

**Е.Ф. Шнюков<sup>1</sup>, В.П. Коболев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Отделение морской геологии и осадочного рудообразования НАН Украины

<sup>2</sup> Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины

## **ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКИЕ ЗАЛЕЖИ ГАЗОГИДРАТОВ МЕТАНА В ЧЕРНОМ МОРЕ**

---

*В статье обсуждаются вопросы образования особого грязевулканического типа газогидратных скоплений в глубоководной части Черного моря. Основные положения базируются на результатах геолого-геофизических исследований грязевых вулканов, выполненных в течение 1970—2015 гг. в многочисленных научно-исследовательских рейсах. Сопоставление подводных грязевых вулканов Черного моря с их сухопутными аналогами свидетельствует о возможном накоплении кольцевых залежей газогидратов метана в компенсационных прогибах, аналогичных керченским «вдавленным синклиналям».*

**Ключевые слова:** *грязевые вулканы, компенсационные прогибы, залежи газогидратов, Черное море.*

### **Введение**

Человечество стоит на пороге освоения нового и практически неисчерпаемого вида энергетического сырья — газогидратов метана. Открытие в 1967 г. советскими учеными Мессояхского газогидратного месторождения ознаменовало начало новой эры получения природного газа. На фоне предшествующих открытий таких крупных месторождений, как Уренгойское, Ямбургское, Медвежье, Мессояхское — с запасами менее 30 млрд. м<sup>3</sup> считалось не таким значительным. Однако именно Мессояхское месторождение сыграло роль катализатора в развитии исследований природных газовых гидратов. Мир получил явное подтверждение наличия газогидратных залежей и реальную возможность их промышленного освоения [55]. С тех пор продолжают интенсивные исследования этого нового вида энергетического сырья, созданы мощные финансовые программы во многих странах (Япония, США, Индия, Китай, Южная Корея и др.). К настоящему времени удалось обнаружить широкое развитие газогидратов во многих акваториях Мирового океана, оценить грандиозность запасов этого вида сырья, предпринять первые успешные шаги для его освоения (Канада, Япония, Китай) [49].

© Е.Ф. ШНЮКОВ, В.П. КОБОЛЕВ, 2018

Ресурсы метана в газогидратах почти на 2 порядка превышают запасы традиционных месторождений метана. Однако освоение метана из газогидратов — сложная и трудная задача. При современном уровне нефтегазовых технологий себестоимость добываемого газа из гидратов несопоставима с показателями добычи газа на традиционных газовых месторождениях, что обусловлено технологическими трудностями. В этих работах лидируют страны с ограниченными углеводородными ресурсами — Япония, Китай, Индия, Южная Корея и др. В последние годы этой тематикой заинтересовались страны Евросоюза. Многие из названных стран создали свои национальные программы освоения газогидратов метана и выделили на эти цели значительные средства. Ожидалось, что добычу метана газогидратов в 2007 г. начнет Япония, но эта дата была перенесена на 2017-й, а затем и на 2025 год. Неожиданно в мае 2017 г. об успешной добыче метана из газогидратов объявил Китай, тем самым завоевав лидерство в изучении и освоении газогидратов метана.

Народное хозяйство и бытовые сферы Украины — крупный потребитель углеводородов. Еще в середине 1970-х годов прошлого века Украина являлась флагманом советской сырьевой промышленности и была одним из крупнейших экспортеров газа в Европе. Для современной Украины 68,7 млрд м<sup>3</sup> природного газа, добытого в 1975 году, до сих пор остается неповторимым рекордом. В наши дни Украина в значительной степени зависит от внешних поставок. В 2017 г. в Украине добыто чуть больше 20 млрд м<sup>3</sup>, импортировано 14050,1 млн м<sup>3</sup>. Естественно, желательно было бы обеспечить экономическую независимость страны от внешних поставок, но потенциал новых находок традиционных газовых месторождений на территории страны невелик и революционных открытий не обещает. Таким образом, одной из перспективных возможностей увеличения ресурсной базы углеводородов Украины, наряду с угольным метаном, сланцевым газом и газом плотных коллекторов, является поиск, разведка и разработка скоплений природных газогидратов [49].

В последнее десятилетие открывались заманчивые перспективы открытий нетрадиционных месторождений сланцевого газа на Украине. Были определены и начаты работы на Олевской (Львовская, Ивано-Франковская и Тернопольская области) и Юзовской (Харьковская и Донецкая области) площадях. В силу экологических, и в большей мере политических причин, успехов добиться не удалось. Первый промышленный газ с Юзовской площади Украина надеялась получить уже в 2018 году. Однако ситуация на востоке страны заставила инвестиционные компании *Chevron* и *Shell* уведомить украинское правительство о неспособности выполнять свои обязательства и расторгнуть подписанные в 2013 г. договоры по разработке Юзовского месторождения, которое оказалось в районе антитеррористических действий.

Уместно вспомнить еще об одном потенциальном источнике газа — метане угольных пластов. В США его ежегодно добывают около 45 млрд куб. м из более 10 тыс. скважин, что составляет 12 % общей добычи газа [55]. Однако Донбасс, где планировались работы по угольному метану, пока остается зоной военных действий и возможное освоение угольного метана остается под большим вопросом.

И наконец, третьим потенциальным перспективным источником газа являются газогидраты метана в Черном море, которое является природным объек-

том, сочетающим в себе необходимый набор факторов и условий для существования зон формирования газовых гидратов [19]. В силу метастабильности и специфических условий залегания газогидратов их добыча является весьма проблематичной и, скорее, относится к технологиям будущего. Тем не менее, ввиду ограниченности общих запасов углеводородного сырья в Украине, газогидраты Черного моря могут представлять большой интерес.

Геолого-геофизическое изучение газогидратов метана — достаточно дорогие и сложные работы. В этой связи важны критерии поисков, позволяющие сузить районы исследований. Чаще всего скопления газогидратов приурочены к континентальному склону, зонам разломов, конусам выноса рек. На континентальном склоне северо-западного шельфа Черного моря зарубежными и отечественными комплексными геофизическими ресурсно-ориентированными исследованиями однозначно подтверждено наличие газогидратной залежи в акватории палеодельты Днепра [21]. В силу политических причин работы в акватории, прилегающей к Крымскому полуострову, в ближайшей перспективе не представляются реальными.

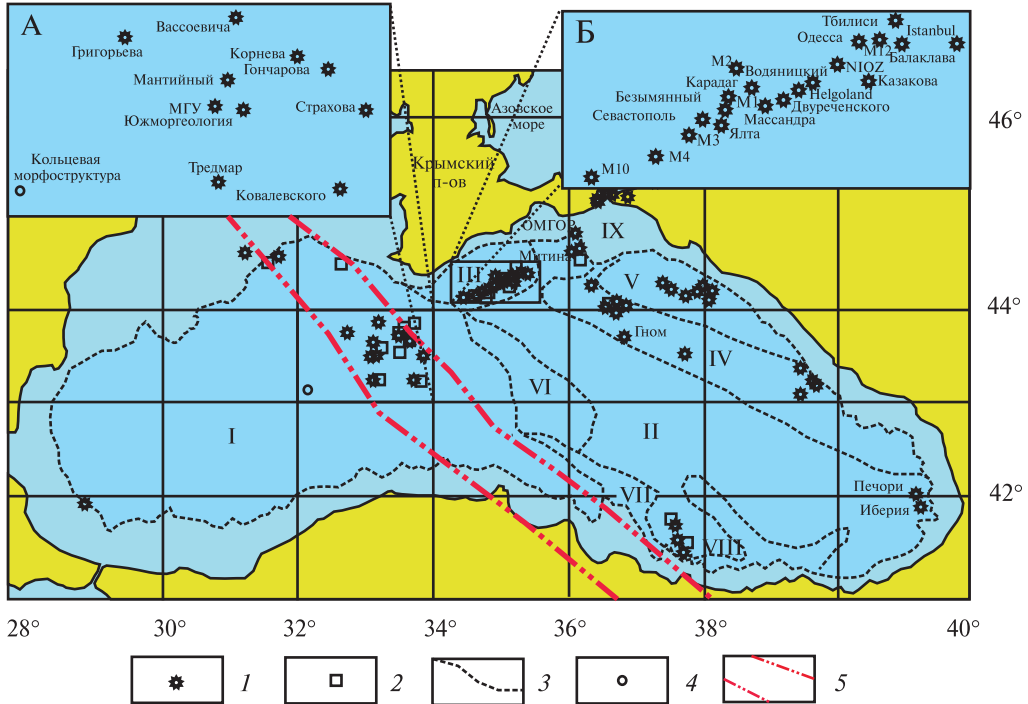
Поэтому, по нашему мнению, небезынтересным объектом последующих исследований являются газогидраты метана грязевых вулканов глубоководной части Черного моря. Здесь неоднократно фиксировались находки газогидратов [2, 10, 22, 48, 59, 60, 63]. Образец белого мономинерального газогидрата (5–7 см) обнаружен в колонке донных отложений на глубине 2,85 м от поверхности дна на грязевом вулкане Гиресунской впадины [65].

Объектом исследований настоящей статьи являются газогидратные скопления, приуроченные к жерлам грязевых вулканов глубоководной части Черного моря. Основанием для выделения этого особого подводно-грязевулканического типа скоплений газогидратов [4] послужили их находки в сопочной брекчии подводного грязевого вулкана на дне Южного Каспия [15]. Образование этого типа газогидратов связывается с фильтрацией газов или газонасыщенных вод через термобарическую зону стабильности в пределах зон грязевулканической разгрузки. Основные положения статьи базируются на результатах геолого-геофизических исследований грязевых вулканов, выполненных в течение 1970–2015 гг. в многочисленных рейсах на научно-исследовательских судах (НИС) «Михаил Ломоносов», «Академик Вернадский», «Ихтиандр», «Киев», «Владимир Паршин» и «Геохимик».

### **Геоморфологические особенности участков грязевулканических проявлений Черного моря**

К настоящему времени в глубоководной акватории Черного моря идентифицировано более 60 грязевых вулканов (рис. 1) [10]. В донных отложениях с ними часто ассоциируют скопления газовых гидратов, а в водной среде фонтаны пузырей метана. Транспортировка грязевого материала осуществляется газо-флюидной смесью, вырывающейся под большим давлением со значительных глубин.

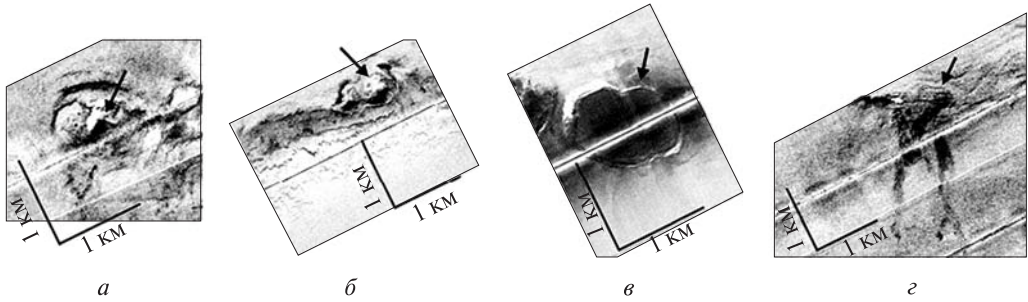
Грязевые вулканы представлены разнообразными в геоморфологическом отношении положительными формами подводного рельефа. Они хорошо выделяются конусообразными поднятиями с диаметром 300–2000 м и высотой ~100 м,



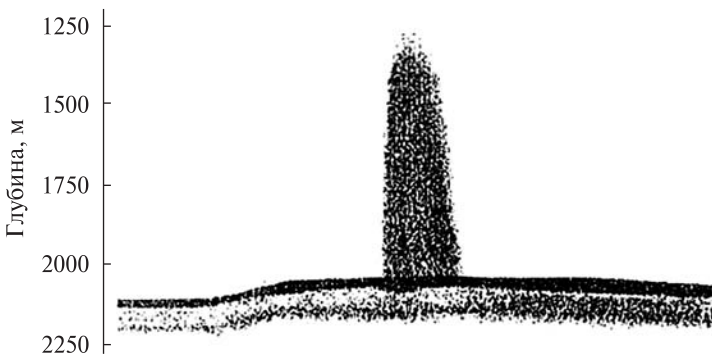
**Рис. 1.** Распределение выявленных к настоящему времени грязевых вулканов (1) и газогидратов (2) в акватории Черного моря по [10]. 3 — границы тектонических структур по [42]: I — Западночерноморская впадина, II — Восточночерноморская впадина, III — прогиб Сорокина, IV — поднятие Шатского, V — Туапсинский прогиб, VI — хребет Андрусова, VII — хребет Архангельского, VIII — Гиресунская впадина, IX — Керченско-Таманский прогиб. 4 — Кольцевая структура. 5 — границы Одессо-Синопской разломной зоны по [39]. На вставках расположение грязевых вулканов в Западночерноморской впадине (А) и в прогибе Сорокина (Б)

хотя встречаются и такие, у которых конус практически отсутствует. В разрезе грязевулканическая постройка обычно имеет вид пологого, часто усеченного конуса. Конус сложен сопочной брекчией, потоки которой могут иметь несколько генераций. В плане описываемые структуры более или менее изометричны, округлой формы. Поперечные размеры грязевых вулканов (диаметр их основания) изменяются в широких пределах — от первых сотен метров до нескольких километров. Так, в Западночерноморской впадине поперечный размер грязевых вулканов достигает 1,5–2,5 км и даже 4 км. Высота грязевых вулканов по сравнению с их диаметром относительно небольшая: даже у самых крупных из них она редко превышает 100 м. Поэтому крутизна склонов грязевых вулканов, как правило, не превышает первые градусы. Такое соотношение диаметра и высоты объясняется низкой плотностью сопочной брекчии, способной растекаться на расстояние в несколько километров.

