

УДК 551.311.8

ДИЛАТАНСИЯ И ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОРНЕВЫХ СТРУКТУР И ВЫВОДЯЩИХ КАНАЛОВ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ ТАМАНСКО-КРЫМСКОЙ ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ

© А.Л. Собисевич

Объединенный институт физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва

Систему грязевулканических камер, вертикальных та похилих вивідних каналів підводних і надводних грязевых вулканів, по яким на поверхню потрапляє маса грязебрекчій різної консистенції, води, рідких та газоподібних вуглеводнів, газів та ін. компонентів в геологічній літературі прийнято називати коріннями грязевых вулканів. Глибини, на які проникають коріння, визначалися декількома незалежними методами. У статті на прикладі одного з самих виразних грязевых вулканів Тамансько-Кримської грязевулканичної провінції вулкана Шуго аналізуються особливості грязевулканичних структур і сейсмічними методами визначаються ділатансні особливості грязевулканичних камер і вивідних каналів.

Систему грязевулканических камер, вертикальных и наклонных выводящих каналов подводных и надводных грязевых вулканов, по которым на поверхность поступает масса грязебрекчий разной консистенции, воды, жидких и газообразных углеводородов, газов и др. компонентов в геологической литературе принято называть корнями грязевых вулканов. Глубины, на которые проникают корни, определялись несколькими независимыми методами. В статье на примере одного из самых выразительных грязевых вулканов Таманско-Крымской грязевулканической провинции вулкана Шуго анализируются особенности грязевулканических структур и сейсмическими методами определяются дилатансные особенности грязевулканических камер и выводящих каналов.

The system of mud-volcanic chambers, vertical and slanting effluent channels of underwater/above-water mud volcanoes, that bring out into the open some of different consistence mud, water or gas hydrocarbon or other components are named mud volcanoes roots. The depth that roots penetrate was defined by some independent methods. This paper deals with characteristics of mud volcano structures (Volcano Shugo as an example). Dilatancy features of mud volcano chambers and effluent channels are determined by seismic methods.

С помощью сейсмического профилирования глубина проникновения корней грязевых вулканов была установлена в западной Туркмении и в Южно-Каспийской впадине. В первом районе, по данным А.М. Сунгурова, она оказалась равной 5-7 км, во втором районе Л.С.Кулакова и Л.Н.Лебедев обнаружили их на глубине 9 км. Полагают, что в некоторых исключительных случаях глубина корневых структур может достигать 20 км и более.

Во всех случаях глубины обуславливаются зачастую мощностью осадочного чехла, величина которой колеблется в широких пределах. Так в приведенных выше примерах она изменялась в диапазоне 14–20 км. В этой связи сегодня есть все основания утверждать, что корневая система грязевых вулканов не выходит за пределы стратисферы - осадочной и вулканогенно-осадочной оболочки Земли. Этого мнения придерживается известный российский геолог В.Н. Холодов из Геологического института РАН [1].

Следующая особенность, которую необходимо принимать во внимание, связывается нами с тем, что грязевулканические провинции, в пределах которых наблюдается значительное число действующих грязевых вулканов, расположены в зонах повышенной сейсмической опасности. Здесь в результате развития разномасштабных тектонических взаимодействий, связанных с движением отдельных разломно-блоковых структур, возникают области высокой концентрации напряжений. Концентрация напряжений в свою очередь вызывает значительные реологические изменения в среде и формирует «аномальные» зоны, в которых наблюдается генерация физических полей. Практика показывает, что именно эти поля зачастую являются предвестниками геофизических катастроф различного масштаба и силы. И здесь грязевые вулканы выступают в качестве первичных индикаторов различного рода

сейсмических событий как в пределах грязевулканической провинции, так и на близлежащих территориях.

Активизацией сейсмических событий в регионе можно объяснить и тот факт, что крупные извержения грязевых вулканов постоянно чередуются с периодами относительного покоя. Так, например, вулкан Джау-Тепе (Керченский полуостров) с 1864 по 1942 гг. извергался 7 раз. Вулкан Туорогай (Азербайджан) с 1841 по 1950 гг. извергался 6 раз. На этом фоне выделяется вулкан Шуго, на котором в течение XX столетия зафиксировано только 2 крупных извержения.

