

УДК 550.834, 551.21

DOI: 10.46698/VNC.2025.91.86.001

Оригинальная статья

Проявление в низкочастотном поле микросейсм глубинных неоднородностей грязевого вулкана Джау-Тепе

З.И. Дударов¹, Д.Е. Белобородов²

¹ Единая геофизическая служба РАН, Россия, 249035,
г. Обнинск, пр. Ленина, 189, e-mail: zalim-dudar@yandex.ru;

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123242, г. Москва,
ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, e-mail: beloborodov@ifz.ru

Статья поступила: 11.02.2025, доработана: 11.05.2025, принята к публикации: 16.05.2025

Резюме: Исследование направлено на изучение с применением современных геофизических технологий внутренней структуры и механизма деятельности грязевого вулкана Джау-Тепе, являющегося одним из крупных элементов Керченско-Таманской грязевулканической провинции. **Актуальность работы.** Изучение глубинной структуры грязевых вулканов, строения и механизмов работы их флюидопроводящих систем – необходимое и важное условие для понимания процессов грязевого вулканизма. Для возможного прогнозирования пароксизмальных крупных извержений, сопровождающихся разрушениями, локальными землетрясениями и просадками грунта требуется четкое понимание устройства и механизма работы аппарата грязевого вулкана, динамики доставки флюидного вещества. **Цель работы** – изучение внутреннего строения грязевого вулкана Джау-Тепе и структуры глубинных каналов доставки флюидного вещества опираясь на данные площадной съемки пассивного геофизического метода сейсморазведки с последующим анализом и интерпретацией полученных результатов. **Методы.** Исследование проводилось геофизическим методом микросейсмического зондирования, основанным на анализе низкочастотной составляющей амплитудных спектров поверхностных волн Рэлея, зарегистрированных с использованием широкополосных сейсмических измерительных систем в 56 пунктах площадной съемки с последующим анализом массива данных авторским программным комплексом MDP-3D. **Результаты исследований.** Анализ низкочастотной составляющей амплитудных спектров поверхностных волн Рэлея в диапазоне частот 0.03–1.2 Гц, позволил построить геофизическую объемную структурную модель распределения относительной интенсивности микросейсм до глубины 18 км, показывающую относительное изменение скоростных характеристик среды под грязевым вулканом. На глубине 6 км и ниже непосредственно выявлено мощное ярко выраженное низкоскоростное тело, корни которого уходят вглубь до отметки 18 км и далее, демонстрирующее характерные размеры и формы резервуаров накопления грязебрекчий, а также возможные источники и пути миграции сверхглубинных флюидов.

Ключевые слова: грязевой вулкан Джау-Тепе, глубинное строение, флюидопроводящие структуры, корневые структуры, микросейсмы, поверхностные волны, микросейсмическое зондирование.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственных заданий ФИЦ ЕГС РАН (№ 075-00604-25) и ИФЗ РАН (№ 0144-2019-0019).

Для цитирования: Дударов З.И., Белобородов Д.Е. Проявление в низкочастотном поле микросейсм глубинных неоднородностей грязевого вулкана Джау-Тепе. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 103–115. DOI: 10.46698/VNC.2025.91.86.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.91.86.001

Original paper

Identification of deep inhomogeneities of the Dzhau-Tepe mud volcano in the low-frequency field of microseisms

Z.I. Dudarov¹, D.E. Beloborodov²

¹ Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 189 Lenin Ave., Obninsk 249035, Russian Federation, e-mail: zalim-dudar@yandex.ru;

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 B. Gruzinskaya Str., Moscow 123242, Russian Federation, e-mail: beloborodov@ifz.ru

Received: 11.02.2025, revised: 11.05.2025, accepted: 16.05.2025

Abstract: The research is aimed at studying the internal structure and mechanism of activity of the Dzhau-Tepe mud volcano, which is one of the major elements of the Kerch-Taman mud volcanic province using modern geophysical technologies. **Relevance.** The study of the deep structure of mud volcanoes, the structure and mechanisms of their fluid-conducting systems is a necessary and important condition for understanding the processes of mud volcanism. For possible prediction of paroxysmal large-scale eruptions accompanied by destruction, local earthquakes and subsidence of soil, a clear understanding of the structure and mechanism of the mud volcano apparatus and the dynamics of fluid delivery is required. **Aim.** The study of the internal structure of the Dzhau-Tepe mud volcano and the structure of deep channels for the delivery of fluid based on data from the areal survey of the passive geophysical method of seismic exploration, followed by analysis and interpretation of the results. **Methods.** The study was carried out using the geophysical microseismic sounding method based on the analysis of the low-frequency component of the amplitude spectra of surface Rayleigh waves recorded using broadband seismic measuring systems at 56 points of area survey, followed by an analysis of the data array by the author's MDP-3D software package. **Results.** Analysis of the low-frequency part of the amplitude spectra of surface Rayleigh waves in the frequency range 0.03-1.2 Hz allowed us to construct a geophysical volumetric structural model of the distribution of the relative intensity of microseisms to a depth of 18 km, showing a relative change in the velocity characteristics of the environment under the mud volcano. At a depth of 6 km and below, a powerful, pronounced low-velocity body was directly detected, the roots of which extend deep to the 18 km mark and beyond, demonstrating the characteristic sizes and shapes of mud-breccia accumulation reservoirs, as well as possible sources and migration routes of ultra-deep fluids.

Keywords: Dzhau-Tepe mud volcano, deep structure, fluid-conducting structures, root structures, microseisms, surface waves, microseismic sounding.

Acknowledgement: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the state assignments FRC GS RAS (No. 075-00604-25) and IPE RAS (No. 0144-2019-0019).