У большинства грязевых вулканов в плане наблюдается хорошо оформленный кратер, с поперечником от десятков до сотен метров. Помимо основного кратера на склонах грязевых вулканов часто встречаются мелкие вторичные выходы жидких и газовых компонентов, которые называются салъзами и грифонами [44].



**Рис. 2.** Различные типы грязевых вулканов (указаны стрелками) [8]: *a* — округлые в плане, правильной конической формы; *б* — со структурами обрушения; *в* — с плоским сводом; *г* — трещинные излияния сопочной breccии



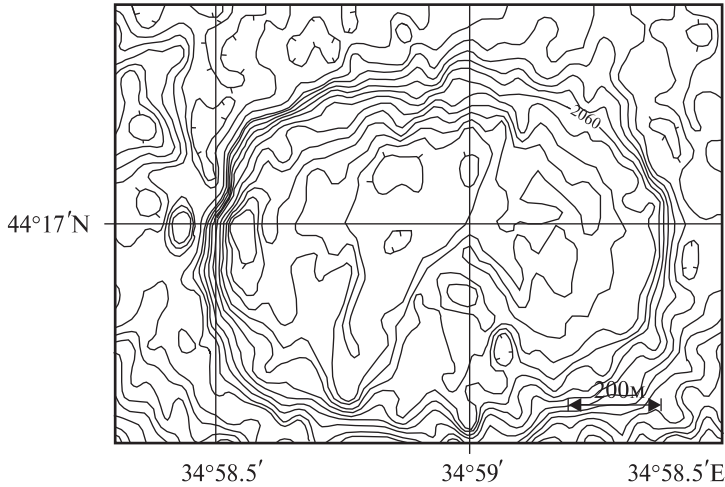
**Рис. 3.** Эхограмма газового фонтана высотой около 800 м (над уровнем морского дна) на грязевом вулкане Двуреченского (2003) [44]

Проведенные в прогибе Сорокина гидроакустические исследования показали, что выявленные здесь грязевые вулканы имеют гораздо меньшие размеры, чем аналогичные структуры Западночерноморской впадины. На эхограммах выделяются округлые и конические в поперечном сечении структуры с диаметром 700—800 м и высотой в десятки метров (рис. 2, *a*). Зафиксированы также грязевые вулканы с четко выраженными кальдерами обрушения по системе концентрических сбросов, имеющие разнообразную форму и диаметр до 1 км (рис. 2, *б*). Единственный грязевой вулкан Двуреченского представляет собой геоморфологическую структуру правильной округлой формы с совершенно плоским сводом, диаметр которой достигает 1100 м (рис. 2, *в*). Следует также отметить трещинные излияния, обнаруженные в центральной части впадины Сорокина (рис. 2, *г*) [8].

### Проявления газовой активности грязевых вулканов

Деятельность грязевых вулканов сопровождается выносами огромных масс метана. Так, во впадине Сорокина (см. рис. 1) было встречено несколько грязевых вулканов (Двуреченского, Водяницкого, Казакова, Гельголанд и др.), фонтаны газа на которых имели высоту 800—1300 м (рис. 3). Фонтан на вулкане Двуреченского имел диаметр 400 м [10].

Над вершинами большинства глубоководных грязевых вулканов обнаружены признаки активности в виде периодических в межгодовом масштабе газовых фонтанов. Мониторинговые исследования грязевого вулкана Двуреченского в



**Рис. 4.** Детальная батиметрическая схема грязевого вулкана Двуреченского по [57] с изменениями и дополнениями. Утолщенная изобата соответствует глубине моря 2060 м. Остальные изобаты выполнены в 5-ти метровом интервале

2002—2003 гг. позволили установить дискретность во времени проявления газовых фонтанов. Так, во время экспедиционных исследований на НИС «Профессор Водяницкий» летом 2002 г. нам удалось наблюдать два мощных газовых фонтана (высота 850 м, диаметр до 400 м), приуроченных к жерлу грязевого вулкана Двуреченского. Вместе с тем, международная экспедиция в мае 2003 г. (58-й рейс НИС «Профессор Водяницкий») таких фонтанов на грязевом вулкане Двуреченского не обнаружила [14]. Но уже в июле 2003 г. в 59-м рейсе на НИС «Профессор Водяницкий» мы вновь зафиксировали мощный газовый фонтан высотой около 800 м, приуроченный к этой же морфоструктуре, но несколько смещенный по отношению к точкам выхода двух ранее наблюдавшихся фонтанов [52].

На рис. 4 приведена детальная батиметрическая схема вулкана Двуреченского по [57], которая может свидетельствовать о существовании на его обширном плато нескольких выводных каналов (жерл) пульсационных выходов газов, приуроченных к изометричным овальным углублениям дна.

### **Геологическое строение грязевых вулканов Черного моря**

Грязевые вулканы Черного моря — разнообразные по своему строению глубинные структуры. Сейсмические исследования в пределах локализации грязевых вулканов обнаружили неоднородную картину распространения упругих волн через жерловую зону. На временных разрезах наблюдается затухание их энергии, практически исчезают отраженные волны, а качество записи существенно ухудшается. Это может свидетельствовать о том, что погребенная часть жерла грязевого вулкана и его брекчия не отражают и не преломляют сейсмические волны. На сейсмических разрезах большинство грязевых вулканов имеют столбообразный подводный канал без каких-либо осложнений его формы (рис. 5). Отдельные вулканы отличаются некоторыми раздувами подводного канала, которые связаны либо с разными этапами активизации деятельности вулканов, либо с латеральным внедрением продуктов извержения во вмещающую толщу осадков [16].

Полученные в последние годы обширные материалы сейсмических исследований, позволяют фиксировать корни грязевых вулканов в мезозое фундамента и

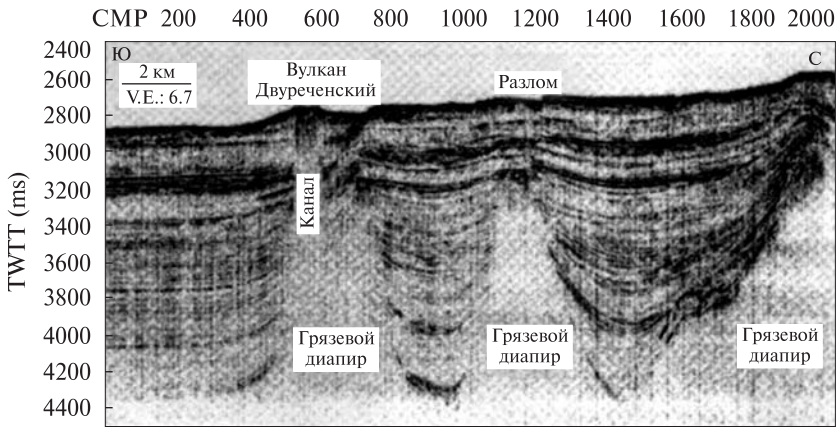


Рис. 5. Сейсмический временной разрез через грязевой вулкан Двуреченского по [64]

даже в верхней мантии. На рис. 6 приведен фрагмент временного сейсмического разреза в зоне грязевого вулкана Мантийного (см. рис. 1, а) [51], корни которого прослеживаются ниже поверхности Мохо. В этой связи совершенно справедливо ставится вопрос Д.Ф. Исмагиловым и др. (2006) о глубинном заложении грязевых вулканов — «каким образом могут влиять глиняные майкопские диапиры на возникновение грязевых вулканов с корнями в мезозойских отложениях?». Авторами отмечается, что «...грязевые вулканы - более сложные, чем принято считать, геологические явления, не связанные с формированием глиняного диапиризма». По нашему мнению, значительная часть грязевых вулканов Черного моря все-таки связана с глиняными диапирами, но связь эта обратная общепринятой. Ключ к пониманию этой важной взаимосвязи указывают Л.Б. Мейснер и Д.А. Туголесов в своей статье, посвященной флюидизационным деформациям в осадочном чехле Черного моря (1997). Глубинные флюиды, проникая сквозь осадочный чехол, как бы облегчают процесс складкообразования. Иными словами, не диапиры порождают грязевые вулканы, а наоборот, потоки глубинных флюидов, порождающие грязевые вулканы, создают благоприятные условия для возникновения диапиров. Иногда следы движения потоков глубинных флюидов — субвертикальные геологические тела, которые проникают на поверхность по крупным нарушениям сплошности осадочного чехла и создают грязевые вулканы. Таким образом, не вызывает сомнения тот факт, что наиболее интенсивные локализованные разгрузки углеводородных флюидов контролируются инъекционными структурами типа диапиров, разрывных нарушений и грязевых вулканов [6].

Очевидное участие глубинных процессов в формировании грязевых вулканов ставит вопрос о необходимости уточнения определения этого явления. Вероятно, наиболее удачным является определение С.А. Ковалевского (1935): «...грязевой вулканизм есть лишь частная форма проявления на дневной поверхности газовых струй, истекающих из глубины земной коры».

В несколько более современной форме это определение будет звучать примерно так: грязевой вулканизм есть форма проявления на поверхности земли локальных газовых потоков глубинных углеводородов, сопровождающихся выбросами сопочной брекчии, обломочного материала, воды и формирующих сво-

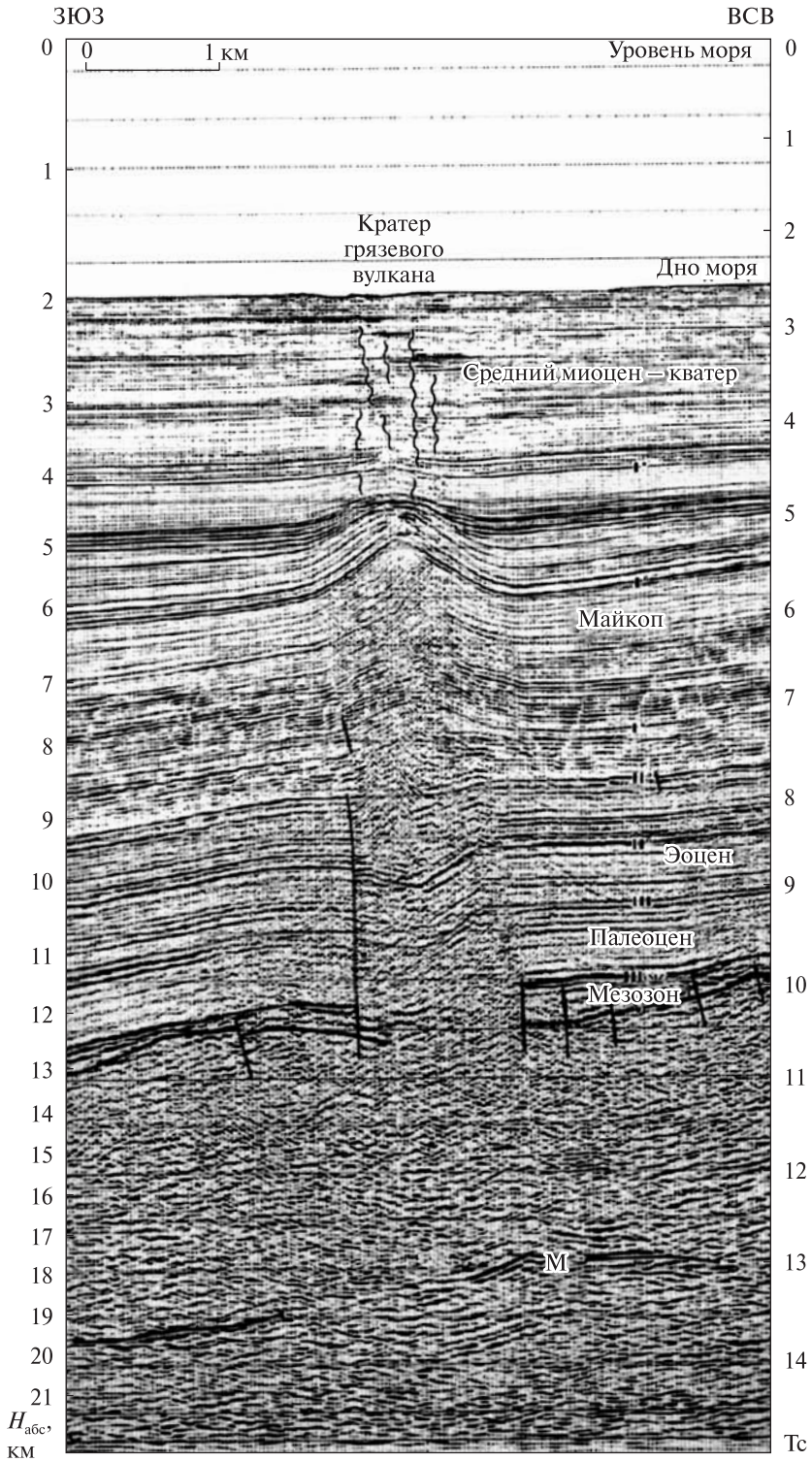


Рис. 6. Фрагмент временного сейсмического разреза в зоне грязевого вулкана Мантийный [51]



еобразные морфоструктуры рельефа — конусовидные холмы с кратерами на вершинах. Иногда это озера округлой формы.