Ниже будет показано, что извержение вулкана горы Карabetова (Таманская грязевулканическая провинция) было, скорее всего, инициировано местным сейсмическим событием. Спусковым механизмом момента начала извержения могут выступать и другие природные процессы, протекающие в различных геосферах. Здесь важно только понимать, что причиной самого извержения является высокое избыточное давление, возникающее в корневых структурах и обуславливающее прорыв грязебрекчий на поверхность через эруптивные каналы грязевых вулканов. Но как объяснить появление этого избыточного давления углеводородных газов, сконцентрированных в недрах. Известно несколько гипотез, проясняющих эту проблему. Каждая из них имеет право на существование [1]. Здесь мы не будем на них останавливаться, а обратим внимание на другую сторону проблемы и выясним, как формируются и развиваются в процессе жизни грязевулканического образования его корневые структуры и выводящие каналы.

По нашему мнению наиболее универсальным механизмом развития изменений в корневых структурах грязевых вулканов является раскрытие трещин в зонах повышенных значений сдвиговых и растягивающих напряжений, сопровождающихся инфразвуковыми явлениями [2].

Начальную стадию раскрытия трещин в геологической среде грязевулканической постройки и последующее состояние корневых структур и выводящих каналов, при котором развиваются процессы локального разрушения в некотором объеме, большинство сейсмологов связывают с состоянием дилатансии [3].

Согласно данным [1] избыточные давления флюидов в мощных толщах глин, залегающих в районах грязевого вулканизма, формируются главным образом за счет фазового преобразования глинистых минералов в области высоких температур (и давлений) и, в первую очередь, за счет иллитизации смектита.

В схеме [1] соавторами этот процесс представлен рис. 1. Здесь в верхней части «приведен макет образования (перестройки) зоны разуплотнения и сверхвысоких поровых давлений (СВПД) в глинах, составляющих основу фундамента грязевулканической постройки. Мощный пласт преимущественно смектитовой глины опускается в глубь осадочно-породного элизионного бассейна, последовательно занимая положение А, Б, В и Г по отношению к той зоне критических температур и давлений, ниже которой смектитовая фаза существовать не может.

В более детальном масштабе процесс, что реализуется в глинах при фазовых превращениях глинистых минералов, представлен в левой части графика. Здесь можно видеть как блоки смектитовой глины (1,2,3,4) при погружении превращаются в иллитовые (1,2,3,4), уменьшаясь в объеме и выделяя кристаллизационную воду в зоне критических температур и давлений. В результате этого процесса, вблизи от границы иллитизации закладывается дилатансионная зона разуплотнения глин – это пласт, в котором иллитовые блоки взвешены в выделившейся, кристаллизационной воде».

Глубже новообразованные блоки иллита сближаются между собой под действием возросшего геостатического давления, и вся поровая вода отжимается вверх, в зону разуплотнения. В результате иллитовая глина уплотняется, а над ней возрастает поровое давление жидкости - в зоне разуплотнения глин образуется область СВПД. В нашей трактовке - это область дилатансии.