For citation: Dudarov Z.I., Beloborodov D.E. Identification of deep inhomogeneities of the Dzhau-Tepe mud volcano in the low-frequency field of microseisms. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 103-115. DOI: 10.46698/VNC.2025.91.86.001

Введение

Грязевой вулканизм является флюидодинамическим природным процессом, сопровождающимся переносом на дневную поверхность Земли глубинных грязевулканических масс по каналам с высокой флюидопроницаемостью, которые в свою

очередь приурочены к крупным тектоническим разрывным нарушениям земной коры [Якубов, 1980]. Стоит отметить, что тектонические нарушения являются важным фактором формирования грязевых вулканов (ГВ), но не рассматриваются в качестве единственной причины их образования. Ведущую роль в формировании ГВ играют толщи пластичных глинистых пород в осадочной оболочке Земли и пластовые воды, т.е. смесь воды и газов, которые под высоким давлением и температурой трансформируют вмещающие терригенные породы в полужидкую мобильную массу. Этот процесс принято называть АВПД – аномально высокое пластовое давление. Присутствие смеси углеводородных газов, углекислого и некоторых других, образованных из рассеянных в осадочных породах органических веществ за счет химических процессов и геотермического градиента приводит к возникновению в недрах критически высоких пластовых давлений. Образовавшаяся глубинная однородная масса, состоящая из глинистой компоненты – минералов глин, характерных для «материнского» слоя, обломков вмещающих горных пород, воды и газов различного состава, становится зоной сверхвысоких пластовых давлений флюидов, которые доставляют на дневную поверхность флюидонасыщенную смесь, формируя наземные структуры грязевых вулканов различной морфологии.

Исследования, связанные с изучением ГВ являются актуальными, так как они выступают индикаторами существования в зонах их функционирования привлекательных с экономической точки зрения нефтяных продуктов [Якубов, 1980], также могут создавать опасность для людей и промышленных объектов [Korzhnikov et al., 2021], кроме того, являются одним из основных источников метана, который попадая в атмосферу нарушает климатический баланс Земли [Jones et al., 2023; Mazzini et al., 2021]. При этом грязевулканический метан в недрах Земли образуется под влиянием различных факторов [Lavrushin et al., 2022].

На территории современной России крупнейшей зоной сосредоточения грязефлюидной активности является Керченско-Таманская грязевулканическая провинция (КТГП), занимающая второе место в мире по количеству грязевых вулканов, находящихся в разных фазах активности.

Использование метода микросейсмического зондирования, как пассивного метода сейсморазведки, основанного на анализе волнового спектра естественного микросейсмического шума, позволило эффективно исследовать отдельные грязевые вулканы КТГП [Собисевич и др., 2008; Рогожин и др., 2014], в том числе Джау-Тепе [Presnov et al., 2020], и построить современные геофизические структурные модели вулканов. Амплитудно-частотный и пространственно-временной анализ низкочастотной составляющей микросейсмических сигналов, полученных площадной съёмкой на Джау-Тепе, позволил «заглянуть глубже» и получить новые данные о сверхглубинных корнях вулкана, дополняющие наши ранее полученные результаты [Presnov et al., 2020].

Геологическая позиция объекта исследования

Керченско-Таманская грязевулканическая провинция расположена в зоне сочленения горно-складчатых сооружений Крыма и Кавказа (рис. 1а), где происходит погружение орогенных складчатых структур мегантиклинория Большого Кавказа под слабодислоцированный кайнозойский чехол поперечного Керченско-Таманского и передового Западно-Кубанского прогибов.

ГВ КТГП расположены на Керченском и Таманском полуостровах, часть на

южной границе Краснодарского края, кроме того, наблюдается их присутствие в прибрежной зоне Азовского и Черного морей. ГВ пространственно и генетически связаны с антиклинальными майкопскими диапировыми структурами в зонах систем разрывных нарушений, которые способствуют перемещению глубинных насыщенных водой и газами грязефлюидных масс с выходом сопочных брекчий на поверхность.

