

УДК 550.385.3, 550.343

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-53-59

О ДИЛАТАНСКИХ ОБРАЗОВАНИЯХ, УЧАСТВУЮЩИХ В ФОРМИРОВАНИИ КОРНЕВЫХ СТРУКТУР И ВЫВОДЯЩИХ КАНАЛОВ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ*

© 2015 г. Л.Е. Собисевич, А.Л. Собисевич, Х.Д. Канониди, К.Х. Канониди, Д.В. Лиходеев, Д.А. Преснов

Собисевич Леонид Евгеньевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, г. Москва, 123995, e-mail: sobis@ifz.ru

Собисевич Алексей Леонидович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, г. Москва, 123995, e-mail: alex@ifz.ru

Канониди Харлампий Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, заведующий сектором магнитно-ионосферных взаимодействий, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк, Московская обл., 142190, e-mail: kanonidi@izmiran.ru

Канониди Константин Харлампиевич – старший научный сотрудник, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк, Московская обл., 142190, e-mail: kkkh@izmiran.ru

Лиходеев Дмитрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, г. Москва, 123995, e-mail: dmitry@ifz.ru

Преснов Дмитрий Александрович – ведущий инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, г. Москва, 123995, e-mail: presnov@ifz.ru

Sobisevich Leonid Evgen'evich – Doctor of Technical Science, Main Researcher, Schmidt Institute of Physics of Earth RAS, Bolshaya Gruzinskaya St., 10, Moscow, 123995, Russia, e-mail: sobis@ifz.ru

Sobisevich Aleksei Leonidovich – Doctor of Physical and Mathematical Science, Head of the Laboratory, Schmidt Institute of Physics of Earth RAS, Bolshaya Gruzinskaya St., 10, Moscow, 123995, Russia, e-mail: alex@ifz.ru

Kanonidi Kharlampii Dmitrievich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Head of Sector of Magnetic-Ionospheric Interactions, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Moscow Region, 142190, Russia, e-mail: kanonidi@izmiran.ru

Kanonidi Konstantin Kharlampievich – Senior Researcher, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Moscow Region, 142190, Russia, e-mail: kkkh@izmiran.ru

Likhodeev Dmitrii Vladimirovich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Researcher, Schmidt Institute of Physics of Earth RAS, Bolshaya Gruzinskaya St., 10, Moscow, 123995, Russia, e-mail: dmitry@ifz.ru

Presnov Dmitrii Aleksandrovich – Leading Engineer, Schmidt Institute of Physics of Earth RAS, Bolshaya Gruzinskaya St., 10, Moscow, 123995, Russia, e-mail: presnov@ifz.ru

Развиваются новые подходы к анализу некоторых геолого-геофизических структур дилатансного типа, которые обнаружены нами в теле вулканической постройки грязевых вулканов. Показано, что на всех этапах существования эти структуры определяют в конечном итоге степень и масштабы активности вулкана. Получены новые экспериментальные данные, подтверждающие важную роль дилатансных процессов в «жизни» грязевулканических образований.

Ключевые слова: дилатансные образования, грязевые вулканы, грязебрекчии, извержение вулкана.

In this paper new approaches to the analysis of specific geological structures of dilatational type inside a mud volcanic edifice are developed. It is shown that at all stages of existence those structures control the level and scale of activity of a mud volcano. The new experimental data confirming an important role the processes of dilatancy in the «life-cycle» of mud-volcanic processes are obtained.

Keywords: dilatancy education, mud volcano, mud breccias, eruption.

Грязевые вулканы представляют собой известное явление в геологии, механизмы которого до сих пор не получили всестороннего объяснения. На планете насчитывается более 1700 надводных и подводных грязевулканических построек. Извержения начинаются с взрыва газов в кратере, разрушения кратерной пробки и поступления на поверхность потоков полужидких грязебрекчий. Одновременно из жерла выбра-

сываются твердые обломки и глыбы пород, нередко происходит самовозгорание углеводородных газов. Массы грязебрекчий, содержащих большие количества воды, иногда с примесями нефти, сероводорода и рассеянных сульфидов, растекаясь по поверхности вулканической постройки, надстраивают старый вулканический конус. Примером такого извержения является событие, связанное с извержением вулкана

* Работа выполнена при финансовой поддержке программы № 18 фундаментальных исследований Президиума РАН.