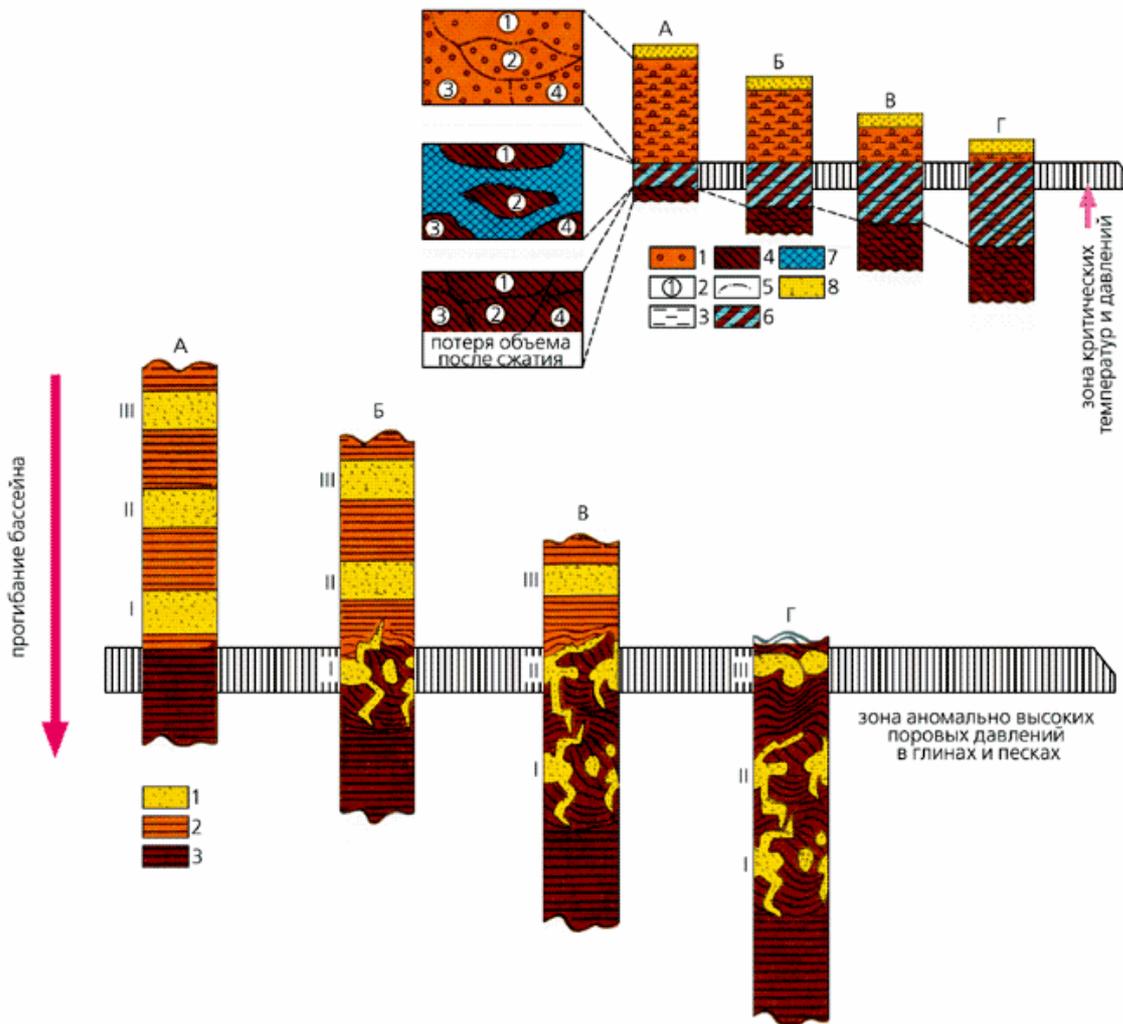


Рис. 1. Принципиальна схема формування зони сверх високих порових давлень (СВПД) и текстур песчаного диапиризма [4].

а - модель формування СВПД и зони разуплотнення в смектитових глинах:

1 - смектитовая глина; 2 – иллитовая глина; 3 - кристаллизационная вода в порах зони разуплотнення; 4 - микроблоки глинистого материала; 5 – границы микроблоков; 6 - песчаник; 7 - глина; 8 - формирующиеся зони разуплотнення и СВПД.

б - схема образования текстур песчаного диапиризма (кластических даек и горизонтов с включениями): 1 — песчаники; 2 - глины (а - нормально залегающие, б - деформированные). I, II, III - пласты песчаников в глинах.

А, Б, В, Г - положение разреза по отношению к зоне гидрослюдизации и разуплотнения.