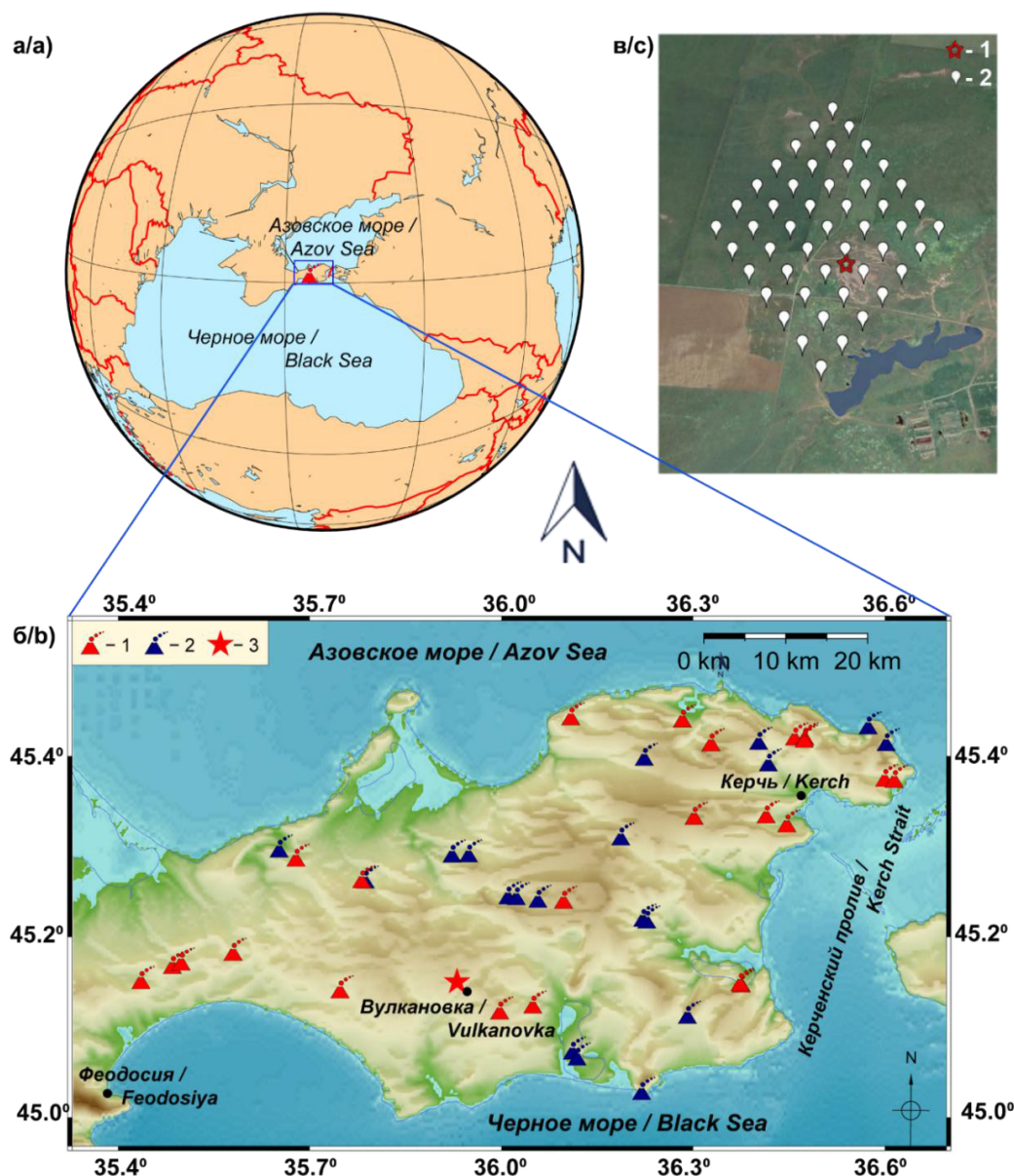


Рис. 1. Общая информация об объекте исследования:

а – территориальное положение объекта исследования; б – карта-схема Керченского полуострова (1 – действующие и активные грязевые вулканы, 2 – неактивные и слабоактивные вулканы, 3 – вулкан Джау-Тепе); в – схема проведенных геофизических исследований на грязевом вулкане Джау-Тепе (1 – положение вулкана Джау-Тепе, 2 – пункты регистрации микросейсмических сигналов) /

Fig. 1. General information about the research object:

а – the territorial location of the research object; б – the map diagram of the Kerch Peninsula (1 – active mud volcanoes, 2 – inactive and weakly active volcanoes, 3 – Dzhau-Tepe volcano); в – the scheme of the conducted geophysical research on the mud volcano Dzhau-Tepe (1 – the position

of the volcano Dzhaui-Tepe, 2 – microseismic signal registration points)

Стоит отметить, что состав и свойства отдельных слоев осадочной толщи являются важными факторами формирования общей корневой системы вулкана. В данном случае, в качестве корневой системы грязевого вулкана как единого целого рассматривается совокупность грязевулканических камер (близповерхностная, глубинная), выводящих каналов разной ориентации и формы, по которым на поверхность поступает грязевулканическая масса («ил» – мелкодисперсное минеральное вещество пеллитовой размерности, обломки осадочных пород, отдельные минералы, вода, различные газы).

Самым крупным ГВ на Керченском полуострове (рис. 1б), является Джау-Тепе, расположенный вблизи п. Вулкановка в Ленинском районе республики Крым. Высота вулкана 60 метров относительно уровня местности. По классификации [Mazzini, Etiope, 2017] вулкан относится к коническому типу и имеет конусообразную морфологию, для которого характерен центральный кратер, окруженный наложенными друг на друга грязевулканическими образованиями в результате периодических извержений полужидких глинистых масс (рис. 2а).

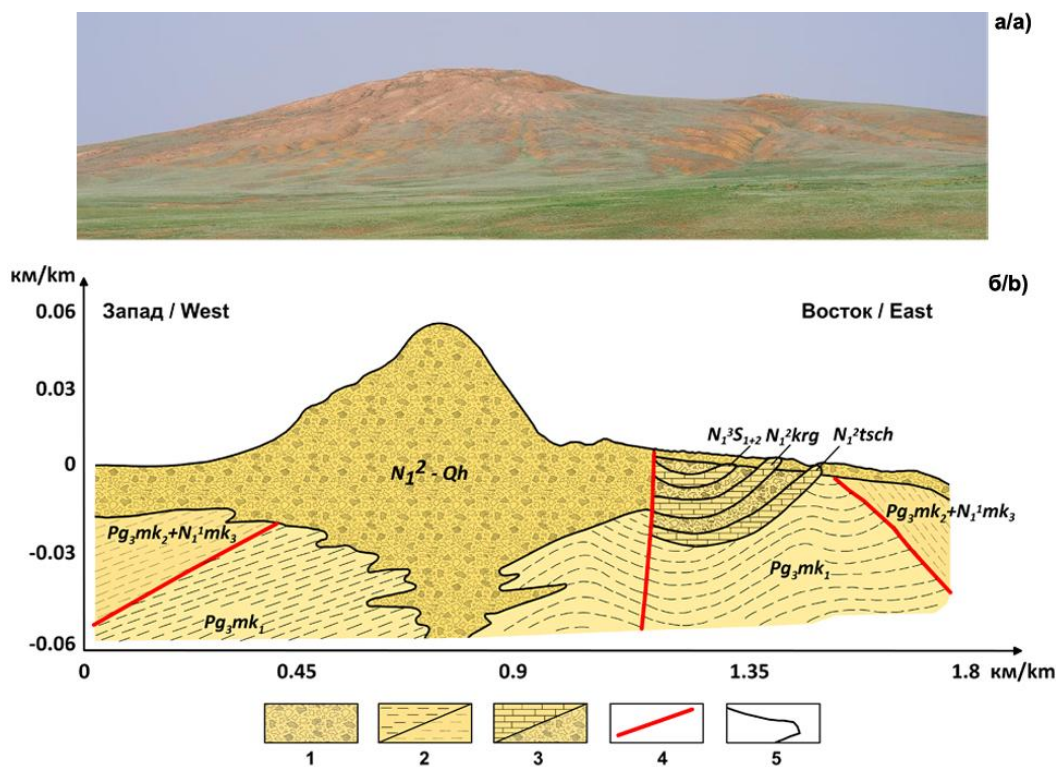


Рис. 2. Грязевой вулкан Джау-Тепе.