горы Карабетова (Керченско-Таманская грязевулканическая провинция) в 2001 г. Очевидцы отмечали, что пламя во время взрыва вулкана поднялось на большую высоту, и было видно далеко за пределами Тамани в г. Новороссийске [1].

Извержение грязевого вулкана, как правило, длится несколько дней, сопровождается слабыми сейсмическими событиями и подземным гулом. В ряде случаев оно распадается на отдельные фазы, в течение которых преобладают то одни, то другие продукты грязевулканической деятельности. Затем вулкан затихает. Затишье может продолжаться многие годы. В этот период на кратерной площадке грязевого вулкана появляются многочисленные сальзы и грифоны, непрерывно поставляющие на поверхность жидкую грязь, газ, воду, в которой появляются нефтяные пленки. Здесь у каждого источника, пробивающегося на поверхность, отлагается масса плотных глинистых корок, которые, нарастаясь, превращаются в миниатюрное подобие вулканических построек настоящих вулканов. С подобными явлениями мы встречались на вулкане Шуго, который может быть отнесен к наиболее представительным геологическим образованиям этого типа в Керченско-Таманской грязевулканической провинции [2, 3].

Систему грязевулканических камер, вертикальных и наклонных выводящих каналов, по которым на поверхность поступает масса грязебрекчий разной консистенции, воды, жидких и газообразных углеводородов, в геологической литературе принято называть корнями грязевых вулканов. В настоящей статье под корневой структурой грязевого вулкана мы понимаем область, соответствующую основной грязевулканической камере и очагу. Выше лежат структуры, именуемые нами как выводящие каналы. Глубины, на которые проникают корни грязевых вулканов, определялись несколькими независимыми методами [4, 5].

Изучая грязевой вулканизм, необходимо принимать во внимание, что грязевулканические провинции, в пределах которых наблюдается значительное число действующих грязевых вулканов, расположены в зонах повышенной сейсмической опасности. Здесь в результате развития тектонических процессов возникают области высокой концентрации напряжений. Они в свою очередь вызывают значительные реологические изменения в геологической среде отдельного региона и формируют структуры дилатансного типа, которые ответственны за генерацию физических полей (сейсмических, деформационных и др.) [5].

Согласно современным представлениям, извержения грязевых вулканов могут быть инициированы местными сейсмическими событиями [6]. Однако спусковым механизмом момента начала извержения выступают и другие природные процессы, протекающие в различных геосферах [7].

Но как объяснить появление избыточного давления углеводородных газов, сконцентрированных в

недрах? Сегодня существует несколько гипотез, проясняющих эту проблему. Каждая из них имеет право на существование [8, 9]. Мы не будем на них останавливаться, отсылая читателя к цитируемой литературе, а обратим внимание на другую сторону проблемы и выясним, как формируются и развиваются корневые структуры и выводящие каналы грязевого вулкана.

Е.А. Рогожин из Института физики Земли РАН в одной из своих лекций «Проявление грязевого вулканизма в зонах интенсивных сотрясений сильнейших землетрясений», прочитанной на геологическом факультете МГУ в 2005 г., показал, что ряд землетрясений с магнитудами $M \geq 7$ продемонстрировали особый тип вторичных сейсмодислокаций на поверхности Земли: разжижения, грифоны, грязевые вулканы. Эти аномальные эффекты были изучены в зонах Нью-Мадридских землетрясений, 1811, 1812 ($M = 8,2-8,3$) в США; Зайсанского землетрясения на Алтае, 1990 ($M = 7,0$); Нефтегорского землетрясения на Северном Сахалине, 1995 ($M = 7,6$); Алтайского землетрясения, 2003 ($M = 7,3$) и в некоторых зонах потенциальных очагов сильнейших землетрясений на Центральном Кавказе. Во всех случаях наиболее универсальным механизмом развития изменений в корневых структурах грязевых вулканов является разномасштабная трансформация геологических структур [5, 7]. Начальную стадию раскрытия трещин в геологической среде грязевулканической постройки и последующие геологические трансформации корневых структур и выводящих каналов связывают с состоянием дилатансии [10].