Мощность зони разуплотнення глин и величина пластовых давлень в ней в значительной степени зависят от мощности преобразуемой глинистой толщи и от ее положения по отношению к границе критических температур и давлень. Изначально зона дилатансии и СВПД сравнительно невелика. Но по мере того, как опускающаяся в глубь стратиферы глинистая толща все больше охватывается иллитизацией, область разуплотненных дилатансных структур становится все мощнее, а СВПД непрерывно возрастают.

Итак, сегодня можно полагать, что описанные выше процессы и порождают зони дилатансии. Напомним, что согласно современным представлениям, дилатансия – это нелинейное разуплотнение среды за счет образования трещин сдвига. К области дилатансии относят множество точек упругой или пластичной геологической среды, для которых при заданном

поле напряжений $\sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$ в розглядаємій області виконано умову (для епру-гого D напівпространства при $z > 0$, котрим ми моделюємо глинисту товщу в корневих структурах грязевих вулканів):

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

де ρ – щільність породи, g – прискорення вільного падіння, z – глибина точки, P – геостатическе тиск $P = -(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$, α – коефіцієнт внутрішнього тертя, Y – сцеплення породи, τ – інтенсивність касательних напружень,

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

Умова (1) збігається з критерієм Шлейхера-Надаї руйнування матеріала під дією скальваючих навантажень, котрий задовільно описує початок процесу руйнування гірських порід. Он приміємо і в стадії «передрушення» (при навантаженні до 60÷90 % від критическої) для якісного описання форми областей, де відбувається активізація відкриття тріщин.

На прикладі простейшої моделі грязевулканіческого утворення – спочатку однорідного, ізотропно-пругого напівпространства, слідує роботам А.С. Алексеева, представляється можливішим показати складний характер зон дилатансії. Ученими ВЦ СО РАН В.Е. Петренко і А.С. Белоносовим такі численні експерименти були проведені (ці результати були любезно надані нам академіком РАН А.С. Алексеевим),

Так якщо звернутися к рис. 2, на котром представлені результати численного моделювання силового впливу на модельну геологіческу середу, то можна помітити, що дилатансія проявляється уже в випадках, коли джерелом тектоніческих напружень являється єдинична зосереджена сила.

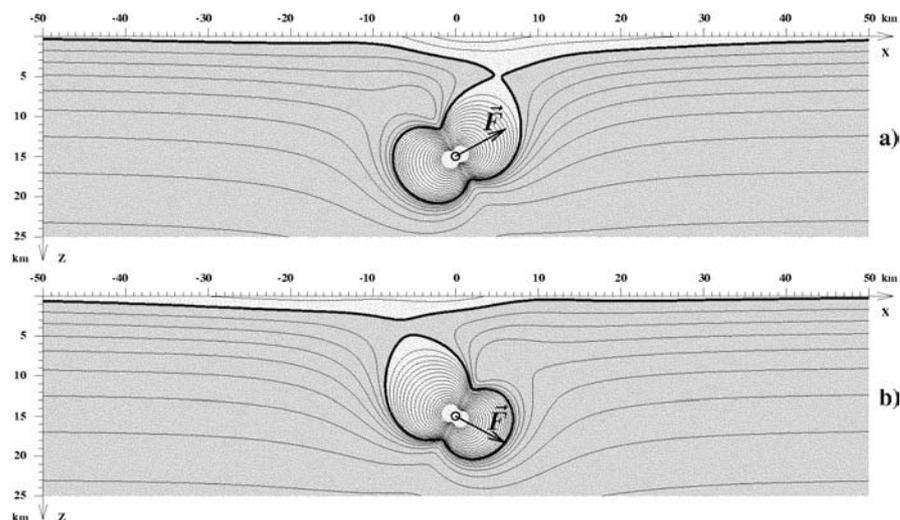


Рис. 2. Форми областей дилатансії на поверхності і вблизи джерела в сеченні $y = 0$.