а – общий вид вулкана; б – геологический разрез вулкана Джау-Тепе вдоль близширотного профиля по [Shnyukov, Yanko-Hombach, 2020], с дополнениями: 1 – сопочная брекчия разновременных генераций N_1^2-Qh ; 2 – глины сланцеватые среднего Pg_3mk_1 и позднемаикопского $Pg_3mk_2-N_1^1mk^3$ возраста; 3 – горные породы Вулкановской вдавленной синклинали – известняки и сопочная брекчия миоценового возраста: $N_1^3s_{1+2}$ – сарматский ярус, N_1^2krq – караганский горизонт, N_1^2tsch – чокракский горизонт; 4 – разрывные нарушения; 5 – границы несогласных залегающих /

Fig. 2. Dzhaui-Tepe mud volcano.

a – general view of the volcano; b – geological section of the Dzhaui-Tepe volcano along the near-latitude profile according to [Shnyukov, Yanko-Hombach, 2020] with modification: 1 – volcanic breccia of different generations N_1^2-Qh ; 2 – shaly clays of Middle Pg_3mk_1 and Late Maikopian $Pg_3mk_2-N_1^1mk^3$ period; 3 – limestones and hill breccia of Miocene age: $N_1^3s_{1+2}$ the Saratian stage, N_1^2krq a Karagan

horizon, N_1^{2tsch} a Chokrak horizon; 4 – faults; 5 – the boundaries of dissenting structures

За последние полтора века были отмечены несколько случаев извержения Джау-Тепе [Shnyukov, Yanko-Hombach, 2020] с различной степенью интенсивности, в том числе с выбросом вулканической массы на высоту до 50 м, сопровождавшихся возгоранием выделяющегося газа, а также наблюдались периодические слабоактивные функционирования одиночных грифонов. Регулярные взрывные – эксплозивные выбросы газов с обильным излиянием сопочной брекчии отмечаются во многих работах [Shnyukov, Yanko-Hombach, 2020].

Структура вулкана расположена в центре Вулкановской антиклинали, широтно ориентированной. На поверхности фиксируются глинисто-терригенные и карбонатные отложения чокракского, караганского и сарматского ярусов. Ранее, разведочным бурением (Отчет о результатах нефтегазопроисового бурения на Северо-Вулкановской площади по состоянию на 1989 г. / Борисова Л.И., Рамская Н.Е., Хорюшина З.П. – Симферополь: Крымгеология. 1989. 246 с.) в районе вулкана исследована Вулкановская антиклинальная структура, представленная глинистыми породами раннемайкопского возраста в ядре складки и слоями глин средне- и позднемайкопского возраста на склонах (рис. 2б).

Антиклинальные зоны, в которых проявлен грязевой вулканизм Керченского полуострова, можно выделить Северную (или Приазовскую), Центральную (Припарпачскую) и Южную (Юго-Западной равнины). Они характеризуются широтными ориентировками, обстановками сжатия с формированием антиклинальных структур также субширотного или северо-восточного простирания. Каждая зона состоит из нескольких кулисно подстраивающих друг друга диапировых антиклиналей. Южная зона, к которой относится структура вулкана, наименее выражена в рельефе, что вероятно, является отражением высокого уровня эрозионно-денудационного среза. Южная зона, как и цепочки грязевых вулканов, в целом, имеет широтную ориентировку. Это проявление характерно для регионального уровня, когда грязевой вулканизм активно проявляется в узлах пересечения основных антиклинальных грязевулканических зон, которым соответствуют системы структур широтного и северо-западного простирания [Skripytsyna et al., 2020].

Сейсморазведочные работы по МОГТ в районе ГВ Джау-Тепе и результаты бурения позволили построить малоглубинную, по меркам метода микросейсмического зондирования, геолого-геофизическую модель, где выделенная разломная структура интерпретирована как корневая система вулкана, которая была дополнена новыми данными [Presnov et al., 2020], по которым была уточнена близповерхностная камера накопления грязевулканического вещества и показана форма канала их поступления.

Метод исследования

Принцип изменения амплитудного спектра микросейсм при взаимодействии с глубинными неоднородностями, которые обладают различной плотностью и скоростными характеристиками является основой, которая заложена в методе микросейсмического зондирования [Горбатиков и др., 2008]. При прохождении заглубленных низкоскоростных структур происходит увеличение спектральной амплитуды низкочастотного микросейсмического сигнала, и наоборот высокоскоростные среды способствуют ее уменьшению. Учитывая специфику рассеивания микросейсмического поля, субвертикальные геологические структуры являются более

предпочтительными для выявления и оконтуривания, чем горизонтальные формирования. Вулканы, в том числе грязевые, в основном по своей морфологии имеют субвертикальную структуру неоднородностей, поэтому использование технологии микросейсмического зондирования для их изучения является одним из надежных методов [Gorbatikov et al., 2018; Собисевич и др., 2008; Рогожин и др., 2014]. Кроме того, метод активно используется при изучении разрывных нарушений разной природы [Rogozhin et al., 2020; Горбатилов и др., 2023].

В качестве информативного зондирующего сигнала в ММЗ используются низкочастотные микросейсмические волны в основном естественного происхождения. Результаты численных исследований [Горбатилов, Цуканов, 2011] показали, что у метода разрешающая способность по горизонтали оценивается как $(0.25-0.3)\lambda$, а по вертикали порядка 0.3λ , где λ – эффективная зондирующая длина волны. Кроме того, было установлено, что метод позволяет восстанавливать изображение небольшой изолированной неоднородности даже в том случае, если ее размеры меньше длины волны в 10 и более раз [Горбатилов, Цуканов, 2011].