Необходимо также отличать грязевые вулканы от газовых фонтанов, многочисленные проявления которых зафиксированы в ряде регионов на дне моря. Грязевые вулканы — это особые морфоструктуры отложений морского дна, часто имеющие геоморфологически выраженные положительные формы морского дна. Газовые фонтаны — менее значительные выделения газов, обычно приуроченные к тектоническим нарушениям пород и не образующие положительных форм на дне.

### **Структурно-тектоническая позиция грязевых вулканов Черного моря**

Грязевые вулканы встречены во многих крупных геологических структурах Черного моря. В большом количестве они представлены в прогибе Сорокина (см. рис. 1, б) — 20, в Западночерноморской впадине (см. рис. 1, а) — 11, в пределах Туапсинской и Гиресунской впадин — соответственно 8 и 5, на Валу Шатского — 7 и в Керченско-Таманском прогибе — 3 и др. [10]. Следует подчеркнуть, что если в центральной части Западночерноморской впадины (ЗЧВ) открыто 11 грязевых вулканов, то непосредственно в пределах Восточночерноморской впадины (ВЧВ) подобных проявлений до сих пор не зафиксировано. Исключение составляет грязевой вулкан Гном (см. рис. 1), расположенный на северо-восточной границе Восточночерноморской впадины и поднятия Шатского.

Грязевые вулканы приурочены к глубинным разломам, которые имеют определяющее значение в процессе возникновения и развития деформаций земной коры. А именно, грязевые вулканы ЗЧВ расположены в пределах Одесско-Синопской разломной зоны мантийного заложения (см. рис. 1), которая оказала существенное влияние на формирование Черноморской мегавпадины в целом. Эта разломная зона, разделяющая крупные тектонические блоки земной коры, прослеживается параллельно оси Центральнoчерноморского поднятия с Восточноевропейской платформы до Понтида на основании повышенных градиентов мантийной составляющей гравитационного поля [39].

Таким образом, грязевые вулканы находятся в эпицентре активного геодинамического развития Западночерноморского рифта и, что самое главное, над глубинной разломной зоной. Формирование месторождений углеводородов в областях глубоких безграницных впадин, какой является Западночерноморская впадина, объясняется многими исследователями подпиткой резервуаров за счет глубинных углеводородов. Образование последних, по мнению [32], происходит под влиянием зон трещиноватости верхней коры. Восходящие потоки флюидов, обогащенные углеводородами, могут попадать в условия образования их месторождений, при наличии на их пути достаточно прочных непроницаемых пород. В случае их тектонического разрушения флюиды устремляются к поверхности, образуя газовые выбросы или грязевые вулканы [13]. Этим можно объяснить расположение грязевых вулканов Западночерноморской впадины в пределах Одесско-Синопской разломной зоны мантийного заложения, где непроницаемые слои больше всего подвергались разрушению.

Топография раздела Мохо Западночерноморской впадины в отличие от ее восточного аналога характеризуются груботреугольной формой [20], что подтверж-

дается данными локальной сейсмотомографии [56]. При этом западная сторона треугольника параллельна Западночерноморской зоне разломов, восточная — Одесско-Синопской, и наконец, южная — граничит с субпараллельной сутурой Внутренних Понтид. Согласно сейсмическим и гравитационным данным, раздел Мохо под ним имеет высокое стояние — 19 км, погружаясь к периферии максимум до 44 км. Т. е., раздел Мохо образует под Западночерноморской впадиной свод с довольно крутыми (до 250) бортами. Лучи этого тройного сочленения в итоге переходят в ранг рифтогенных структур над мантийным плюмом, что подтверждается сейсмотомографическими построениями Р-скоростных моделей Восточного Средиземноморья, приведенные в работе [7]. На скоростной модели мантии непосредственно под Западночерноморской впадиной на глубинах от 2500 до 1700 км четко фиксируется низкоскоростная неоднородность, которая отождествляется с реликтом Черноморского плюма. В то же время, под Восточночерноморской впадиной подобная аномальная зона отсутствует. Внедрение разогретого мантийного вещества с последующим остыванием аномальной линзы может служить возможным объяснением происхождения и эволюции Западночерноморской впадины [20]. В данном случае происходило заполнение надрифтового прогиба осадками, оживление разломов и их влияние на фильтрационные процессы, и образование газогидратов в придонных отложениях. Периодическая активизация разломных блоков, лежащих в основании, внесла главный вклад в формирование грязевулканических структур впадины. Таким образом, можно констатировать, что единые корни глубинных процессов, которые приводят к появлению грязевого вулканизма в Западночерноморской впадине, несомненно, свидетельствуют об их глубинном происхождении.

Отдельного внимания заслуживает рассмотрение роли глубинной дегазации в формировании газогидратов. На основе изучения грязевого вулканизма, сейсмичности и газогидратов Черноморско-Каспийского региона В.И. Попковым и др. (2012) предложена дегазационная модель формирования газогидратов. Их образование связывается с литрическими разломами, как каналами поступления газа.

### **Геохимические особенности состава газов грязевых вулканов**

По нашему мнению, химизм газогидратов, точнее их газовый состав имеет весьма большое значение, ибо, во-первых, в известной мере свидетельствует о термодинамических условиях образования и тем самым сужает или расширяет площади потенциальных ареалов развития газогидратов и их положение в разрезе осадков. Во-вторых, при наличии  $\text{CO}_2$ , может обуславливать возникновение карбонатных построек над структурами истечения газов. Последние могут рассматриваться в качестве поисковых критериев обнаружения газовых сипов и газогидратов.

Газы грязевых вулканов Черного моря по составу на 95—99 % представлены метаном. Содержатся также этан, пропан, бутан, пентан и гексан, часто фиксируются примеси  $\text{CO}_2$  и азота. Интерес представляют находки сероводорода в грязевых вулканах. Так, на вулкане Митина была выявлена аномалия в распределении концентраций сероводорода, в частности, абсолютное повышение содержания сероводорода в водной толще, аномалия солености и своеобразный

подъем изоповерхностей теплоотдачи в виде купола. Все это позволяет предполагать участие грязевых вулканов в формировании сероводородного заражения Черного моря [45].

Состав газов изучался далеко не во всех случаях находок газогидратов, но все же определенный банк данных накопился. Эти данные во многом противоречивы. Возможно, это свидетельствует о разнообразии состава газов из газогидратов в разных местах опробования. По составу газов Ю.А. Бяков, Р.П. Круглякова (2001) выделяют два типа газогидратов. На грязевых вулканах МГУ, Страхова, Безымянном, которые относятся к первому типу, метан в газогидратах содержится в количестве 93,3—95,7 %, его гомологи — от 4,3 до 6,7 %. В других анализах на этих же вулканах обнаружены азот (0,7—1,8 %), углекислый газ (0,85 %), сероводород (0,25 %). Второй тип — газогидраты грязевого вулкана Вассоевича (см. рис. 1, а) — содержит только метан.

В составе газа, извлеченного непосредственно при диссоциации образцов газогидратов вулкана Двуреченского, доминирующим являлся метан (99,5 %) при незначительном содержании этана и пропана (менее 0,5%) [58]. По данным Р.П. Кругляковой и др. (2009), состав газогидрата из вулкана МГУ — 96,55 % метан и 3,45% гомологи. Газогидраты из вулкана Гельголанд состоят из метана — 99,66 %,  $\text{CO}_2$  — 0,29—0,31 %, этана — 0,03 % и следов пропана [10]. Газогидраты вулкана Печори содержат 87,50—89,48 % метана, 10,39—12,01 % углекислого газа, 0,09—0,43 % этана и около 0,01 % пропана. По общим определениям Г.Д. Гинсбурга и др. (1990) газогидраты из сопочной брекчии грязевых вулканов в среднем содержат 97—98 % метана, 0,02—0,4 % этана, 0,5—0,9 %  $\text{CO}_2$ , 0,25 % сероводорода.

Как видим, состав черноморских газогидратов изменяется в довольно широких пределах, но все же обычно основным компонентом является метан с небольшой примесью других газов. Доля метана в составе газогидратов, отобранных в пределах грязевых вулканов Черного моря составляет 93,3—99,98 %. Соответственно на долю гомологов приходится 0,02—6,7 %. Вызывает некоторое сомнение 100% содержание метана в газогидратах вулкана Вассоевича [26].

В нескольких случаях изучался и изотопный состав газов. Так, по данным А.Ю. Бякова, Р.П. Кругляковой (2001), изотопный состав углерода — $\delta^{13}\text{C}$  от 61,80 до 63,55 ‰ свидетельствует о смешанной (биохимической и термokatалитической) природе углеводорода. К такому же выводу пришли [58] при анализе изотопного состава углерода —  $\delta^{13}\text{C}$  газогидратов вулкана Двуреченского, который имеет значение от 62 до 66 ‰. Ранее о смешанной природе газогидратов отмечалось в работах [5, 6]. В целом, результаты анализа газогидратов грязевых вулканов показывают, что в их составе отмечается значительное содержание гомологов метана и их производных (до 17 %) и значительное количество (до 12 компонентов) углеводородов выше  $\text{C}_6$  (до 4,6 %), которые в биохимических газах обнаружены не были [26].

### **Сопоставление подводных грязевых вулканов с их сухопутными аналогами**

Учитывая редкость наблюдений вулканов в море, для полного понимания этого явления приходится сопоставлять морские грязевые вулканы с вулканами суши. В Азербайджане, например, по данным Р.Р. Рахманова (1987) за

одно извержение вулкана в среднем выбрасывается 250 млн м<sup>3</sup> метана, а за весь четвертичный период —  $125 \times 10^{12}$  м<sup>3</sup>! Общие масштабы этого процесса подробно оценены Ад.А. Алиевым и др. (2015) особенно на примере Азербайджана. А.М. Плотников (1967) отмечает, что одноактные выбросы газов керченских вулканов Джау-Тепе и Джарджава составляли соответственно  $88 \times 10^6$  и  $6,2 \times 10^6$  м<sup>3</sup> за одно извержение и т. д.

Грязевые вулканы извергают на поверхность не только большие объемы газов, они выбрасывают на поверхность огромные массы сопочной брекчии и обломочного материала из прорываемых пород. По мнению Г.А. Лычагина (1952), керченские грязевые вулканы выбросили за свою геологическую деятельность не менее 25 млрд. м<sup>3</sup> сопочной брекчии. Масштабы выбросов сопочной брекчии и обломочного материала черноморскими вулканами пока не оценены, но, безусловно, они соизмеримы с выбросами своих сухопутных аналогов.

Многие исследователи пришли к выводу о том, что на вершинах антиклинальных структур, пораженных грязевым вулканизмом, возникают ослабленные участки — своеобразный дефицит масс, где гидростатическое давление распределено неравномерно. Выброшенная сопочная брекчия давит на ослабленный участок, что приводит к крупным просадкам. Достаточно нагляден в этом отношении пример грязевого вулкана Локбатан (Азербайджан). Выделение газа, продолжавшееся здесь в течение 1933 и 1935 гг., обусловило, по-видимому, уплотнение сопочной брекчии и привело к образованию ряда огромных воронок и провалов проседания. Каждый последующий провал перекрывал предыдущие, а последняя воронка была грандиозных размеров [3].