Отметим, что процессы дилатансии были проанализированы еще в середине XX в. В.Н. Николаевским [10]. Он показал, что дилатансия – это нелинейное разуплотнение геологической среды за счет протекания ряда геолого-геохимических процессов, образования трещин сдвига или каких-либо других трансформаций.

Характеризуя этот процесс, А.С. Алексеев относит к области дилатансии все множество точек упругой или пластичной геологической среды, для которых при заданном поле напряжений $\sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$ в рассматриваемой области выполнено условие (для упругого D полупространства при $z > 0$, которым мы моделируем глинистую толщу в корневых структурах грязевых вулканов).

$$D_{\tau} \equiv \tau - \alpha(P + \rho gz) - Y \geq 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность пород; g – ускорение свободного падения; z – глубина точки приложения силы; P – геостатическое давление $P = -(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$; α – коэффициент внутреннего трения; Y – сцепление породы; τ – интенсивность касательных напряжений

$$\tau = \frac{\sqrt{3}}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)]^{\frac{1}{2}}.$$

Условие (1) совпадает с критерием Шлейхера – Надаи разрушения материала под действием касательных нагрузок. На примере математической модели дилатантной структуры, развивающейся в изотропно-упругом полупространстве, был показан сложный характер зарождения зон дилатансии. Такие численные эксперименты впервые провели ученики А.С. Алексеева, В.Е. Петренко и А.С. Белоносов (эти данные были любезно предоставлены нам академиком Анатолием Семеновичем Алексеевым). Результаты представлены ниже для случая, когда в некоторой области сплошной геологической среды действует под некоторым углом к свободной поверхности сосредоточенная сила.

Обращаясь к данным численных экспериментов [7, 11], можно заметить, что дилатансия проявляется уже в

случаях, когда источником тектонических напряжений является единичная сосредоточенная сила F (рис. 1).

На рис. 1 изображена граница области $D_\tau = 0$ для единичной силы. Параметры упругого полупространства здесь были следующие: $v_p = 6000$ м/с; $v_s = v_p / \sqrt{3}$; $\lambda = \mu = \rho v_s^2 = 3,48 \cdot 10^{10}$ Па; $\rho = 2900$ кг/м³; $g = 9,8$ м/с²; $Y = 310$ Па; $\alpha = 0,5$; $F = 5 \cdot 10^{16}$ Н. Внутри области $D_\tau \geq 0$ касательные напряжения доминируют над сжимающими напряжениями. Сопротивление среды касательным усилиям за счет сцепления здесь преодолено, и сложились условия, благоприятные для роста числа трещин, которые заполняются флюидом.