Выдерживая требования метода на грязевом вулкане Джау-Тепе на 56 точках, согласно схеме как показано на рисунке 1в были зарегистрированы статистически устойчивые фоновые микросейсмические волны (2 часа и более) с использованием широкополосных сейсмических станций на базе цифровых регистраторов сигналов Ref-Tek-130 (производство «Refraction Technology, Inc.», США) и сейсмоприемников СМЗ-ОС с гладкой амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне частот от 0.03 до 10 Гц (производство ООО «Микросейсм», Россия), которые прошли метрологические испытания на специализированном вибростенде ФИЦ ЕГС РАН. Также перед началом полевых исследований для корректного сопоставления полевых сигналов была проведена сверка измерительных комплектов. Расстояние между точками регистрации фоновых колебаний составляло в среднем 250 м. Для максимального изолирования от внешнего воздействия (ветрового, солнечного и т.д.) измерительные системы устанавливались в заранее подготовленные площадки и закрывались полностью. Учет трендовых региональных вариаций микросейсмического поля выполнялся с использованием опорной станции, которая была установлена в 8 км от вулкана вдали от техногенных источников помех и работала непрерывно на весь период проведения полевых исследований.

Расчет относительной интенсивности микросейсмических сигналов вертикальной компоненты смещения в каждой точке и для каждой частоты амплитудного спектра был выполнен в программном комплексе MDP-3D (Дударов З.И., Кандохов З.М. Microseism Data Processor – 3D (MDP-3D). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613926 от 11.03.2022 г.). Процедура камеральной обработки микросейсмических данных методом микросейсмического зондирования подробно описана в работе [Роров и др., 2014]. В расчетах значение эмпирического коэффициента глубинной привязки было равно величине 0.3 в соответствии с [Presnov et al., 2020]. Следует отметить, что данный параметр влияет только на глубину залегания выявленной неоднородности, а горизонтальные размеры контура и его горизонтальное положение никак не зависят от указанного коэффициента.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам обработки массива полевых данных построена до глубины 18 км геофизическая объемная структурная модель (рис. 3а) распределения относитель-

ной интенсивности микросейсм, показывающая относительное изменение скоростных характеристик среды под вулканом. На рисунке вскрытые разнородные структуры, выраженные в дБ, соответствуют цветовой шкале относительной интенсивности микросейсм (I). Положительные значения интенсивности реакции среды (теплые тона) соответствуют пониженным значениям скоростей поверхностных волн и интерпретируются в основном как флюидонасыщенные, разуплотнённые структуры, а отрицательные значения реакции (холодные тона) свидетельствуют о наличии непроницаемых консолидированных пород, которые для наглядности на разрезе (рис. 3а) показаны частично прозрачными. Параметры выявленной прямо под вулканом приповерхностной грязевулканической камеры (область 1 на рис. 3а) подробно описаны в [Presnov et al., 2020] и не рассматриваются в настоящей работе.

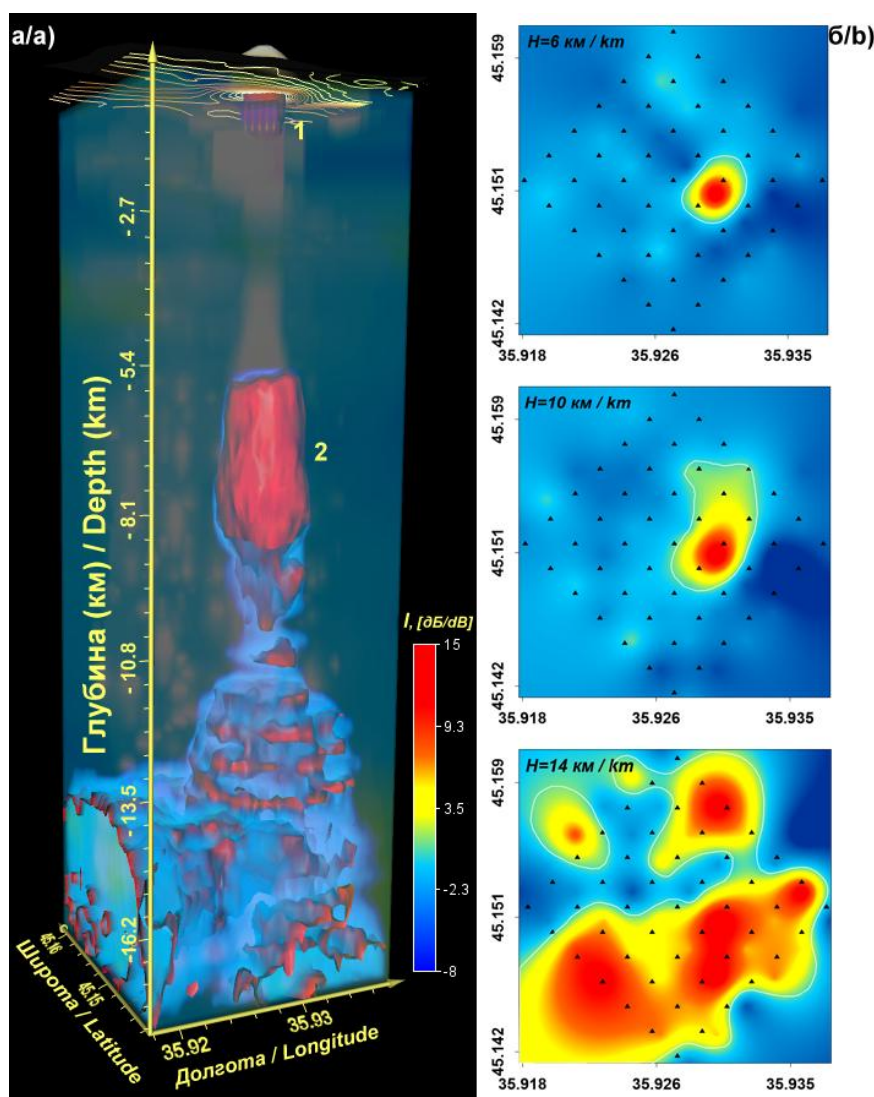


Рис. 3. Глубинная геофизическая структурная модель грязевого вулкана Джаяу-Тепе (а) и горизонтальные срезы для глубин 6, 10 и 14 км (б) /

Fig. 3. Deep geophysical structural model of the Dzhaui-Tepe mud volcano (a) and horizontal sections for depths of 6, 10 and 14 km (b)

Интерпретация микросейсмического поля в диапазоне низких частот от 0.03 до 1.2 Гц позволила выявить на глубине 6 км и ниже непосредственно под вулканом

мощное ярко выраженное низкоскоростное тело, корни которого уходят вглубь до отметки 18 км и более (область 2 на рис. 3а). Такие сверхглубинные структуры с характерными сейсмическими свойствами наблюдаются в толще земной коры и по данным геолого-геофизических исследований интерпретируются как осадочные инъекции [Доценко, 2010], питающие системы грязевых вулканов [Собисевич и др., 2008; Рогожин и др., 2014; Шнюков, Нетребская, 2016], зоны дробления и субвертикальные зоны деструкции [Бембель и др., 2003], а также рассматриваются в качестве потоков глубинных мантийных газов [Шнюков, Нетребская, 2014].