В условиях подводного извержения накопление осадков в провале или воронке также сопровождается процессом продавливания, в результате роста прогиба увеличивается объем накопившихся в нем осадков. Проседания сопровождаются все без исключения грязевулканическими извержениями. Собственно говоря, опускание земной поверхности в результате выноса вещества из недр не является каким-то исключительным свойством только грязевых вулканов. То же характерно и для собственно вулканов. Еще в конце XIX в. австрийский вулканолог Рейер пришел к заключению о том, что извержения и вынос лавы на поверхность происходят вследствие опускания земной коры [23]. Обвалы вулканов после извержений широко известны и описаны во многих геологических работах.

Почти все современные авторы подчёркивают грязевулканическое происхождение компенсационных прогибов, синклинальное расположение слагающего их комплекса третичных осадков и сопочной брекчии. В этой связи следовало бы назвать эти структуры «компенсационными синклиналиями» грязевулканического происхождения. Это название отразит как структурные, так и генетические особенности всех структур этого типа в различных районах. Термин «вдавленная синклиналь», широко применявшийся и применяемый многими исследователями Керченского полуострова, неудачен. Он не отражает особенности генезиса. В связи с этим, представляется уместным при общей характеристике структур такого типа использование термина «компенсационная синклиналь» как более универсального и точного [44].

Следует отметить, что образование компенсационных синклиналей протекает лишь в определенных структурах, предварительно тектонически подготовленных. Поступление глубинных флюидов вызывает насыщение ядра антиклинали

большим количеством газов, находящихся под большим давлением. Удаление флюидов, связанное с грязевулканической деятельностью или тектоническими нарушениями, приводит к усадке ядра и сопровождается значительным уменьшением его объема. Следствием этого является образование сводовых грабен и тому подобных структур. Решающим фактором формирования компенсационных синклиналей является грязевой вулканизм. По нашему мнению, схема развития вдавненных синклиналей, разработанная К.А. Прокоповым еще в 30-х годах прошлого столетия, в целом правильно отражает главные этапы эволюции компенсационных синклиналей. Обширные фактические материалы позволяют несколько детализировать ее. Деятельность грязевого вулкана неминуемо формирует депрессию в любых палеогеографических условиях морской и субаэральной среды, в частности приводит к изгибам пластов пород, слагающих сводовую часть антиклинали [35]. Следует отметить, что Г.А. Лычагин (1952) высказывал сомнения по поводу возможности возникновения депрессий в субаэральных условиях. Однако фактические материалы свидетельствуют, что и в условиях суши могут возникать в той или иной мере выраженные депрессии.

Дальнейшее развитие прогиба определяется многими обстоятельствами. В морском бассейне при подводных извержениях извергнутой грязевым вулканом сопочная брекчия вместе с накапливающимися нормальными морскими осадками создает тяжелый пресс, дополнительно ускоряющий оседание и опускание лежащих над грязевулканическими очагами участков антиклинальных структур. На суше извергнутой брекчия выветривается, в значительной мере размывается и разносится, осадконакопление фактически не происходит. Поэтому в субаэральной среде процесс образования компенсационного прогиба тормозится, масштабы и амплитуда его уменьшаются. Этот процесс все же имеет зачастую довольно значительные масштабы (Булганакская котловина). Можно предполагать такого рода образование с последующим захоронением для некоторых депрессий Юго-Западной Туркмении и Азербайджана.

При сохранении морского режима развитие компенсационной синклинали продолжается дальше: по мере накопления осадков и брекчии пласты в своде антиклиналей опускаются, при этом нарушается их сплошность. Поскольку форма опускания — чаще всего округлая компенсационная воронка, то форма нарушения — в той или иной мере выраженный кольцевой сброс, образованный системой более мелких нарушений. Возникает своеобразный округлый грабен, заполненный осадками и брекчией. Местами извержение грязевого вулкана происходит прямо в компенсационной синклинали, по нарушениям, обрамляющим компенсационную синклиналь, но нередко центр вулкана смещен в сторону от компенсационной синклинали. Сопочные отложения устанавливаются в разрезе подавляющего большинства компенсационных синклиналей, что указывает на преобладание первых двух соотношений грязевых вулканов и компенсационных синклиналей. После отступления моря они подвергаются процессам выветривания так, что образуются положительные формы рельефа — холмы, невысокие скалы и т.п. При этом определяющим является различный литологический состав пород, слагающих компенсационные синклинали и вмещающие их структуры. В составе первых значительное место принадлежит плотным доломитизированным известнякам, тогда как вмещающие структуры сложены почти исключительно майкопскими глинами. Кстати, ком-

пенсационные синклинали, в разрезе которых преобладают глины, в рельефе не выражены [44].

Фактически развитие вдавненных синклиналей протекало неизмеримо сложнее, ибо очень многие из них — это чрезвычайно сложный «слоеный пирог» различных осадочных пород и сопочной брекчии. По периферии структур развивались рифовые известняки, при дальнейшем опускании выворачивающиеся к центру и т.д. В условиях суши дальнейшая деятельность грязевого вулканизма приводит к продолжающемуся опусканию и нивелировке местности. Наконец, при дальнейшем развитии палеогеографической ситуации в сторону углубления моря и прекращения грязевулканической деятельности происходит захоронение структур. В условиях глубоководного Черного моря в компенсационных структурах грязевых вулканов могут накапливать газогидраты метана.

### **Метастабильность существования газогидратов в природных условиях**

Газогидраты, как метастабильные образования, существуют в природных условиях, близких к границе их фазовой устойчивости. Необходимыми условиями образования и существования природных газогидратов является наличие требуемых для этого давления ( $P$ ) и температуры ( $T$ ), а также достаточное количество воды и свободного (либо растворенного в воде) газа. Такие условия реализуются в осадках морей на глубинах более 300—500 м [6; 18; 37].

Газы, попадая в соответствующие термодинамические условия и соединяясь с водой, образуют зону скопления газогидратов. Физические параметры этой зоны, установленные экспериментальным путем, не всегда выдерживаются в естественных условиях. Это зависит от газонасыщенности, состава газа и минерализации воды [41]. В частности, наличие тяжелых углеводородов и  $\text{CO}_2$  повышает температуру гидратообразования, а увеличения минерализации воды — снижает на 1—4 °С (рис. 7). В осадочных образованиях такие колебания температуры изменяют мощность пласта гидратообразования на 50—400 м [27]. Фазовое равновесие газогидратов очень чувствительно к изменению температуры. При градиенте давления 1—2 МПа/К изменение температуры на 1°С сопровождается изменением мощности гидратного слоя на 50—100 м. Поэтому при оценке положения границ зоны гидратообразования и ее мощности должны учитываться самые незначительные вариации температуры (включая вариации температуры во времени), обусловленные изменением температуры дна, условий теплообмена в придонном слое воды, осадконакопления и пр. Вместе с тем, непрерывный процесс отложения осадков приводит к уменьшению теплового потока в верхней части осадочной толщи и его повышению в нижней. Изотермы, постепенно смещаясь вверх, должны способствовать разрушению газогидратного слоя снизу и наращиванию его в верхней части. Разрушение гидратов сопровождается поглощением тепла (400—600 кДж/кг в интервале 0—200 °С), а образование соответственно его выделением [19]. Таким образом, изменения температуры и давления способны вызвать процесс разложения газогидратов, связанный с выделением метана и воды. Визуально газовые гидраты в поднятых на борт ударной гравитационной трубкой донных отложениях не всегда наблюдаются, но об их возможном присутствии могут свидетельствовать результаты измерения тем-

пературы по профилю извлеченного керна непосредственно после его подъема на палубу. Присутствие газогидратов в отдельных горизонтах четко фиксируется резким снижением температуры, что было предложено в качестве диагностического признака их присутствия в керне [48].

По данным прямых геолого-геофизических наблюдений оценить гидратонасыщенность осадков в окрестностях подводных грязевых вулканов представляется сложной задачей. Поэтому исследования аквальных залежей газогидратов грязевых вулканов предусматривают использование численного моделирования.

В работе Е.И. Суетновой приводятся результаты математического моделирования процесса аккумуляции газовых гидратов в окрестностях подводных грязевых вулканов [40]. При этом следует отметить, что в модели принят лишь фильтрационный механизм накопления газовых гидратов в зоне их термобарической стабильности под поверхностью дна в зоне грязевого вулкана, как наиболее мощный по сравнению с диффузионным. Результаты расчетов свидетельствуют, что максимальная скорость гидратонакопления в этом варианте составляет  $\approx 3\%$  порового пространства за 1000 лет (при проницаемости осадков  $k_0 = 10\text{--}15 \text{ м}^2$ , градиенте температуры  $0,05^\circ \text{ м}^{-1}$ , глубине питающего резервуара 1000 м от поверхности дна и глубине моря 1200 м). Как следует из [62], полученная скорость гидратонакопления значительно превышает такую же скорость на акваториях пассивных континентальных окраинах, где гидратонасыщенность составляет только первые проценты и скорости гидратонакопления оцениваются как  $\approx 1\%$  в  $10^5$  лет. Таким образом, скорость накопления гидратов в окрестностях подводных грязевых вулканов только за счет фильтрации газонасыщенного порового флюида над резервуаром питания грязевого вулкана (диапира) достаточна для формирования значительных газогидратных скоплений за период порядка нескольких тысяч лет.

Из многочисленных подводных грязевых вулканов, пожалуй, лучше других изучен грязевой вулкан Хаакан Мосби в Норвежском море [37]. Местоположение вулкана — материковый склон, глубины моря 1250—1220 м. Исследования проводились международной российско-норвежско-американской экспедицией на НИС «Профессор Логачев» в 1996 г. и на НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 1998 г. В пределах грязевулканического поля, выявленного локатором бокового обзора, отобрано 30 станций, 17 из которых содержали газогидраты. Обнаружена концентрическая зональность развития газогидратов, обусловленная выходящим потоком грязевулканического флюида и созданного им температурного поля (рис. 8). В центре грязевого поля газогидраты отсутствуют, создавая круг радиусом 100 м, где в отложениях брекчии температура дос-

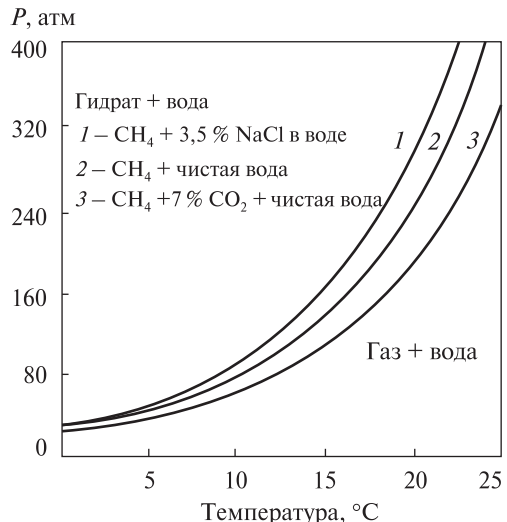
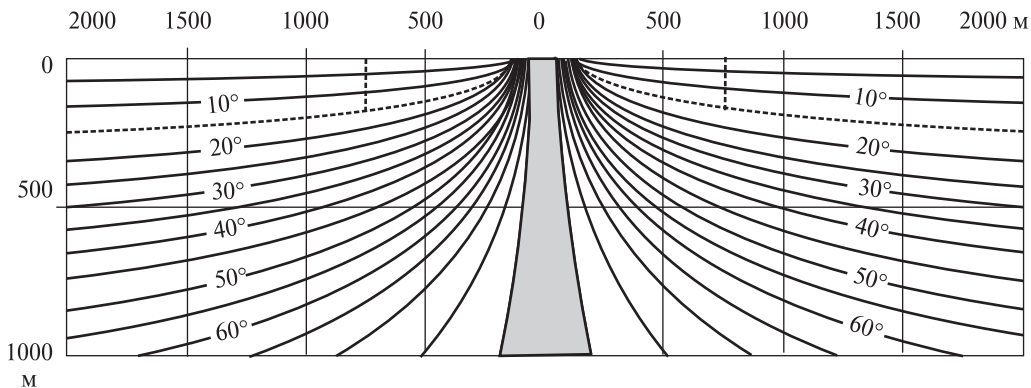


Рис. 7. Диаграмма условий стабильности газогидратов по [41]



**Рис. 8.** Схематическое распределение температурного поля подводного грязевого вулкана Ха-акон Мосби на континентальном склоне Норвежского моря (с изменениями по [37]). Прерывистые горизонтальные изотермы соответствуют подошве зоны стабильности газогидратов, вертикальные — границам их распространения

тигала  $+15,4^{\circ}\text{C}$  (при температуре придонной воды  $-0,8^{\circ}\text{C}$ ). В 200 м от центра вулкана содержание гидратов достигает максимальных значений (более 20 %). Здесь зафиксировано развитие гидратов прямо у поверхности дна, при этом с глубиной гидратонасыщенность уменьшается. С удалением от центра верхняя граница развития газогидратов углубляется. Внешняя граница газогидратов фиксируется на расстоянии 750 м от центра вулкана и определяется интенсивностью диффундирующего газа. Основным стройматериалом для возникновения газогидратов метана является грязевулканический флюид, имеющий пониженную соленость (13,3 г/л по сравнению с морской водой 19,7 г/л). В.А. Соловьев (2001) считает, что в гидратах стабилизируется от 1 % до 10 % газа, поступающего в зону гидратообразования.