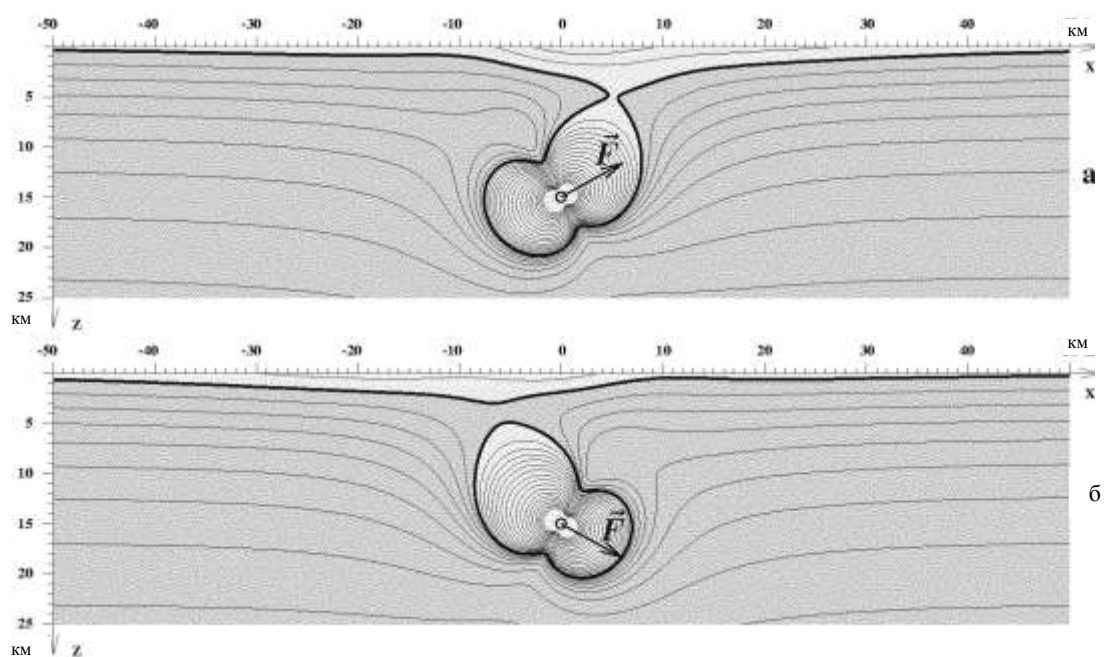


Рис. 1. Формы областей дилатансии на поверхности и вблизи источника в сечении $y = 0$. Источник расположен на глубине $h = 15$ км. Сила $\vec{F} = F \cdot \vec{n}$, $\vec{n} = (\cos(\alpha), 0, \sin(\alpha))$, $F = 5 \cdot 10^{16}$ Н. Расчёт выполнен для двух вариантов направления действия силы: а – $\alpha = -30^\circ$; б – $\alpha = +30^\circ$ [11]. Образовавшийся в первом случае выводящий канал при изменении направления силы в районе расположения очага замкнулся, перекрыв поступление флюидов в район пограничного слоя дилатансии

Интересным фактом оказывается образование двух зон дилатансии: очаговой, в окрестности точки приложения силы, соответствующей очагу грязевого вулкана, и пограничной – в слое около свободной поверхности, где формируется система выводящих каналов, образующаяся в процессе деятельности грязевого вулкана. Такие структуры наблюдались на всех исследованных нами вулканах в Керченско-Таманской грязевулканической провинции. В результате образуются кратерные площадки грязевых вулканов, которые обычно

осложнены многочисленными сальзами и грифонами – миниатюрными подобиями материнской грязевулканической постройки (рис. 2). Они постоянно выделяют воду, жидкую грязь, газовые пузыри и пленки нефти.

Понятие пограничного слоя дилатансии, открытое А.С. Алексеевым, сегодня становится определяющим в проблеме построения модели как грязевого вулкана, так и других сложнопостроенных структур геологической среды, включая и зоны подготовки сейсмических событий [5].



Рис. 2. Вулкан горы Гнилой (Керченско-Таманская грязевулканическая провинция)

В процессе проведения экспедиционных работ в Керченско-Таманской грязевулканической провинции нам удалось впервые зафиксировать на грязевом вулкане Шуго аппаратурными методами геофизический процесс, связанный с кратковременным прекращением функционирования (закупоркой) питающей системы вулкана (рис. 3). Объяснение подобных эпизодов в деятельности грязевулканических камер и выводящих каналов следует искать в кратковременном изменении пластового давления в грязевулканическом очаге. В рассматриваемом случае, скорее всего, имела место закупорка основного выводящего канала, соединяющего корневые структуры вулкана с разуплотнением геологической среды в области пограничного слоя дилатансии. Это и привело к прекращению деятельности сразу всех сопков и грифонов вулкана. Затем последовало повышение давления флюидов непосредственно в очаге и, как следствие, в корневых дилатантных структурах, которое изменило строение дилатантных зон в теле вулканической постройки, обеспечившее открытие выводных каналов. Именно флюктуации высокого давления в корневых структурах вулкана Шуго и явились, по нашему мнению, тем пусковым механизмом, который открывал и закрывал пути поступления флюидов в основной питающий канал.