Джерело розташоване на глибині $h = 15$ км. Сила $\vec{F} = F \cdot \vec{n}$, $\vec{n} = (\cos(\alpha), 0, \sin(\alpha))$, $F = 5 \cdot 10^{16}$ Н. Розрахунок виконаний для двох варіантів напрямку дії сили: а) $\alpha = -30^\circ$, б) $\alpha = +30^\circ$ [2]. Відзначимо, що утворившийся в першому випадку виводячий канал при зміні напрямку сили, в районі розташування осередка, закрився.

На рис. 2 изображена граница области $D_\tau = 0$ для единичной силы, расположенной на глубине $h = 15$ км. Параметры упругого полупространства здесь были следующими: $v_p = 6000$ м/с, $v_s = v_p / \sqrt{3}$, $\lambda = \mu = \rho v_s^2 = 3,48$ 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.

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, образующая в процессе деятельности грязевого вулкана. Здесь поле напряжений от источника может содержать сильный вклад касательных напряжений на фоне слабого влияния сжимающих напряжений и гидростатического давления в связи с близостью поверхности, свободной от внешних напряжений. Возникающие при этом зоны разуплотненных разномасштабных трещиноватых структур и составляют основу вулканического поля в объеме пограничного слоя дилатансии.

Однако, в области очага грязевого вулкана давление остается очень высоким. Об этом свидетельствуют аварии, которые имели место при разбуривании вулканической постройки. Такой случай описан А.Г. Дурмишьяном и Н.Ю. Халиловым в связи со сверхвысокими пластическими давлениями в структурах Бакинского архипелага. Здесь при бурении ряда скважин наблюдался прихват инструмента, сужение ствола скважины, выбросы труб и выпирание глинистой массы на поверхность. Так, например, бурение скважины № 42 на грязевом вулкане Дашгиль завершилось тем, что из забоя была выброшена вся колонна бурильных труб длиной в 2500 м, которая силой выброса оказалась кольцеобразно уложенной вокруг буровой вышки. Значительно чаще из забоя скважины бурильный инструмент вытеснялся пластичной глинистой массой, напоминавшей грязебрекчии дилатансного типа.

В результате описанных выше геолого-геофизических процессов образуются кратерные площадки грязевых вулканов, которые обычно осложнены многочисленными сальзами и грифонами – миниатюрными подобиями материнской грязевулканической постройки. Их внешний вид и детали строения показаны на рис. 3. Они постоянно выделяют воду, жидкую грязь, газовые пузыри и пленки нефти. Общий вид этих образований весьма экзотичен и, группируясь, они создают пустынный ландшафт.



Рис. 3. Конусообразные постройки в юго-западном секторе вулканического поля грязевого вулкана Шуго (Экспедиция 2004 г.).

В ряде случаев удается наблюдать грязевые вулканы, в которых вместо грязевулканических сооружений образуются солончаки, заболоченные участки с лужами жидкой грязи, занимающие большие площади и практически не возвышающиеся над окружающим рельефом. Примером такого вулкана является вулкан горы Горелой (рис. 4 и рис. 5). Такие структуры обычно бывают осложнены небольшими сальзами или грифонами, размеры которых не превышают нескольких метров в высоту; из них постоянно изливается жидкая грязь, вода, реже нефть



Рис. 4. Вулкан горы Гнилой. Современные грязепроявления (Экспедиция 1999 г.).



Рис. 5. Вулкан гори Гнилой. Современныe грязепроявления (Экспедиция 2000 г.).

В зависимости от параметров: h – глубины источника, F – интенсивности источника, угла ϑ – ориентации силы в источнике, величины Y – сцепления элементов среды, «пограничная» зона дилатансии ведет себя довольно изменчиво. Она может исчезать при увеличении глубины источника или соединиться с «очаговой» зоной – при увеличении интенсивности источника.

В некоторых случаях «пограничная» зона имеет горизонтальную протяженность 200 км и более, а также весьма сложную форму в проекции на поверхность Земли. Однако наиболее продуктивная зона разуплотнения в области пограничного слоя дилатансии всегда тяготеет к центральной части.