При изучении аквальных газогидратов существенное значение имеют геотермические исследования, включающие измерения *in-situ* абсолютных температур и теплопроводности донных осадков с целью расчета тепловых потоков и построения термобарических моделей формирования зон газогидратообразования. Анализ процессов образования (разрушения) или стабильности газогидратов требует учета возможных изменений термодинамических условий во времени, которые обусловлены не только физико-химическими процессами в осадках, но и вариациями температуры придонного слоя воды, изменением уровня моря и другими факторами.

Температура на дне Черного моря за пределами шельфа изменяется от  $8,7$  до  $9,2^{\circ}\text{C}$ , медленно нарастая с глубиной, а геотермический градиент в среднем составляет  $50\text{ мК/м}$ . Основываясь на этих данных и на результатах изучения равновесия гидратосодержащих систем (см. рис. 6) можно заключить, что РТ-условия допускают существование гидратов метанового газа начиная с глубин моря около 600–650 м. С увеличением глубины моря мощность зоны гидратообразования растет и достигает 350–500 м в глубоководной части. Мощность слоя гидратообразования существенно зависит от величины градиента температуры или теплового потока. В зонах с низким тепловым потоком ( $25\text{--}30\text{ мВт/м}^2$ ) мощность слоя гидратообразования составляет 350–400 м, при увеличении теплово-



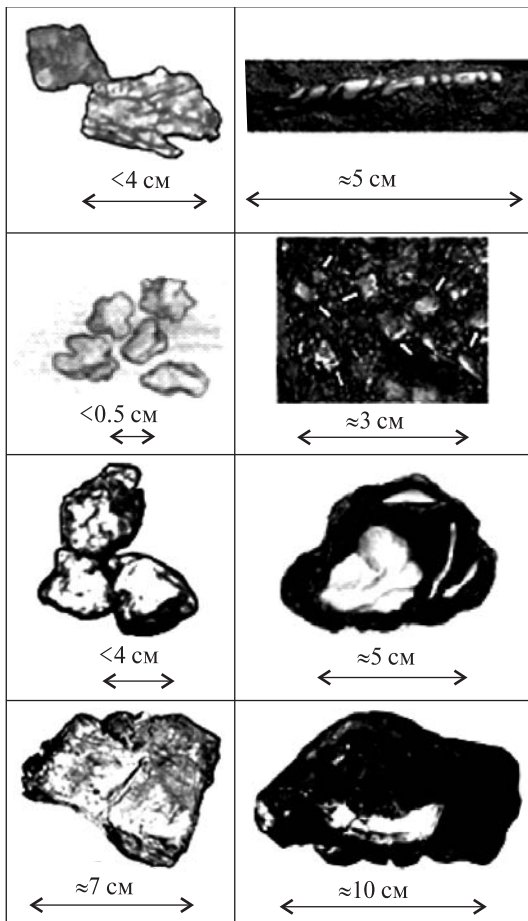
го потока до  $40 \text{ мВт/м}^2$  она уменьшается до 200—250 м, а при значениях потока  $60 \text{ мВт/м}^2$  и более — сокращается до десятков метров. В зонах аномально высоких потоков ( $80\text{—}100 \text{ мВт/м}^2$ ) газогидратный слой, очевидно, полностью отсутствует. Приведенные расчеты показывают, что в глубоководной части Черного моря в придонном слое осадков существует благоприятная термобарическая обстановка для формирования и стабильного существования газогидратов [27].

### **Залежи газогидратов в грязевых вулканах Черного моря**

Развитие грязевых вулканов глубоководной части Черного моря пространственно совпадает с зоной развития газовых гидратов метана. В силу термодинамических причин зона гидратообразования в Черном море — акватория глубже 600—700 м. В большинстве (60 %) грязевых вулканов, развитых глубже 600—700 м были обнаружены газогидраты в составе сопочной брекчии. В ходе многочисленных экспедиций различных организаций и ведомств газогидраты метана были неоднократно подняты ударными гравитационными трубками. [2, 10, 22, 48, 59, 60, 63]. Образец белого мономинерального газогидрата (5—7 см) обнаружен в колонке донных отложений на глубине 2,85 м от поверхности дна на грязевом вулкане Гиресунской впадины [65]. При этом следует отметить, что изучению фактически был доступен только трехметровый слой осадков, в разных интервалах которого попадались газогидратные новообразования.

Облик выделений газогидратов метана довольно разнообразен. В некоторых грязевых вулканах выделения газогидратов детально описаны. Так, А.Н. Стадницкая (2000) изучила морфологию выделений газогидратов метана из сопочной брекчии вулкана Одесса (впадина Сорокина). Агрегаты газогидратов часто образуют неправильные таблитчатые фрагменты размерами до 4 см, скорее всего, останцы жилок или прослойков, массивные таблитчатые агрегаты размером до 7 см, своего рода «ледяные капли» — округлые агрегаты не крупнее 0,5 см, окружающие крупные выделения газогидратов и т.п. (рис. 9). Чаще всего, однако, газогидраты выделяются в виде мелких кристалликов белесого цвета в пустотах сопочной брекчии (рис. 10).

Условием возникновения газогидратов метана являются высокое давление и низкие температуры. Это обуславливает их развитие в зонах вечной мерзлоты или в глубинах морей и океанов. Собственно газогидраты метана — газоносный лед. В одном кубометре льда — 166 кубометров газа. Когда пишут о газогидратных залежах, то имеют в виду породу — песок, песчаник, глину, насыщенную газогидратом метана в разной степени — 10, 20, 30, 40—60 %. Насыщение изменяется в широких пределах. В литературе считается, что породы, насыщенные газогидратами до 60 %, создают непроницаемый покров, под которым накапливаются газы, создающие подгидратные залежи метана. В то же время в локальных точках породы могут выделяться жилки, кристаллики, стяжения чистых газогидратов и т.п., о которых говорилось выше. По колонкам трубок, поднятых из верхних трех метров сопочных покровов, можно только предполагать относительно невысокие содержания газогидратов. Очевидно, более значительные концентрации локализованы глубже. Необходимо определиться, каковы интервалы развития газогидратов, при каких содержаниях газогидратов метана отби-



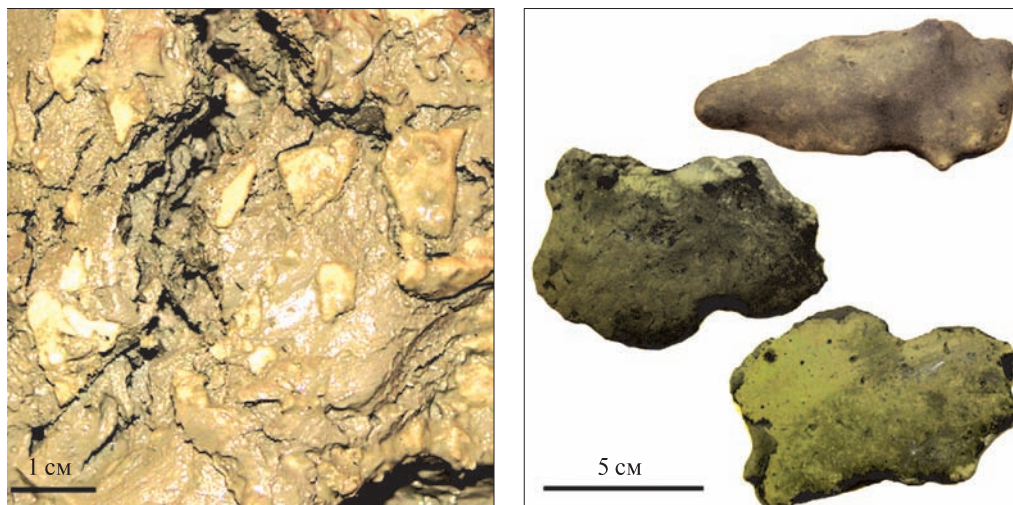
**Рис. 9.** Морфология выделений газогидратов в сопочной брекчии грязевого вулкана Одесса [38]

ваются геофизические границы, такие, как скажем *BSR* (*Bottom Simulating Reflector*). Очень важно путем экспериментов установить критические параметры залежей газогидратов в грязевых вулканах.

Согласно [24], образование газогидратов происходит преимущественно в четвертичных осадках (мощность их в Черноморской впадине 1–3 км). Неогеновые осадки являются вмещителем газогидратов лишь в своде антиклиналей и наблюдались этими авторами в прогибе Сорокина и на восточном склоне Туапсинского прогиба. При этом необходимо учитывать различия в условиях залегания газогидратов в залежах на континентальных склонах и глубоководных участках палеодолин и в залежах вокруг грязевых вулканов. Наши находки разбросаны почти по всем геологическим структурам черноморской акватории: по За-

падночерноморской впадине, прогибам Керченско-Таманскому и Сорокина, Туапсинской и Гиресунской впадинах и др. Объяснение этого противоречия кроется, очевидно, в приуроченности находок газогидратов к сопочной брекчии грязевых вулканов. Эти скопления контролируются кратерным полем грязевых вулканов, они малоглубинные, ибо кровля их располагается практически у дна, они могут иметь значительную газонасыщенность. Газогидраты выпадают из фильтрующих газонасыщенных вод, образуясь из растворенного в воде газа.

Грязевые вулканы, учитывая их глубинное заложение [11, 12, 25] формируются, скорее всего, за счет мантийных плюмов и глубинной подпитки углеводородными газами. В условиях глубоководного моря это приводит к образованию залежей углеводородов на разных этажах осадочного чехла (при термодинамически доступных условиях) и, в частности, близповерхностных залежей газогидратов метана. Иногда они носят характер кольцевых залежей, как например, в вулкане Хаакон-Мосби в Норвежском море [37] и в черноморском вулкане Двуреченского [46]. При этом распределение газовых выходов в грязевом вулкане и возле него далеко не идеально и зачастую носит случайный характер. Возникновение компенсационных прогибов вблизи вулканов вызывает многочисленные нарушения сплошности пород, через которые устремляются газы и флюиды. Именно нарушенность пород вершин антиклиналей, на которых развиты грязе-



**Рис. 10.** Включения газогидратов в сопочной брекчии грязевого вулкана Водяницкого. По материалам рейса НИС "Метеор", 2002. (Bohrman G., Schenck, 2002)

вые вулканы, может во многом определять распределение залежей газогидратов — наиболее насыщенных газогидратами участков пород.

По результатам изучения грязевого вулкана Хаакан-Мосби можно предполагать существование кольцевых залежей газогидратов и вокруг глубоководных грязевых вулканов Черного моря. Очевидно, они характеризуются нарушениями в местах развития компенсационных прогибов, где мощность залежи или концентрация могут даже возрастать. К сожалению, для Черного моря пока нет никаких данных, позволяющих оконтурить залежи по содержанию газогидратов в породах. Можно только предполагать уменьшение насыщения пород газогидратами по мере удаления от зоны каналов поступления газов грязевых вулканов. Но провести четкие границы пока нет возможности, ибо неясно, при каких содержаниях газогидратов возможна их добыча из породы. Все это еще предстоит уточнить. Надо помнить, что находка одного агрегата газогидрата — это еще далеко не приемлемая залежь или свидетельство наличия залежи. Можно предполагать развитие кольцеобразных залежей внешним диаметром в первые километры и глубинами в сотни метров в зависимости от величины теплового потока во многих глубоководных грязевых вулканах Черного моря.

Как уже отмечалось, возникновение просадочных компенсационных прогибов — закономерность развития грязевых вулканов в морской среде. В условиях Черноморского бассейна, унаследованного от Тетиса, большая часть вулканов в акватории моря, можно предполагать, эпизодически функционирует в течение как минимум неогена, вплоть до настоящего времени. Иными словами, компенсационные прогибы должны быть заполнены теми неогеновыми и четвертичными осадками, в периоды накопления которых, грязевые вулканы активно работали. Трудно предполагать их иной характер деятельности, учитывая наблюдаемые последствия в Керченско-Таманском регионе или в геологической истории Черного моря. Колебания уровня моря были велики, но касались, главным образом, верхних двухсот метров водной толщи. Основная масса ныне

наблюдаемых грязевых вулканов оставалась под водой. Глубины моря существенно менялись, но водный покров оставался. Возникновение компенсационных прогибов в случае деятельности грязевых вулканов происходило неизбежно, равно как и накопление осадков в них. Весьма вероятно преобладание в разрезе отложений морских компенсационных прогибов глинистых пород, чередующихся с насыщенными гидратами породами. Осадки, очевидно, отразят особенности седиментации в разных районах и зонах палеоморя: в мелководных районах — накопление более грубозернистых, хемогенных или карбонатных, в глубоководной зоне — более тонкозернистых осадков.