Обнаруженное экспериментально геологическое явление четко отражено на сейсмических записях. В момент прекращения функционирования вулкана наблюдается резкое уменьшение уровня сейсмических шумов, которые снижаются до фонового уровня. Эксперимент свидетельствует в пользу того, что основная причина запираения – быстрая перестройка дилатантных структур, обусловленная протекающими тектоническими процессами в разломных структурах, к которым приурочена вулканическая постройка.

Процесс установления фоновых уровней сейсмических и акустических шумов, свойственных данному периоду развития грязевого вулкана, происходит довольно быстро: в течение 10–12 мин. Скорее всего, за этот промежуток времени в камере и выводящих каналах режим течения грязебрекчии стабилизируется на прежнем уровне, который может быть охарактеризован как своего рода релаксационные автоколебания. Проведенные измерения подтверждают их наличие. Каждая фаза этих колебаний состоит из релаксационных (затухающих) движений, которые в камере и выводящих каналах грязевого вулкана, рассматриваемого как волновод, по характеру ближе к волновым движениям.

Помимо этого, на полученных записях удается наблюдать четкие низкочастотные волновые формы. Если выразиться образно, то вся разломно-блоковая структура грязевого вулкана напоминает большой природный «орган», через резонансные «трубы» – выводящие каналы разного масштаба – которого прокачиваются флюиды, увлекающие грязебрекчию. В духовых музыкальных инструментах акустические волны, как правило, являются стоячими. Однако в обоих случаях режим автоколебаний существенно связан с особыми свойствами вещества, извергаемого грязевыми вулканами. В «органной трубе» особым свойством обладают вихревые структуры на языке свистка. В волноводе особыми являются свойства самого вещества волновода и структура «стенок» условного волновода. Именно эти свойства превращают имеющиеся место горизонтальные и вертикальные движения геофизической среды в сложные автоколебания, которые порождают наблюдаемые в эксперименте волновые формы.

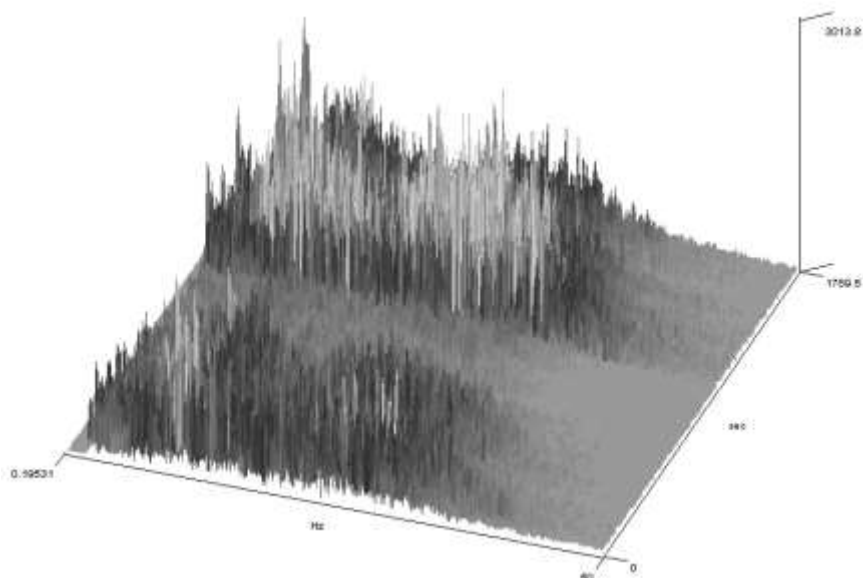


Рис. 3. Изменение спектра в диапазоне 1–30 Гц на этапе вулканического затишья. Резонансный отклик дилатантных структур максимальный в диапазоне 8–12 Гц

Приведенные выше данные позволяют по-новому взглянуть на глубинное строение грязевого вулкана Шуго, полученное нами в результате проведения полевых экспериментов (рис. 4). Здесь отчетливо удается проследить за изменением структуры дилатантных образований в теле вулканической постройки вплоть до глубин 25 км.