На территории Южно-Каспийской впадины такие субвертикальные структуры достигают глубины порядка 20 км и имеют горизонтальные размеры от 3 до 10 км, а глубины проявления подобных тел в Черноморском регионе составляют в основном 10-12 км, в некоторых случаях до 18-20 км и идентифицируются чаще всего как грязевые вулканы. Также имеют место в осадочной толще субвертикальные образования, не достигающие дневной поверхности или дна моря, формируя так называемые «слепые» грязевые вулканы [Шнюков, Коболев, 2020].

Выявленная на Джау-Тепе сверхглубинная структура с максимальным значением относительной интенсивности микросейсмических сигналов, скорее всего, выступает в качестве промежуточной камеры (резервуара) накопления глубинных грязевулканических газов, которые способствуют формированию условий для выдавливания водогрязевой смеси и извержению грязевого вулкана. Математическое описание деятельности грязевых вулканов [Доманский, Ершов, 2011] с питающими системами заполненными газом в нижней и водогрязевой массой в верхней их части показывает, что в результате увеличения давления газов со временем между компетентными элементами устанавливается неустойчивое равновесие, приводящее к вытеснению водогрязевой смеси и извержению грязевого вулкана с выбросом грязебрекчий на поверхность Земли и глубинных газов в атмосферу. После сброса давления в питающем канале запускается процесс наращивания напряжения и подготовки нового извержения.

Низкоскоростное формирование под вулканом Джау-Тепе имеет столбобразную форму. Как видно на горизонтальных срезах, на глубинах 6, 10 и 14 км (рис. 3б) наблюдается расширение формы питающего канала, особенно в нижней глубинной части, за счет внедрения при разгрузке глубинных флюидов во вмещающие породы, имеющие определённую степень разуплотнения из-за изменения плотности и проницаемости среды. Источники таких глубинных газов, питающих многие грязевые вулканы КТПП, находятся за пределами осадочного чехла [Ершов и др., 2015]. Так в спонтанных газах грязевого вулкана Бугазский, были обнаружены образцы с мантийной углеродной меткой [Войтов и др., 2004].

Анализ подводящего канала показывает наличие вторичного очага (область 2) – зоны накопления флюида перед извержением. Особый интерес вызывает промежуток центрального канала на интервале глубин 3.0-3.5 км, соответствующий более высокоскоростным структурам (отрицательные значения относительной интенсивности на разрезе). По нашему мнению, данная область связана с образованием «пробки» из дегидратированной сопочной брекчии. Такое «пережатие» подводящего канала создает условие для образования вторичного очага с подготовкой критически высокого давления. В дальнейшем, прохождение порога прочности «пробки» приведет к пароксизмальному извержению, с выбросом газо-водо-насыщенного вещества и сбросом давления, после чего наступит этап накопления, обогащенного флюидами вещества и давления во вторичном очаге с одновременным отмиранием

вышележащего канала.

Построение объемной структурной модели до глубины 18 км дало возможность существенно уточнить глубинность образования первичного флюидного вещества. Наличие так называемых «глубинных корней» подтверждается резким расширением разуплотненного низкоскоростного участка. Вероятно, эта зона глубже 11 км выступает в качестве термической и газовой подпитки.

Выводы

Реанализ полевых измерений площадной съемки на грязевом вулкане Джау-Тепе, проведенной по методу микросейсмического зондирования, позволил получить новые данные о глубинном строении вулкана:

1. В низкочастотной области микросейсм выявлены сверхглубинные субвертикальные, вероятно, флюидопроводящие неоднородности, ассоциированные с грязевулканическими структурами – основным (главным) резервуаром и проводящим центральным каналом, интерпретируемые на разрезах как области с положительным значением относительной интенсивности.

2. Выявленная столбообразная аномальная структура отчетливо прослеживается под вулканом с отметки 6 км и ниже до глубины 18 км и далее.

3. Определено пространственное положение низкоскоростного участка в подводящем канале и предложена модель цикличного накопления и извержения Джау-Тепе.

4. Выявленная близповерхностная камера, детально рассмотренная в работе [Presnov et al., 2020], и полученные в данной статье новые результаты в совокупности составляют единую питающую систему грязевого вулкана Джау-Тепе.

Литература

1. Бембель Р.М., Мегеря В.М., Бембель С.Р. Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов. Тюмень: Вектор Бук, 2003. – 344 с.
2. Войтов Г.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Пронин А.П., Микадзе Э.И., Науменко-Бондаренко И.И., Пузич И.Н. Эманиационные и изотопно-углеродные нестабильности грифонов газов грязевого вулкана Бугазский и сопряженных с ним тектонических структур (Таманская грязевулканическая провинция). // Доклады академии наук. – 2004. – Т. 394. № 1. – С. 85–88.
3. Горбатилов А.В., Заалишвили В.Б., Харазова Ю.В. Глубинное строение, сейсмичность, тектоника северного фланга Большого Кавказа и Терско-Каспийского прогиба (Северная Осетия) в рамках единой кинематической модели на базе новых геофизических данных. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 33–48. DOI: 10.46698/VNC.2023.44.73.003.
4. 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.
5. 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. DOI: 10.1134/S0002333711040077.
6. Доманский А.В., Ершов В.В. Математическое моделирование геофлюидодинамических процессов, протекающих в грязевулканических структурах. // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. № 3. – С. 470–481.
7. Доценко В.В. Вторичная миграция нефти и газов. Ростов-на-Дону: Изд. Южного фе-

дерального университета, 2010. – 48 с.