Надо полагать, возникновение таких же компенсационных прогибов вероятно и в Каспийском море, где многочисленны крупные грязевые вулканы, да и вообще в тех районах Мирового океана, где обнаружены грязевые вулканы, например, в Средиземном море, в Атлантике, районе острова Тринидада и в других местах.

Компенсационные прогибы глубоководных грязевых вулканов, скорее всего, могут нести полезную нагрузку. Грязевые вулканы постоянно выбрасывают природные газовые смеси в виде фонтанов где-то в центре или в ослабленных зонах близ вулканов. Компенсационные прогибы являются именно такими ослабленными зонами. Поэтому при глубинах более 600—700 м, когда создавались благоприятные для образования газогидратов давления и температуры, именно в компенсационных структурах вероятнее всего имело место наиболее мощное накопление газогидратов из природной смеси газов — метана, уголекислоты, сероводорода. Концентрация газогидратов вероятно повсеместно вокруг грязевого вулкана, но именно в компенсационных прогибах, скорее всего, происходит самое значительное их накопление, это своего рода ловушки.

В этом плане небезынтересно заключение А.И. Конюхова, М.К. Иванова, Л.М. Кульницкого (1990) по результатам изучения грязевого вулкана Московский Университет: «На вершине вулкана Московский Университет поиски газогидратов велись еще в 1988 г. сразу после его открытия не только сотрудниками МГУ, но и одной из морских геологических партий объединения «Южморгеология». Все они оказались безрезультатными, несмотря на то, что были подняты и просмотрены десятки колонок. По-видимому, газогидраты здесь приурочены к узким зонам, где на поверхность выходит собственно сопочная брекчия, т.е. там, где продолжается активный грязевой вулканизм. А так как этот процесс узлокализован, то и зона развития газогидратов весьма ограничена по площади и вероятно связана с деятельностью не центрального, а какого-то периферийного кратера в западной части вершины вулкана».

Надо полагать, такой узкой зоной развития газогидратов метана является зона компенсационного прогибания, к которой и приурочено развитие газогидратов. Мощность отложений в Новоселовской впадине на Керченском полуострове достигает 211 м. Можно допускать существование не меньших по мощности глинисто-газогидратных отложений в компенсационных прогибах близ крупных грязевых вулканов Черного моря. Близ грязевых вулканов в разрезе современных черноморских осадков резко увеличивается мощность гидротроилитовых илов, что свидетельствует о повышенном поступлении сероводорода из недр. Отсюда и вероятность возникновения газогидратов сероводорода. Впрочем, наиболее вероятны только метаногидраты. При этом не приходится

исключать налипание глинистых частиц на пузырьки газа и оседания даже более легких гидратов  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  на дно.

Детальное изучение некоторых гидроакустических профилей черноморского дна позволяет зафиксировать небольшие прогибы-грабены на разрезах многих грязевых вулканов. Просмотр публикаций позволяет обнаружить такого рода компенсационные прогибы или даже грабены, например, в материалах по Черному морю и других авторов. Компенсационные прогибы — это своего рода ловушки для газогидратов.

Развитие просадочных явлений можно наблюдать на многих вулканах. Такие просадочные прогибы неоднократно фиксировались на черноморских вулканах [8; 9; 10]. Можно предполагать, что залежи газогидратов метана локализируются вокруг мощного центрального канала грязевого вулкана. Примером является рассмотренный выше хорошо изученный грязевой вулкан Хаакан-Мосби в Норвежском море. В условиях Черного моря в зависимости от мощности газопотока по центральному каналу возможны как большие по размерам, так и более мелкие залежи. Возможно, залежами газогидратов являются все сооружения сопочной брекчии морских грязевых вулканов, а они достигают 150 м в высоту и диаметром даже до 4 км. Но вряд ли сопочная брекчия — единственное сосредоточение газогидратов, скорее всего они проникают и в окружающие породы.

Японские исследователи сообщили, что добыча метана газогидратов оказалась неосуществимой из-за того, что трубы забиваются песком. С геологической точки зрения можно сделать вывод о том, что разрабатывались песчаники, цементом которых служат газогидраты. Разрушение газогидратов приводит к возникновению песчаной смеси, которая увлекалась газом.

В условиях черноморских вулканов какая-то, возможно значительная часть газогидратов локализована в сопочной брекчии в виде выделений, отложений, кристаллических налетов и т.п. Пока что установлены их невысокие содержания. К наиболее насыщенным газогидратам относятся донные осадки грязевого вулкана Печори (Грузинский сектор), где местами осадок характеризуется наличием значительного количества прослоев твердых газогидратов [10]. Во всех других случаях это первые проценты общей массы осадка. Следует отметить при этом, что речь идет только о верхних трех метрах осадка. Возможно, с глубиной содержание газогидратов может возрастать.

Видимо все постройки грязевых вулканов в глубоководной части Черного моря могут представлять потенциальные залежи газогидратов. Поэтому для их освоения необходимы другие технологические решения, в частности, отработка извлечения газогидратов из сопочной брекчии. Однако локализация газогидратов только в составе сопочной брекчии вулканов маловероятна. Наверняка диффузионное наполнение газами и, как следствие, возникновение газогидратов охватывает прилегающие к вулканическим постройкам породы, а они достаточно разнообразны. Поэтому будут необходимы более широкие технологии извлечения газогидратов из разнообразных осадков и пород черноморского разреза.

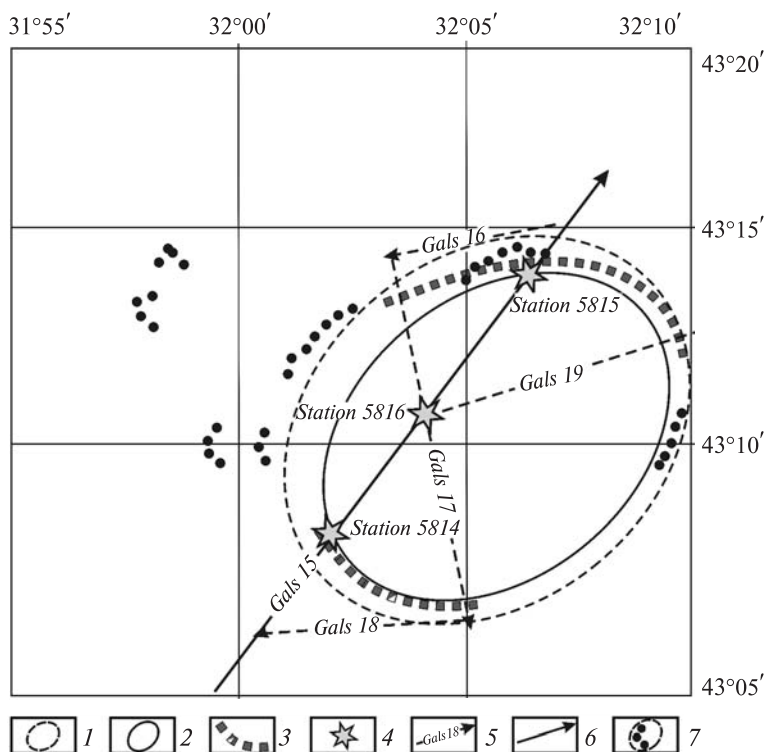
Наибольший интерес при работе в акватории Черного моря представляет, скорее всего, не современная деятельность грязевых вулканов, а достаточно древние очаги, функционирующие, скажем, с неогена. В этом случае ложнотектонические компенсационные структуры могут достигать значительных размеров и накапливать содержащие газогидраты осадки значительной мощности.

Выходы газов вокруг грязевых вулканов не обязательно локализованы только в прогибах — компенсационных синклиналиях, а развиты зачастую на большей площади, поэтому образование газогидратов также не будет ограничиваться этими прогибами. В компенсационных прогибах вероятны просто более мощные и, возможно, более древние скопления газогидратов. Поскольку газогидраты довольно четко реагируют на изменения температурного режима, весьма вероятно, что они могут не сохраняться в разрезах неогеновых отложений. Этот вопрос подлежит дальнейшему изучению.

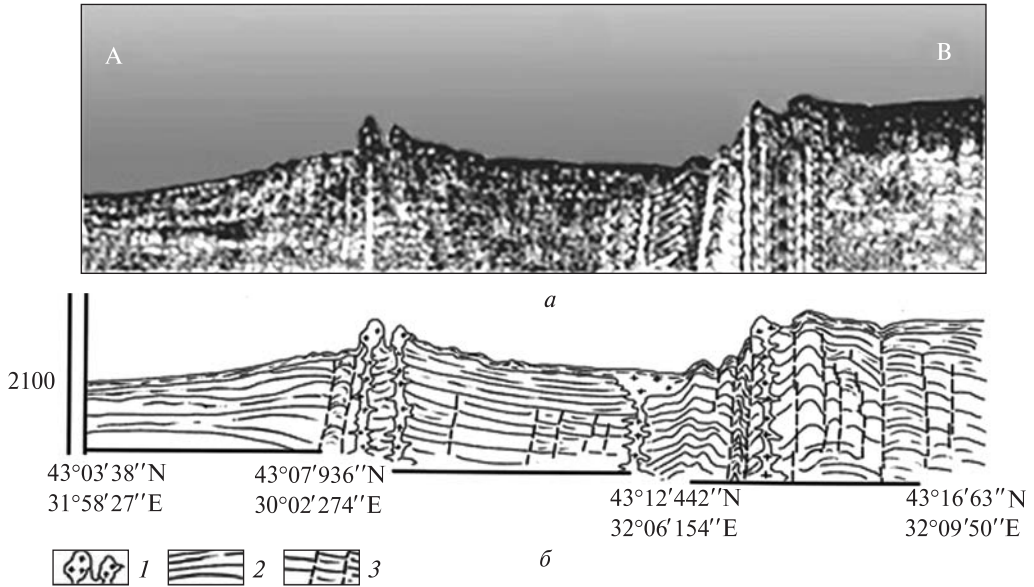
### Кольцевая структура в центральной части Западночерноморской впадины

Особый интерес представляет крупная кольцевая структура в центральной части Западночерноморской впадины, выявленная во время рейсов НИС «Киев» и «Профессор Водяницкий» [54, 52]. Характеристика ее в общих чертах представлена на рис. 11 и 12.

Кольцевая структура была пересечена несколько раз галсами разных направлений и зафиксирована на эхограммах как овальная котловина, обрамленная ступенчатыми уступами высотой до 30—70 м. Рельеф пониженной центральной час-



**Рис. 11.** Схема прохождения галсов промера Кольцевой морфоструктуры [53]. 1 — внешние границы морфоструктуры; 2 — границы внутренних уступов; 3 — границы морфоструктуры, установленные; 4 — станции пробоотбора; 5 — маршруты промера и номеров галсов; 6 — линия профиля гидроакустического промера ГАК "Бук" в рейсе НИС "Киев"; 7 — уступы выявленные во время выполнения 69-го рейса НИС "Профессор Водяницкий"



**Рис. 12.** Акустический профиль через Кольцевую структуру в Западночерноморской впадине (а) и его геологическая интерпретация (б) [53]

ти котловины осложнен серией небольших и невысоких холмов (до 5–10 м). Диаметр котловины достигает по удлинению овала 6,5 миль (примерно 12 км) [52].

Несколько донных трубок, позволивших взять в котловине колонки донных осадков длиной до 4 м, вскрыли необычный разрез, в частности три цикла накопления гидротроилитовых илов (0,97–1,45 м, 1,55–2,10 м, 2,22–3,0 м), перекрытые сверху сапропелями и сапропелевыми илами (0,28–0,7 м) и кокколиновыми илами (рис. 13). Типичная сопочная брекчия не встречается. Сходные разрезы с увеличенными мощностями гидротроилитовых илов мы встречали раньше на некоторых крупных грязевых вулканах.

К настоящему времени большинство исследователей признают, что кольцевые структуры могут иметь самое различное происхождение: тектоническое, магматическое (в том числе грязевулканическое), метаморфическое, импактное и пр. Возможны разные объяснения природы кольцевой структуры. По ряду косвенных признаков можно предполагать грязевулканическое происхождение выявленной морфоструктуры. Об этом свидетельствует рельеф, специфическая слоистость и дислоцированность осадков, наблюдавшаяся на разрезе, полученном гидроакустическим комплексом «Бук» на НИС «Киев», некоторые литологические признаки, высокая газонасыщенность илов [50]. Интенсивная дегазация поднятых осадков свидетельствует о том, что днище котловины представляет собой т. н. «газовое болото», что характерно для грязевулканических полей и газонасыщенных илов Черного моря. Возможная геологическая интерпретация акустического профиля, позволяет предполагать наличие нескольких грязевых вулканов на вершине крупной очень пологой положительной структуры.