Поскольку с поверхностными зонами дилатансии естественно связывать зоны аномальных значений различных геофизических полей, то для исследования источников этих аномалий требуется, возможно, более надёжно учитывать положение и границы дилатантных зон.

Условие разуплотнения пород земной коры с учетом механизмов образования трещин путем растяжения среды может быть записано в виде некоторого критерия:

$$D_{\sigma} \equiv \begin{cases} \frac{1}{2} \sigma_1 (1 - \sin \varphi) - \frac{1}{2} \sigma_3 (1 + \sin \varphi) - Y \cos \varphi, & \text{если } -\sigma_3 \geq \sigma_p \\ -\sigma_3 - \sigma_p; & \text{если } -\sigma_3 < \sigma_p \end{cases} \quad (2)$$

где σ_1 и σ_3 – наибольшее и наименьшее главные напряжения, φ – угол внутреннего трения, Y – сцепление, σ_p – прочность среды при растяжении.

Приведенный критерий определяет зоны дилатансии в условиях, когда среда выдерживает большие сдвиговые напряжения, но меньше сопротивляется растягивающим усилиям.

Таким образом, понятие пограничного слоя дилатансии сегодня становится опреде-

ляющим в проблеме построения математической теории корневых структур и выводящих каналов грязевых вулканов.

Несмотря на то, что реальная структура «пограничных» зон дилатансии в реальных условиях требует самостоятельного изучения, использование этой гипотезы в сфере практического анализа накопленного экспериментального материала по мониторингу грязевых вулканов настоятельно диктуется попыткой найти причины пространственно-временной изменчивости геофизических полей и наблюдаемых «аномалий» (в первую очередь сейсмических, геохимических и гравитационных) с целью установить механизмы их трансформации в районах, определенных как грязевулканические провинции.

По следам газов, мигрирующих через дилатансные структуры в сольово-грифонный этап развития грязевых вулканов, устремляются воды. Они выносят из запечатывающих эруптивный канал вулкана грязебрекчий большое количество тонкого глинистого материала, расширяя и совершенствуя пути разгрузки.

Газоводные смеси грязевых вулканов, выносящие большие массы пелитового глинистого материала, постепенно разрушают грязевулканическую пробку, которая на начальном этапе запечатывает эруптивный канал вулкана. Происходит спонтанный прорыв и флюидный поток грязебрекчии устремляется к поверхности дробясь и растекаясь по многочисленным каналам в пограничном слое дилатансной зоны. Их выход на дневную поверхность через многочисленные сользы и грифоны сопровождается отложением глинистых скоплений со всех сторон окружающих каналы разгрузки и постепенно формирующих конусообразные постройки. Эти динамические процессы сопровождаются сложными химическими явлениями. Достаточно напомнить экспериментально обнаруженное аномальное на первый взгляд явление. В пределах одного и того же кратерного поля каждая сольза выносит воды разного класса и типа.

Подводя итоги, отметим, что при краткосрочном прогнозировании извержений грязевых вулканов особое значение имеет контроль (теоретический или аппаратный) за изменением плотности трещин в очаговой зоне. Достоверность метода может обеспечиваться результатами наблюдений за «пограничной» зоной дилатансии и связанными с нею аномальными полями, поскольку:

- положение очага и его динамические особенности точно не известны, и определение его основных параметров в сильной степени связано с поведением поверхностных аномальных зон дилатансии;

- надежность и точность оценки функции плотности трещин в «очаговой» зоне зависит от информации об аномалиях геофизических и геохимических полей в «пограничных» зонах.

Таким образом, очаг грязевого вулкана представляет собой тело дилатансного типа, сложенное глинами, реже - песками, часто содержащими большое количество твердых обломков вмещающих пород и разжиженных гомогенизированными газоводными флюидами (вода, нефть, газы разного состава); оно формируется на больших глубинах за счет саморазвития элизионных систем и может при благоприятных обстоятельствах стать питательной средой для корневых структур и выводящих каналов, составляющих основу современных грязевулканических построек.

