы*. 2014. Т. 50. № 4. С. 47–57.
- Овсюченко А.Н., Собисевич А.Л., Сысолин А.И.* О взаимосвязи современных тектонических процессов и грязевого вулканизма на примере горы Карабетова (Таманский п-ов) // *Физика Земли*. 2017. № 4. С. 118–129.
- Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатиков А.В.* Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.
- Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Тверитинова Т.Ю.* О грязевом вулканизме в позднеальпийском складчатом сооружении Северо-Западного Кавказа (на примере изучения глубинного строения грязевого вулкана Шуго) // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2014. № 2. С. 80–93.
- Собисевич А.Л., Тверитинова Т.Ю., Лиходеев Д.В., Белобородов Д.Е., Дударов З.И., Долов С.М., Преснов Д.А., Пузич И.Н.* Глубинное строение грязевого вулкана Джарджава в пределах Южно-Керченской антиклинальной структуры // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2015. Т. 42. № 2. С. 73–80.
- Спунгин В.Г., Зыков Д.С.* Микросейсмичность локальных участков юго-востока Фенноскандинавского щита // *Вулканология и сейсмология*. 2018. № 1. С. 57–68.
- Тверитинова Т.Ю., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Лиходеев Д.В.* Структурная позиция и особенности строения и формирования грязевого вулкана горы Карабетова // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2015. № 2. С. 106–122.
- Титова Н.О., Нестеровский В.А., Деяк М.А., Ступина Л.В.* Состав песчано-глинистой фракции сопочной брекции грязевого вулкана Джау-Тепе на Керченском полуострове // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2013. № 4. С. 90–94.
- Французова В.И., Данилов К.Б.* Структура трубки взрыва имени М.В. Ломоносова Архангельской алмазоносной провинции по аномалиям микросейсмического поля // *Вулканология и сейсмология*. 2016. № 5. С. 71–78.
- Холодов В.Н.* Грязевые вулканы: распространение и генезис // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2012. № 4. С. 5–27.
- Шнюков Е.Ф., Шереметьев В.М., Маслаков Н.А., Кутний В.А., Гусаков И.Н., Трофимов В.В.* Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона. Краснодар: Глав-Медиа, 2006. 176 с.
- Яновская Т.Б.* К теории метода микросейсмического зондирования // *Физика Земли*. 2017. № 6. С. 18–23.
- Яновская Т.Б.* Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб.: Наука, 2015. 167 с.
- Akhmetjanov A., Akmanov G., Krylov O., Basov E., Kozlova E., Stadnitskaya A.* Mud volcanoes of the Kerch peninsula. General review // *Sedimentary Basins of the Mediterranean and Black Seas. Abstracts of the 4th Post-Cruise Meeting Training-through-Research programme*. V. 100 of MARINF. UNESCO Paris. 1996. P. 23–24.
- Bowden D.C., Tsai V.C.* Earthquake ground motion amplification for surface waves // *Geophysical Research Letters*. 2017. V. 44. № 1. P. 121–127.
- Eddy C.L., Ekström G.* Local amplification of Rayleigh waves in the continental United States observed on the US-Array // *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. V. 402. P. 50–57.
- Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S.* Model of the geoacoustic tomography based on surface-type waves // *Physics of Wave Phenomena*. 2016. V. 24. № 3. P. 249–254.

New Data on the Deep Structure of the Jau-tepe Mud Volcano

D. A. Presnov^{1,*}, R. A. Zhostkov¹, D. V. Likhodeev¹, D. E. Beloborodov¹,
Z. I. Dударов^{2,3}, and S. M. Dolov²

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
Bol'shaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242 Russia*

²*Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Lenin prosp., 189, Obninsk, Kaluzhskaya obl., 249035 Russia*

³*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov,
Chernyshevsky str., 173, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004 Russia*

*e-mail: presnov@physics.msu.ru

Results of areal seismic investigations of the deep structure of the largest in the Kerch Peninsula mud volcano Jau-Tepe are presented. An understanding of the subvertical fluid-conducting structures of the volcano, which ensure the delivery of material to the day surface during periods of activation, was obtained. A new approach, based on numerical simulation of a vertically layered medium, is proposed for the interpretation microseismic noise relative amplitudes measurements. Results of the work are compared with known geological and geophysical data on the region of study.

Keywords: mud volcanology, microseisms, seismic noise, surface waves, Kerch Peninsula, deep structure, layered medium, fluid-dynamic systems.