По своим геоморфологическим и структурным особенностям выявленная кольцевая морфоструктура напоминает Булганакский грязевулканический очаг на Керченском полуострове. Отчетливо сопоставимы краевые валы и уступы,

окаймляющие обе котловины, мелкосопочный рельеф котловины, создаваемый грязевыми вулканами. Весьма вероятно возникновение котловины в результате мощных и длительных грязевулканических процессов. Возможно, этим объясняется и прогнутый характер центральной части округлой котловины, сопоставимой с огромной структурой проседания (вдавленной синклиналию). Судя по наличию вблизи котловины целого ряда конических холмов на дне, это целая новая область грязевых вулканов [44].

Следует отметить, что рассматриваемая кольцевая морфоструктура пространственно расположена над одним из крупных выступов домелового фундамента, вероятно разуплотненных кристаллических и метаосадочных пород (рис. 14). Связь этих выступов с восходящими потоками глубинных флюидов в зависимости от конкретных структурно-тектонических и формационных условий подтверждаются теми или иными признаками их взаимодействия с осадочным чехлом (грязевой вулканизм и различные проявления диапиризма, формирование газогидратных скоплений и др.) [29]. Таким образом, рассматриваемая кольцевая морфоструктура, скорее всего, была сформирована в результате неоднократных проявлений мощных грязевулканических процессов, которые являются результатом струйной миграции мантийных флюидов в разуплотненные зоны в кристаллическом фундаменте вдоль разломов различного масштаба.

Среди различных механизмов формирования подобного рода донных кольцевых структур наиболее приемлемой на наш взгляд является газифлюидно-диапировая модель по [61], детально рассмотренная в работе [43]. Под воздействи-

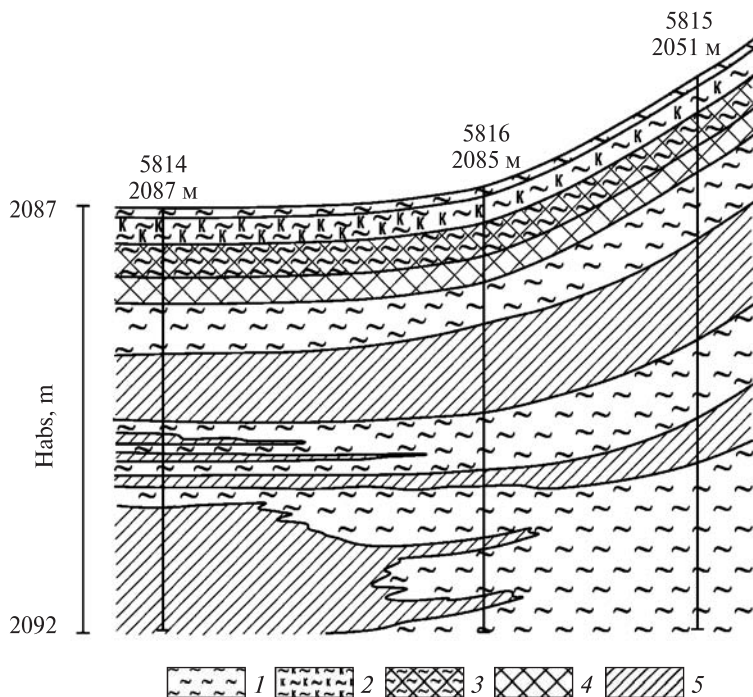
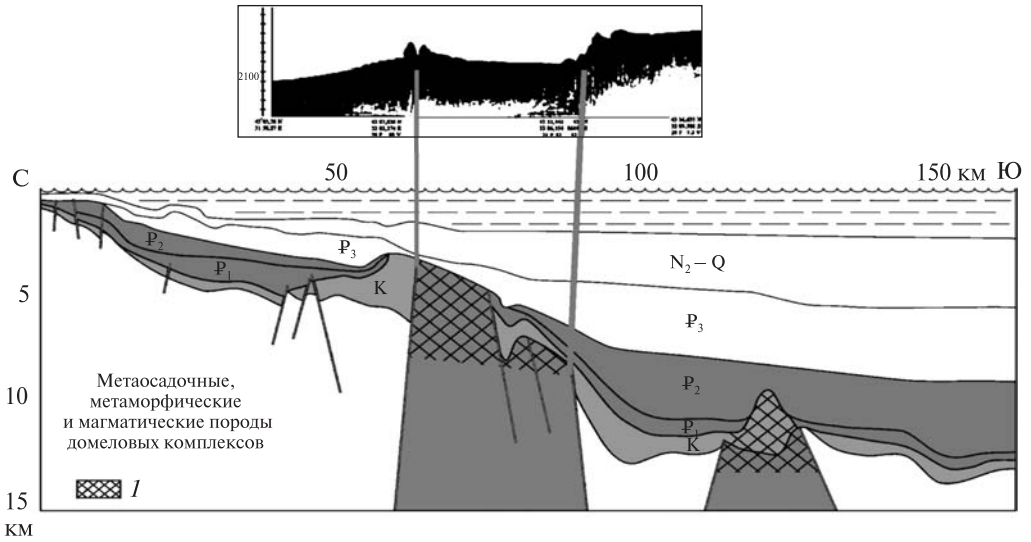


Рис. 13. Литологический разрез через морфоструктуру [10]: 1 — ил; 2 — ил кокколитовый; 3 — ил сапропелевидный; 4 — сапропель; 5 — гидротроилитовый ил





**Рис. 14.** Морфология домеловых формаций в Западночерноморской впадине (Лукин, 2006) и эхограмма (вверху) кольцевой морфоструктуры дна; *I* — массивные залежи УВ в разуплотненных породных массивах

ем гидростатических сил газифлюидный диапир нарушает целостность вышележащей осадочной толщи и устремляется к поверхности морского дна. Его выход сопровождается грязевулканической активностью и последующим проседанием центральной части поверхности морского дна за счет разжижения и вымывания осадков придонными течениями. В тектоническом отношении Кольцевая структура находится в пределах Трансчерноморского Одесско-Синопского разлома (см. рис. 1), где домеловые отложения образуют поднятия, осложненные серией разрывных нарушений, над которыми зафиксированы десятки грязевых вулканов. Можно предположить, что глубокие корни этой морфоструктуры в виде газифлюидоподводящих каналов непосредственно связаны с линейной Трансчерноморской Одесско-Синопской глубинной разломной зоной.

Особенности формирования и геодинамической эволюции Черноморской мегавпадины позволяют предполагать широкое развитие таких разуплотненных зон в разновозрастном кристаллическом фундаменте, связанных с зонами рифтогенных разломов, а на локальном уровне — с разнообразными проявлениями термоусадки и тектонокессонного эффекта, обусловленного тектоническим воздыманием отдельных блоков фундамента и формированием интрузий [28]. Именно проявления термоусадки и тектонокессонного эффекта являются следствием формирования в вышележащих постмеловых отложениях своеобразных концентрических каналов — трубок дегазации. Последняя проявилась в рельефе дна в виде концентрического обрамления по серии неотектонических нарушений вплоть до современных отложений. Следует ожидать в пределах Одесско-Синопской разломной зоны обнаружения ряда подобных структур.

Учитывая уже отмеченную связь газогидратов с деятельностью грязевых вулканов, наличие постоянной газоотдачи в котловине изученной морфоструктуры, можно предполагать существование в ее пределах обширной газогидратной залежи.

## Заключение

Грязевые вулканы Черного моря по современным геофизическим материалам и данным исследований флюидогенной минерализации сопочной брекчии являются глубинными образованиями. Деятельность грязевых вулканов Черного моря по аналогии с данными по грязевым вулканам Азербайджана, Керченско-Таманского и других регионов сопровождается выбросами огромных масс сопочных газов, сопочной брекчии, обломочного материала, что создает в недрах вулканов своего рода дефицит масс и приводит к возникновению просадочных явлений в виде прогибов-грабенов. В условиях суши эрозионные процессы как бы маскируют и снижают масштабы просадочных явлений, но в условиях морской среды эти грабены заполняются морскими осадками, создающими дополнительный пресс для их проседания. Возникают своего рода ложные компенсационные синклинали.

В современном Черном море большая часть вулканов приурочена к глубоководной части моря. Грязевые вулканы, лежащие на глубинах больше 600 м, располагаются в термодинамически благоприятной для гидратообразования метана зоне. В 60 % вулканов в составе сопочной брекчии обнаружены в верхнем слое кристаллы и скопления газогидратов. Грязевые вулканы фактически являются поисковым критерием для обнаружения залежей газогидратов метана.

В норвежском вулкане Хаакон-Мосби залежь газогидратов образует гигантский «бублик». Можно ожидать подобные кольцевые формы залежей и в черноморских вулканах. При этом в просадочных грабенах в силу многих нарушений пород вероятно наиболее значительное накопление газогидратов. Это своего рода газогидратная ловушка, где слои газогидратов (насыщенных газогидратами осадков или сопочной брекчии) чередуются с безрудными слоями. Такого рода явления вероятны не только в Черном море, но и во многих других районах развития грязевых вулканов в Мировом океане. Представляется, что кольцевые залежи газогидратов развиты в грязевых вулканах глубокого моря повсеместно и их обнаружение — это вопрос времени.

Следует также отметить, что возникновение и затухание подводной газогрязевой разгрузки и формирование скоплений гидратов метана в донных осадках соответствующих морфоструктур морского дна непосредственно связано с геодинамической активностью, проявляющейся в повышенной сейсмичности Азово-Черноморского региона.

В соответствии с намечаемыми задачами освоения газогидратов метана в глубоководной части Черного моря необходимо запланировать и провести детальное специальное геолого-геофизическое изучение грязевых вулканов, как базы для последующего бурения скважин в их пределах. По нашему мнению, освоение газогидратов невозможно без экспериментального бурения глубоководных и глубоких скважин на выбранных грязевых вулканах. Именно скважины помогут решить вопрос о возможности промышленного освоения газогидратов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Дадашев Ф.Г. и др. Атлас грязевых вулканов мира. Баку: Nafta Press, 2015. 323 с.
2. Бяков Ю.А., Круглякова Р.П. Газогидраты осадочной толщи Черного моря — углеводородное сырье будущего. *Разведка и охрана недр*. 2001. № 8. С. 14—19.
3. Гаврилов Я.В. Принцип изостазии в образовании грязевых вулканов. Баку: Изд-во Аз. ФАН. 1939.
4. Гинзбург Г.Д., Грамберг И.С., Гулиев И.С., Гусейнов Р.А., Дадашев А.А., Иванов В.Л., Кротов А.Г., Мурадов Ч.С., Соловьев В.А., Телепнев Е.В. Подводно-грязевулканический тип скоплений газовых гидратов. *ДАН СССР*. 1988. **300**, № 2. С. 416—418.
5. Гинзбург Г.Д., Кремлев А.Н., Григорьев М.Н., Ларкин Г.В., Павленкин А.Д., Салтыкова Н.А. Фильтрогенные газовые гидраты в Черном море (21-й рейс НИС «Евпатория»). *Геология и геофизика*. — 1990. № 3. С. 10—20.
6. Гинзбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты / под ред. В.Л. Иванова. Всерос. науч.-исследов. ин-т геологии и минеральных ресурсов Мирового океана. ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург. 1994. 199 с.
7. Гинтов О.Б., Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Муровская А.В. Некоторые особенности строения мантии Восточного Средиземноморья и их геодинамическая интерпретация. *Геофиз. журнал*. 2016. №1. С. 17— 29.
8. Гончар А.И., Писанко И.Н., Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Шнюков Е.Ф. Подводный грязевой вулканизм Азово-Черноморского бассейна. *Гідроакустичний журнал*. 2004. № 1. С. 70— 83.
9. Горчилин В.А., Лебедев Л.И. О признаках газогидратов в осадочной толще Черного моря и возможном типе ловушек углеводородов. *Геол. журн*. 1991. № 5. С. 75—81.
10. Грязевые вулканы Черного моря (каталог). Е.Ф. Шнюков, Л.В. Ступина, Е.Н. Рыбак и др. К.: ГНУ ОМГОР, Логос, 2015. 259 с.
11. Дмитриевский А.Н. Формирование энергоактивных и флюидонасыщенных зон Земли. *Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды, нефть и газ, углеводороды и жизнь*. М.: Геос, 2010. С. 5—6.
12. Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М. Флюидогеодинамические и генетические аспекты гидратоносности разреза осадков дна Мирового океана. *Геодинамика и нефтегазоносные структуры Черноморско-Каспийского региона*. 2002. С. 58—59.
13. Дмитриевский А.Н., Баланюк И.Е. Газогидраты морей и океанов — источник углеводородов будущего. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2009. 416 с.
14. Довгий С.А., Гайдук О.В., Шнюков Е.Ф., Старостенко В.И., Гожик П.Ф., Коболев В.П., Лейбзон А.Я., Радчук В.В. Прикладные геолого-геофизические исследования по маршрутам проектируемых подводных линий связи в Черном море. *Геофиз. журнал*. 2003, №2. С. 3—7.
15. Ефремова А.Г., Гритчина Н.Д. Об открытии газовых гидратов на дне Южного Каспия. *Геол. нефти и газа*. 1981. №2. С. 32—35.
16. Иванов М.К., Конюхов А.И. Грязевые вулканы в глубоководной части Черного моря. *Вестник МГУ. Сер. геол.* 1989. № 3. С. 21—31.
17. Исмагилов А.Ф., Козлов В.Н., Терехов А.А., Хортов А.В. Глиняный диапиризм и грязевой вулканизм при формировании локальных структур в Российской части Черного моря. *Геология, геофизика и разработка нефть. и газовых м-ний*. 2006. № 2. С. 4—10.
18. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 236 с.
19. Коболев В.П. Термодинамические условия гидратообразования в Черном море. *Геология. Гирництво. Нафтогазова справа. Енергетика*. 2014. №1(3). С. 126—141.
20. Коболев В.П. Структурно-тектонические и флюидо-динамические аспекты глубинной дегазации мегавпадины Черного моря. *Mining of Mineral Deposits*. 2017. V. 11, № 1. С. 31—49.
21. Коболев В.П., Верпаховская А.О. Скопления газовых гидратов в палеодельте Днепра как объект сейсмических исследований на склоне северо-западного шельфа Черного моря. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2014. №1. С. 81—93.