Проведенные численные эксперименты и данные натурных наблюдений, полученные на вулканах в Керченско-Таманской грязевулканической провинции, позволили сделать следующие выводы [5, 12, 13]:

1. Когда в районе грязевулканической постройки геофизическая среда имеет «нормальное» строение (жесткость слоев, лежащих выше области корневых структур Ω , возрастает с глубиной), в приповерхностном слое, при интенсивном нагружении, всегда имеет место пограничный слой дилатансии.

2. Когда грязевулканическая постройка характеризуется «аномальным» строением (один из слоев, лежащих выше дилатантной структуры, более жесткий, чем расположенный ниже), характер распределения напряжений и смещений значительно сложнее. При достаточной контрастности жесткостей и толщине более жесткого слоя появляется ситуация частичного или полного экранирования, характеризуемая отсутствием в приповерхностных слоях выраженного пограничного слоя дилатансии, вулкан запирается и замирает.

В «мягком» поверхностном слое при такой структуре также наблюдается аналогичный эффект, но он имеет локализованный характер (локализован вблизи границ раздела слоев) и значительно менее выражен, чем в структуре «нормального» строения.

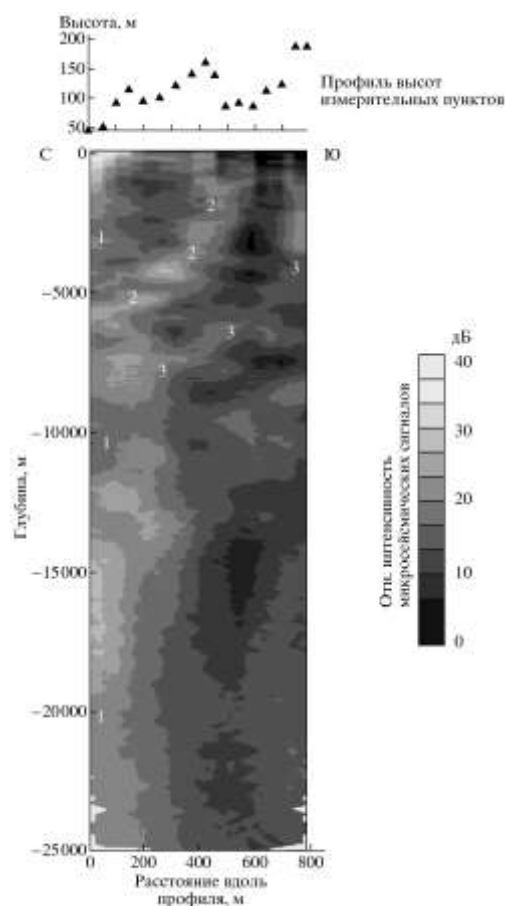


Рис. 4. Разрез по контрастам сейсмических скоростей вдоль профиля, проходящего через грязевой вулкан Шуго. Увеличение относительной интенсивности реакции среды соответствует уменьшению сейсмических скоростей, и наоборот; зоны пониженных скоростей, ассоциируемые с разломами: 1 – Ахтырским; 2 – вулкана Шуго; 3 – Гладковским [14]

При достаточной интенсивности нагружения уровень этих напряжений может достичь критического и привести к появлению достаточно локализованного не пограничного, а заглубленного слоя дилатансии. Следует отметить, что последний имеет существенно меньшую протяженность, чем поверхностный. При наличии внутреннего слоя с меньшей жесткостью, чем выше- и нижележащие, в нем также могут возникать системы усилий, по характеру и интенсивности аналогичные поверхностному пограничному слою дилатансии. Наличие такой ситуации можно связать с появлением промежуточной (приповерхностной) грязевулканической камеры.