Литература

1. Холодов В.Н.. Грязевые вулканы: закономерности размещения и генезис //Литология и полезные ископаемые, 2002, N 3 С.227-241; N 4. С.339-358.
2. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Гидрорезонансные источники сейсмических полей в технологиях активной томографии ядра Земли. //Всероссийская конферен-

- ция «Внутреннее ядро Земли. Геофизическая информация о процессах в ядре». Тезисы докладов. РАН, РФФИ, МПНТ РФ. Москва. 2000. С. 94.
3. Николаевский В.Н. Обзор: Земная кора, дилатансия и землетрясения. М.: ИФЗ. АН СССР. С. 133-202.
 4. Холодов В.Н., Недумов Р.И., Григорянц Б.В. Катагенез и деформации Кайнозойских отложений. // Литология и полезные ископаемые. 1998. № 5. С. 504-524.
 5. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Еманов А.Ф., Соловьев В.М., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Хайретдинов М.С. и др. Новые геотехнологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер. Монография. М.: ОИФЗ РАН, 2002. 475 с.
 6. Алексеев Ф.А., Войтов Г.И., Лебедев В.С., Несмелова З.Н. Метан. М.: Недра, 1978. 322 с.
 7. Богатиков О.А., Войтов Г.И., Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., и др. О пароксизмальном извержении грязевого вулкана горы Карabetова 6 мая 2001 г. (Таманская грязевулканическая провинция) // ДАН. 2003. Т. 390. № 6. С.805-808.
 8. Войтов Г.И., Собисевич А.Л., Микадзе Э.И., Пузич И.Н. О химических и изотопно-углеродных нестабильностях газов грязевого вулкана Шуго (Таманская грязевулканическая провинция) © 2002 г.
 9. Войтов Г.И., Собисевич Л.Е., Микадзе Э.И., Пузич И.Н. Нестабильности субвертикальных потоков СН₄ в холодной дегазации Земли / Исследования в области геофизики. М.: ОИФЗ РАН, 2004. С. 296 - 303.
 10. Войтов Г.И., Собисевич Л.Е., Микадзе Э.И., Пузич И.Н. Нестабильности субвертикальных потоков СН₄ в холодной дегазации Земли // Исследования в области геофизики. М.: ОИФЗ РАН, 2004. С. 296 - 303.
 11. Войтов Г.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Пронин А.П., Микадзе Э.И., Пузич И.Н. Изотопно-углеродные нестабильности грифонных газов грязевого вулкана Бугазский (Таманская грязевулканическая провинция) // Наука. 2004. т. 394, № 1. С. 85-88.
 12. Галимов Э.М. Изотопы углерода в нефтегазовой геологии. М.: Недра. 1973. 384 с.
 13. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика с приложениями к проблемам газовых и нефтяных пластов. М.: Недра, 1996. 448 с.
 14. Николаевский В.Н., Шаров В.И. Разломы и реологическая расслоенность земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985, №1, С. 16-27.
 15. Холодов В.Н.. Стратисфера - источник рудоносных растворов / Природа, 1990, N 4. С.10-17.
 16. Холодов В.Н, Недумов Р.И. Зона катагенетической гидрослюдизации глин - арена интенсивного перераспределения химических элементов / Литология и полезные ископаемые, 2001, N 6, С. 563-595.
 17. Холодов В.Н.. Постседиментационные преобразования в элизионных бассейнах (на примере Восточного Предкавказья). М.,1983, 149 с.
 18. Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И. и др. / Грязевые вулканы Керченско-Таманской области. Киев, 1986, 150 с.
 19. Шнюков Е.Ф., Науменко П.И., Лебедев Ю.С.и др. /Грязевой вулканизм и рудообразование. Киев, 1971, 329 с.
 20. Якубов А.А., Али-Заде А.А., Зейналов М.М. / Грязевые вулканы Азербайджанской ССР. Баку,1971, 256 с.
 21. Якубов А.А., Али-Заде А.А.,Григорьянц Б.В. и др./ Грязевые вулканы нефтегазоносных областей Азербайджанской ССР. Баку,1978, 39 с.