22. Конюхов А.И., Иванов М.К., Кульницкий Л.М. О грязевых вулканах и газовых гидратах в глубоководных районах Черного моря. *Литология и полезные ископаемые*. 1990. № 3. С. 12—23.
23. Ковалевский С.А. Газовый вулканизм (вулканы и вулканоиды). *Азерб. нефт. хоз-во*. № 1. 1935. 40 с.
24. Корсаков О.Д., Бяков Ю.А., Ступак С.Н. Газовые гидраты Черноморской впадины. *Сов. геология*. 1989. № 12. С. 4—10.
25. Кропоткин П.Н., Валяев Б.М. Геодинамика грязевулканической деятельности (в связи с нетегазоносностью). *Геологические и геохимические основы поисков нефти и газа*. К.: Наук. думка, 1980. С. 148—178.
26. Круглякова Р.П., Круглякова М.В., Шевцова Н.Т. Геолого-геохимическая характеристика естественных проявлений углеводородов в Черном море. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2009. №1. С. 37—51.
27. Кутас Р.И., Кобелев В.П., Цвященко В.А., Кравчук О.П., Бевзюк М.И. Геотермические аспекты образования газогидратов в Черноморской впадине. *Геофиз. журнал*. 1996. 18, № 3. С. 20—27.
28. Лукин А.Е. Литогеодинамические факторы нефтегазонакопления в авлакогенных бассейнах. — К.: Наук. думка, 1997. — 224 с.
29. Лукин А.Е. Создание учения о нефтегазоносных кристаллических массивах — насущная проблема геологии XXI века. *Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина)*. М.:ГЕОС. 2011 С. 405—441.
30. Лычагин Г.А. Ископаемые грязевые вулканы Керченского полуострова. *БМОИП. Отд. геол.* 1952. 27. Вып. 4. С. 3—13.
31. Мейснер Л.Б., Туголесов Д.А. Флюидогенные деформации в осадочном выполнении Черноморской впадины. *Разведка и охрана недр*. 1997. № 7. С. 18—21.
32. Милановский С.Ю., Николаевский В.Н. Процессы переноса (миграции) трещин земной коры. *Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур «Сейсмо-2012»*. 2012. С. 1—8.
33. Плотников А.М. Потери углеводородов на грязевых вулканах Керченского полуострова. *Геология и нефтегазоносность Причерноморской впадины*. К.: Наук. думка. 1967. С. 72—81.
34. Попков В.И., Соловьев В.А., Соловьева Л.П. Газогидраты — продукт глубинной дегазации Земли. *Геология, география и глобальная энергия*. 2012. № 3 (46). С. 56—67.
35. Прокопов К.А. Геотектонический очерк Керченского полуострова и отношение его к Крыму и Тамани. *Тр. Гл. геол.-развед. упр.* 1931. Вып. 38. С. 13—23.
36. Рахманов Р.Р. Грязевые вулканы и их значение в прогнозировании газонефтеносности недр. М.: Недра, 1987. 174 с.
37. Соловьев В.А. Газогидратоносность недр Мирового океана. *Газовая промышленность*. 2001. № 12. С. 19—23.
38. Стадницкая А.Н., Беленькая И.Ю. Состав и происхождение углеводородных газов и их влияние на диагенетические карбонатообразования (прогиб Сорокина, СВ часть Черного моря). *Геология Черного и Азовского морей*. К.: Гносис, 2000. С. 155—163.
39. Старостенко В.И., Макаренко И.Б., Русаков О.М., Пашкевич И.К., Кутас Р.И., Легостаева О.В. Геофизические неоднородности мегавпадины литосферы Черного моря. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 5. С. 3—20.
40. Суетнова Е.И. Аккумуляция газовых гидратов в окрестности подводных грязевых вулканов. *Геофизические исследования*. 2016. Т. 17. № 4. С. 39—48.
41. Трофимук А.А., Макогон Ю.Ф., Толкачев М.В. О роли газогидратов в процессах аккумуляции и формирования их залежей. *Геология и геофизика*. 1983. № 6. С. 3—15.
42. Туголесов Д.А., Горшков А.С., Мейснер Л.Б. и др. Тектоника мезозойских отложений Черноморской впадины. М.: Недра, 1985. 215 с.
43. Шестопалов В.М., Макаренко А.Н. О некоторых результатах исследований, развивающих идею В.И. Вернадского о газовом дыхании Земли. *Геол. журн.* 2013. № 3. С. 7—25.
44. Шнюков Е.Ф. Грязевые вулканы Черного моря как поисковый признак газогидратов метана. *Laplambert Academic Publishing*. 2017. 48 с.

45. Шнюков Е.Ф., Горячкин Ю.Н., Кондратьев С.И. Содержание сероводорода, фосфатов и кремнекислоты в придонных водах Черного моря над грязевыми вулканами. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2006. №1. С. 55—64.
46. Шнюков Е.Ф., Зиборов А.П. Минеральные богатства Черного моря. К.: «Карбон-Лтд». 2004. 280 с.
47. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Пасынков А.А. Газовый вулканизм Черного моря. К.: Логос, 2013. 384 с.
48. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П. Геолого-геофизические исследования в 61-ом рейсе НИС «Профессор Водяницкий» в Черном море. *Геофиз. журнал*. 2004. Т. 26. №6. С. 185—189.
49. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П. Газогидраты Черного моря — потенциальный источник энергии. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2017. № 3. С. 5—23.
50. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Стажилов А.Г. и др. Геология Черного моря. К.: ОМГОР НАН Украины, 1997. 88 с.
51. Шнюков Е.Ф., Нетребская Е.Я. Корни Черноморских грязевых вулканов. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2013. № 1. С. 87—92.
52. Шнюков Е.Ф., Старостенко В.И., Коболев В.П., Корчагин И.Н., Кутас Р.И., Русаков О.М. Геолого-геофизические исследования в 59-ом рейсе НИС «Профессор Водяницкий» в Черном и Эгейском морях. *Геофиз. журнал*. 2004. № 4. С. 116—132.
53. Шнюков Е.Ф., Старостенко В.И., Пасынкова А.А. и др. Локальная кольцевая структура в центральной части Черного моря. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2005. №2. С. 76—81.
54. Шнюков Е.Ф., Щипцов А.А., Иванников А.В. и др. Геологические исследования НИС «Киев» в Черном море (4-й рейс). К.: ОМГОР ЦНПМ НАНУ. 1996. 234 с.
55. Щebetов А. Месторождения газовых гидратов: ресурсы и возможные методы разработки. *Нефть и Капитал*. 2006. № 4. С. 12—15.
56. Яновская Т.Б., Гобаренко В.С., Егорова Т.П. Строение подкоровой литосферы Черноморского бассейна по сейсмологическим данным. *Физика Земли*. 2016. №1. С. 15—30.
57. Aloisi G., Drews M., Wallmann K., Bohrmann G. Fluid expulsion from the Dvurechenskii mud volcano (Black Sea) Part I. Fluid sources and relevance to Li, B, Sr, I and dissolved inorganic nitrogen cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 225 (2004). 347— 363.
58. Blinova V. N., Ivanov M. K., Bohrmann G. Hydrocarbon gases in deposits from mud volcanoes in the Sorokin Trough, north-eastern Black Sea. *Geo-Mar. Lett.*, 2003. (23). P. 250—257.
59. Bohrmann, G., Ivanov M., Foucher J.-P., Spiess V., Bialas J., Greinert J., Weinrebe W., Abegg F., Aloisi G., Artemov Y., Blinova V., Drews M., Heidersdorf F., Krabbenhoft A., Klauke I., Krastel S., Leder T., Polikarpov I., Saburova M., Schmale O., Seifert R., Volkonskaya A., Zillmer M. Mud volcanoes and gas hydrates in the Black Sea—New data from Dvurechenskii and Odessa mud volcanoes. *Geo Mar. Lett.* 2003. 23. P. 239—249.
60. Bohrmann G., Akarsu E., Bar A. et al. Origin and distribution of methane and methane hydrates in the Black Sea. Cruise № 84, leg 2. Istanbul. 2011. 59 p.
61. Cathles L. M., Sub Zheng, Chen Duofu. The physics of gas chimney and pockmark formation, with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration. *Marine and Petroleum Geology*. 2010. Vol. 27, Issue 1. P. 82—91.
62. Davie M.K., Buffett B.A. A numerical model for the formation of gas hydrate below the seafloor. *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № B1. P. 497—514.
63. Ivanov M.K., Limonov A.F., van Weering Tj.C.E. Comparative characteristics of the Black Sea and Mediterranean Ridge mud volcanism. *Marin Geology*. 1997. Vol. 132. P. 253—271.
64. Krastel S., Spiess V., Ivanov M., Weinrebe W., Bohrmann G., Shashkin P., Heidersdorf F. Acoustic investigations of mud volcanoes in the Sorokin Trough, Black Sea. *Geo-Mar Lett.*, 2003. 23. P. 230—238.
65. Kruglyakova R.P., Byakov Y.A., Kruglyakova M.V., Chalenko L.A. and Shevtsova N.T. Natural oil and gas seeps on the Black Sea floor. *Geo-Marine Letters, An International Journal of Marine Geology*. Springer—Verlag: 2004.

Статья поступила 10.01.2018

*Е.Ф. Шнюков, В.П. Коболєв*

#### ГРЯЗЬОВУЛКАНІЧНІ ПОКЛАДИ ГАЗОГІДРАТІВ МЕТАНУ В ЧОРНОМУ МОРІ

У статті обговорюються питання утворення особливого грязьовулканічного типу газогідратних скупчень у глибоководній частині Чорного моря. Основні положення базуються на результатах геолого-геофізичних досліджень грязьових вулканів, виконаних протягом 1970—2015 рр. у численних науково-дослідних рейсах. Зіставлення підводних грязьових вулканів Чорного моря з їхніми суходпутними аналогами свідчить про можливе нагромадження кільцевих покладів газогідратів метану в компенсаційних прогинах, аналогічних керченським «вдавленим синкліналям».

**Ключові слова:** *грязьові вулкани, компенсаційні прогини, поклади газогідратів, Чорне море.*

*Ye.F. Shnyukov, V.P. Kobolev*

#### MUD DEPOSITS OF METHANE GASHYDRATES IN THE BLACK SEA

The article discusses the formation of a special mud-volcanic type of gas hydrate accumulations in the deep-water part of the Black Sea. The main conclusions are based on the results of geological and geophysical studies of mud volcanoes, carried out during 1970—2015 years in multiplicity scientific research voyage. Comparison of the underwater mud volcanoes of the Black Sea with their land analogues indicates a possible accumulation of ring deposits of methane gas hydrates in compensatory deflections like the Kerch «pressed synclines».

**Keywords:** *mud volcanoes, compensatory deflections, deposits of gas hydrates, the Black Sea.*