Поскольку с зонами дилатансного типа естественно связывать и области вариаций различных геофизических полей [5], то для исследования источников этих вариаций возможно использование современных аппаратных методов в процессе проведения полевых экспериментов непосредственно на грязевых вулканах.

Литература

1. *Войтов Г.И., Микадзе Э.И., Пузич И.Н.* О генерации органических структур нефтяного ряда в свете механо-химической модели синтеза в сейсмических процессах // *Геохимия*. 2005. № 6. С. 661–672.
2. *Глинский Б.М., Собисевич А.Л., Хайретдинов М.С.* Опыт активного мониторинга сложно построенных геологических структур (на примере грязевого вулкана Шуго) // *Докл. РАН (Науки о Земле)*. 2007. Т. 413, № 3. С. 398–402.
3. *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.
4. *Руденко О.В., Собисевич А.Л., Ратнер С.В.* Модель непрерывного истечения газосодержащей жидкости из полости через канал // *Вестн. Южн. науч. центра РАН*. 2009. Т. 5, № 2. С. 5 – 10.
5. *Собисевич А.Л.* Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. М., 2012. 510 с.
6. *Lupi M., Saenger E., Fuchs F., Miller S.* Lusi mud eruption triggered by geometric focusing of seismic waves // *Nat. Geosci.* 2013. Vol. 6(8). P. 642–646.
7. *Собисевич А.Л.* Мониторинг слоистых неоднородных сред. М., 2001. 354 с.
8. *Холодов В.Н.* О роли песчаного диапиризма в трактовке грязевых вулканов // *Литология и полезные ископаемые*. 1987. № 4. С. 12–27.
9. *Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И., Науменко П.И., Кутний В.А.* Грязевые вулканы Керченско-Таманской области: атлас. Киев, 1986. 152 с.
10. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика (с приложениями к проблемам газовых и нефтяных пластов). М., 1996. 448 с.
11. *Алексеев А.С., Глинский Б.М., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Маништейн А.К., Селезнев В.С., Сердюков С.В., Соловьев В.М., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Юшин В.И.* Новые геотехнологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер. М., 2002. 475 с.
12. *Ляпин А.А., Собисевич А.Л.* Об особенностях формирования пограничного слоя дилатансии в многослойном полупространстве с заглубленной полостью // *Докл. РАН*. 2000. Т. 372, № 2. С. 243–247.
13. *Лаверов Н.П., Добрецов Н.Л., Богатииков О.А., Бондур В.Г., Гурбанов А.Г., Карамурзов Б.С., Коваленко В.И., Мелекесцев И.В., Нечаев Ю.В., Пономарёва В.В., Рогожин Е.А., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Федотов С.А., Хренов А.П., Ярмолюк В.В.* Новейший и современный вулканизм на территории России / отв ред. Н.П. Лаверов. М., 2005. 450 с.
14. *Горбатиков А.В., Собисевич А.Л., Овсяченко А.Н.* Развитие модели глубинного строения Ахтырской флексуно-разрывной зоны и грязевого вулкана Шуго // *Докл. РАН (Геофизика)*. 2008. Т. 421, № 5. С. 670 – 674.