8. Ершов В.В., Собисевич А.Л., Пузич И.Н. Глубинное строение грязевых вулканов Тамани по данным натурных исследований и математического моделирования. // Геофизические исследования. – 2015. – Т. 16. № 2. – С. 69–76.

9. Рогожин Е.А., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Тверитинова Т.Ю. Структурная позиция и проблемы возникновения очагов грязевого вулканизма в позднеальпийском складчатом сооружении Северо-Западного Кавказа (на примере изучения глубинного строения грязевого вулкана Шуго). // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – № 3. – С. 89–115. DOI: 10.23671/VNC.2014.3.55453.

10. Собисевич А.Л., Горбатилов А.В., Овсяченко А.Н. Глубинное строение грязевого вулкана горы Карабетова. // Доклады академии наук. – 2008. – Т. 422. № 4. – С. 542–546.

11. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П. Слепые грязевые вулканы. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2020. – Т. 16. № 2(60). – С. 49–65. DOI: 10.15407/gpimo2020.02.049.

12. Шнюков Е.Ф., Нетребская Е.Я. Глубинное геологическое строение грязевых вулканов черного моря. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2014. – № 2(36). – С. 66–79.

13. Шнюков Е.Ф., Нетребская Е.Я. О глубинном строении эруптивного канала грязевых вулканов. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2016. – № 4(46). – С. 54–66.

14. Якубов А.А., Григорьянц Б.В., Алиев А.А. Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтеносностью. Баку: ЭЛМ, 1980. – 162 с.

15. Gorbatiyov A.V., Rogoghin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Sysolin A.I., Rybin A.A., Andreeva N.V. Model of the deep structure of the Elbrus volcano in the light of new geophysical data. // Doklady Earth Sciences. – 2018. – Vol. 480. No. 1. – pp. 642–645. DOI: 10.1134/S1028334X18050136.

16. Jones M.W., Peters G.P., Gasser T., Andrew R.M., Schwingshackl C., Gütschow J., Houghton R.A., Friedlingstein P., Pongratz J., Quéré C.L. National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. // Scientific Data. – 2023. – Vol. 10. No. 155. DOI: 10.1038/s41597-023-02041-1.

17. Korzhenkov A.M., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S., Kashitsyna O.Yu. Natural geohazards in the Taman peninsula. // Doklady Earth Sciences. – 2024. – Vol. 519. (Suppl 1). – pp. 239–261. DOI: 10.1134/S1028334X2460470X.

18. Lavrushin V.Y., Aydarkozhina A.S., Sokol E.V., Chelnokov G.A., Petrov O.L. Mud volcanic fluids of the Kerch–Taman region: geochemical reconstructions and regional trends: Communication 2. Genesis of Mud Volcanic Gases and Regional Geochemical Trends. // Lithology and Mineral Resources. – 2022. – Vol. 57. No. 1. – pp. 1–24. DOI: 10.1134/S0024490222010059.

19. Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: An updated review. // Earth Science Reviews. – 2017. – Vol. 168. – pp. 81–112. DOI: 10.1016/J.EARSCIREV.2017.03.001.

20. Mazzini A., Sciarra A., Etiope G., Adavarte P., Houweling S., Pandey S., Husein A. Relevant methane emission to the atmosphere from a geological gas manifestation. // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. No. 4138. DOI: 10.1038/s41598-021-83369-9.

21. Popov D.V., Danilov K.B., Zhostkov R.A., Dudarov Z.I., Ivanova E.V. Processing the digital microseism recordings using the Data Analysis Kit (DAK) software package. // Seismic instruments. – 2014. – Vol. 50. No. 1. – pp. 75–83. DOI: 10.3103/S074792391401006X.

22. Presnov D.A., Zhostkov R.A., Likhodeev D.V., Beloborodov D.E., Dudarov Z.I., Dolov S.M. New evidence for the deep structure of the Dzhaub–Tepe mud volcano. // Journal of Volcanology and Seismology. – 2020. – Vol. 14. No. 3. – pp. 166–176. DOI: 10.1134/S0742046320030057.

23. Rogozhin E.A., Gorbatiyov A.V., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Sysolin A.I., Andreeva N.V., Pogrebchenko V.V., Chervinchuk S.Y., Chen J., Liu J., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S. Deep structure of the northwestern termination of the Caucasus from new geological and geophysical data. // Izvestiya Physics of the Solid Earth. – 2020. – Vol. 56. – pp. 772–788. DOI: 10.1134/

S1069351320060075.

24. Shnyukov E., Yanko-Hombach V. Mud volcanoes of the Black sea region and their environmental significance. Springer. – 2020. – 512 p. DOI: 10.1007/978-3-030-40316-4.

25. Skrypitsyna T.N., Florinsky I.V., Beloborodov D.E., Gaydalenok O.V. Mud volcanism at the Taman peninsula: multiscale analysis of remote sensing and morphometric data. // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12. No. 22. Art. No. 3763. DOI: 10.3390/rs12223763.