References

1. *Voitov G.I., Mikadze E.I., Puzich I.N.* O generatsii organicheskikh struktur neftyanogo ryada v svete mekhanokhimicheskoi modeli sinteza v seismicheskikh protsessakh [Generation of organic structures in light of a number of oil mechano-chemical synthesis model in seismic processes]. *Geokhimiya*, 2005, no 6, pp. 661-672.
2. *Glinkii B.M., Sobisevich A.L., Khairtdinov M.S.* Opyt aktivnogo monitoringa slozhno postroennykh geologicheskikh struktur (na primere gryazevogo vulkana Shugo) [Experience of active monitoring difficult geological structures constructed (for example, a mud volcano Shugo)]. *Dokl. RAN (Nauki o Zemle)*, 2007, vol. 413, no 3, pp. 398-402.
3. *Glinkii B.M., Sobisevich A.L., Fat'yanov A.G., Khairtdinov M.S.* Matematicheskoe modelirovanie i eksperimental'nye issledovaniya gryazevogo vulkana Shugo [Mathematical modeling and experimental studies of the mud volcano Shugo]. *Vulkanologiya i seismologiya*, 2008, vol. 2, no 5, pp. 69-77.
4. *Rudenko O.V., Sobisevich A.L., Ratner S.V.* Model' nepreryvnogo istecheniya gazosoderzhazhshchei zhidkosti iz polosti cherez kanal [Model of continuous expiration of the gas-containing fluid from the cavity through the channel]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN*, 2009, vol. 5, no 2, pp. 5-10.
5. *Sobisevich A.L.* Izbrannye zadachi matematicheskoi geofiziki, vulkanologii i geoekologii [Selected problems of mathematical geophysics, volcanology and geoecology]. Moscow, 2012, 510 p.
6. *Lupi M., Saenger E. H., Fuchs F., Miller S. A.* Lusi mud eruption triggered by geometric focusing of seismic waves. *Nat. Geosci.*, 2013, vol. 6(8), pp. 642-646.
7. *Sobisevich A.L.* Monitoring sloistykh neodnorodnykh sred [Monitoring layered inhomogeneous media]. Moscow, 2001, 354 p.
8. *Kholodov V.N.* O roli peschanogo diapirizma v traktovke genezisa gryazevykh vulkanov [On the role of sandy diapirism in the interpretation of the genesis of mud volcanoes]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1987, no 4, pp. 12-27.
9. *Shnyukov E.F., Sobolevskii Yu.V., Gnatenko G.I., Nauhenko P.I., Kutnii V.A.* Gryazevye vulkany Kerchensko-Tamanskoi oblasti [Mud volcanoes of the Kerch-Taman Region]: atlas. Kiev, 1986, 152 p.

10. Nikolaevskii V.N. *Geomekhanika i flyuidodinamika (s prilozheniyami k problemam gazovykh i neftyanykh plastov)* [Geomechanics and fluid dynamics (with applications to the problems of oil and gas reservoirs)]. Moscow, 1996, 448 p.
11. Alekseev A.S., Glinskii B.M., Emanov A.F., Kashun V.N., Kovalevskii V.V., Manshtein A.K., Seleznev V.S., Serdyukov S.V., Solov'ev V.M., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Khairtudinov M.S., Chichinin I.S., Yushin V.I. *Novye geotekhnologii i kompleksnye geofizicheskie metody izucheniya vnutrennei struktury i dinamiki geosfer* [New geotechnology and integrated geophysical methods for studying the internal structure and dynamics of geosphere]. Moscow, 2002, 475 p.
12. Lyapin A.A., Sobisevich A.L. Ob osobennostyakh formirovaniya pogrannichnogo sloya dilatatsii v mnogosloinnoy poluprostranstve s zaglublennoy polost'yu [On peculiarities of the formation of the boundary layer in a multi-dilatancy half a recessed cavity]. *Dokl. RAN*, 2000, vol. 372, no 2, pp. 243-247.
13. Laverov I.P., Dobretsov N.L., Bogatnikov O.A., Bondur V.G., Gurbanov A.G., Karamurзов B.S., Kovalenko V.I., Melekestsev I.V., Nechaev Yu.V., Ponomareva V.V., Rogozhin E.A., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Fedotov S.A., Khrenov A.P., Yarmolyuk V.V. *Noveishii i sovremennyyi vulkanizm na territorii Rossii* [The newest and modern volcanism in Russia]. Ed. N.P. Laverov. Moscow, 2005, 450 p.
14. Gorbatikov A.V., Sobisevich A.L., Ovsyuchenko A.N. *Razvitie modeli glubinnogo stroeniya Akhtyrskoi fleksurno-razryvnoi zony i gryazevogo vulkana Shugo* [Development of a model of deep structure Akhtyr flexure-tensile zone and mud volcano Shugo]. *Dokl. RAN (Geofizika)*, 2008, vol. 421, no 5, pp. 670-674.

Поступила в редакцию

24 марта 2015 г.