References

1. Bembel R.M., Megerya V.M., Bembel S.R. Geosolitons: functional system of the Earth, concept of exploration and development of hydrocarbon deposits. Tyumen. Vector Buk. 2003. 344 p. (In Russ)

2. Voitov G.I., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Pronin A.P., Mikadze E.I., Naumenko-Bondarenko I.I., Puzich I.N. Exhalative and carbon isotope instabilities in gryphon gases from the Bugaz mud volcano and conjugated tectonic structures (Taman mud volcanic province). Doklady Earth Sciences. 2004. Vol. 394. No. 1. pp. 85–885. (In Russ)

3. Gorbatikov A.V., Zaalishvili V.B., Kharazova Yu.V. Deep structure, seismicity, and tectonics of the northern flank of the Greater Caucasus and the Tersk-Caspian trough (North Ossetia) within the framework of a unified kinematic model based on new geophysical data. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 33–48. DOI: 10.46698/VNC.2023.44.73.003. (In Russ)

4. Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Korablev G.E. Patterns of microseismic field formation under the influence of local geological heterogeneities and sounding of the environment using microseisms. Physics of the Earth. 2008. No. 7. pp. 66–84. (In Russ)

5. Gorbatikov A.V., Tsukanov A.A. Modeling of Rayleigh waves near scattering velocity inhomogeneities. Investigation of the possibilities of the microseismic sounding method. Physics of the Earth. 2011. No. 4. pp. 96–112. DOI: 10.1134/S0002333711040077. (In Russ)

6. Domansky A.V., Ershov V.V. Mathematical modeling of geofluidodynamic processes occurring in mud volcanic structures. Geology and Geophysics. 2011. Vol. 52. No. 3. pp. 470–481. (In Russ)

7. Dotsenko V.V. Secondary migration of oil and gases. Rostov-on-Don. Southern Federal University. 2010. 48 p. (In Russ)

8. Ershov V.V., Sobisevich A.L., Puzich I.N. The deep structure of mud volcanoes of Taman according to field studies and mathematical modeling. Geophysical Research. 2015. Vol. 16. No. 2. pp. 69–76. (In Russ)

9. Rogozhin E.A., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Tveritinova T.Y. Structural position and problems of occurrence of mud volcanism foci in the Late Alpine folded structure of the Northwestern Caucasus (on the example of studying the deep structure of the Shugo mud volcano). Geology and Geophysics of Russian South. 2014. No. 3. pp. 89–115. DOI: 10.23671/VNC.2014.3.55453. (In Russ)

10. Sobisevich A.L., Gorbatikov A.V., Ovsuchenko A.N. The deep structure of the mud volcano of Mount Karabetova. Doklady Earth Sciences. 2008. Vol. 422. No. 4. pp. 542–546. (In Russ)

11. Shnyukov E.F., Kobolev V.P. Blind mud volcanoes. Geology and minerals of the World Ocean. 2020. Vol. 16. No. 2(60). pp. 49–65. DOI: 10.15407/gpimo2020.02.049. (In Russ)

12. Shnyukov E.F., Netrebskaya E.Ya. Deep geological structure of mud volcanoes of the Black Sea. Geology and minerals of the World Ocean. 2014. No. 2(36). pp. 66–79. (In Russ)

13. Shnyukov E.F., Netrebskaya E.Ya. On the deep structure of the eruptive channel of mud volcanoes. Geology and minerals of the World Ocean. 2016. No. 4(46). pp. 54–66. (In Russ)

14. Yakubov A.A., Grigoryants B.V., Aliev A.A. Mud volcanism of the Soviet Union and its relation to oil production. Baku. ELM. 1980. 62 p. (In Russ)

15. Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Sysolin A.I., Rybin

A.A., Andreeva N.V. Model of the deep structure of the Elbrus volcano in the light of new geophysical data. *Doklady Earth Sciences*. 2018. Vol. 480. No. 1. pp. 642–645. DOI: 10.1134/S1028334X18050136.

16. Jones M.W., Peters G.P., Gasser T., Andrew R. M., Schwingshackl C., Gütschow J., Houghton R.A., Friedlingstein P., Pongratz J., Quéré C.L. National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. *Scientific Data*. 2023. Vol. 10. No. 155. DOI: 10.1038/s41597-023-02041-1.

17. Korzhenkov A.M., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S., Kashitsyna O. Yu. Natural geohazards in the Taman peninsula. *Doklady Earth Sciences*. 2024. Vol. 519. (Suppl 1). pp. 239–261. DOI: 10.1134/S1028334X2460470X.

18. Lavrushin V.Y., Aydarkozhina A.S., Sokol E.V., Chelnokov G.A., Petrov O.L. Mud volcanic fluids of the Kerch–Taman Region: geochemical reconstructions and regional trends: Communication 2. Genesis of Mud Volcanic Gases and Regional Geochemical Trends. *Lithology and Mineral Resources*. 2022. Vol. 57. No. 1. pp. 1–24. DOI: 10.1134/S0024490222010059.

19. Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: An updated review. *Earth Science Reviews*. 2017. Vol. 168. pp. 81–112. DOI: 10.1016/J.EARSCIREV.2017.03.001.

20. Mazzini A., Sciarra A., Etiope G., Adavarte P., Houweling S., Pandey S., Husein A. Relevant methane emission to the atmosphere from a geological gas manifestation. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. No. 4138. DOI: 10.1038/s41598-021-83369-9.

21. Popov D.V., Danilov K.B., Zhostkov R.A., Dudarov Z.I., Ivanova E.V. Processing the digital microseism recordings using the Data Analysis Kit (DAK) software package. *Seismic instruments*. 2014. Vol. 50. No. 1. pp. 75–83. DOI: 10.3103/S074792391401006X.

22. Presnov D.A., Zhostkov R.A., Likhodeev D.V., Beloborodov D.E., Dudarov Z.I., Dolov S.M. New evidence for the deep structure of the Dzhau-Tepe mud volcano. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2020. Vol. 14. No. 3. pp. 166–176.

23. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Y., Kharazova Y.V., Sysolin A.I., Andreeva N.V., Pogrebchenko V.V., Chervinchuk S.Y., Chen J., Liu J., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S. Deep structure of the northwestern termination of the Caucasus from new geological and geophysical data. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*. 2020. Vol. 56. pp. 772–788. DOI: 10.1134/S1069351320060075.

24. Shnyukov E., Yanko-Hombach V. Mud volcanoes of the Black sea region and their environmental significance. Springer. 2020. 512 p. DOI: 10.1007/978-3-030-40316-4.

25. Skrypitsyna T.N., Florinsky I.V., Beloborodov D.E., Gaydalenok O.V. Mud volcanism at the Taman peninsula: multiscale analysis of remote sensing and morphometric data. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 22. Art. No. 3763. DOI: 10.3390/rs12223763.