
<https://doi.org/10.15407/gpimo2019.01.016>

Е.Н. Рыбак, Л.В. Ступина

ГНУ «Центр проблем морской геологии, экологии
и осадочного рудообразования» НАН Украины, Киев

ПОКМАРКИ ЧЕРНОГО МОРЯ

В статье рассмотрены существующие модели формирования покмарков, процессы и структуры, их образующие. Особое внимание уделено закономерностям их развития в Черном море, формам, размерам и особенностям, которые представляют интерес для дальнейшего изучения в связи с их потенциальным поисковым признаком на углеводороды.

Ключевые слова: Черное море, покмарки, газовыделения.

Введение

Результаты исследований последних десятилетий позволяют говорить о Черном море как о крупнейшем на Земле метановом водоеме. Развитие исследований в области морской геологии привело к открытию разных типов источников метана. Среди них интересными объектами оказались покмарки (англ. — оспины, выбоины) или блюдцеобразные, кратероподобные понижения в рельефе (рис. 1) [6]. На суше такие формы рельефа называют западинами.

Согласно общепринятому определению, покмарки представляют собой круглые или продолговатые депрессии, обычно образующиеся в рыхлых, тонкозернистых осадках за счет эпизодического выброса газа, главным образом метана. Очевидным есть то, что места дегазации фиксируются положительными или отрицательными формами рельефа, в зависимости от того, какого рода материал выносятся вместе с потоком газа. Если из глубинного магматического очага увлекается магма, в итоге имеем конусы вулкана. При выходе на поверхность газа, воды и зачастую сопочной грязи образуются грязевулканические постройки. При выходе на поверхность только газа образуются западины или покмарки.

Впервые донные покмарки были исследованы на континентальном шельфе Новой Шотландии (Канада) в 60-х годах XX столетия при проведении съемки гидролокатора бокового обзора

© Е.Н. РЫБАК, Л.В. СТУПИНА, 2019

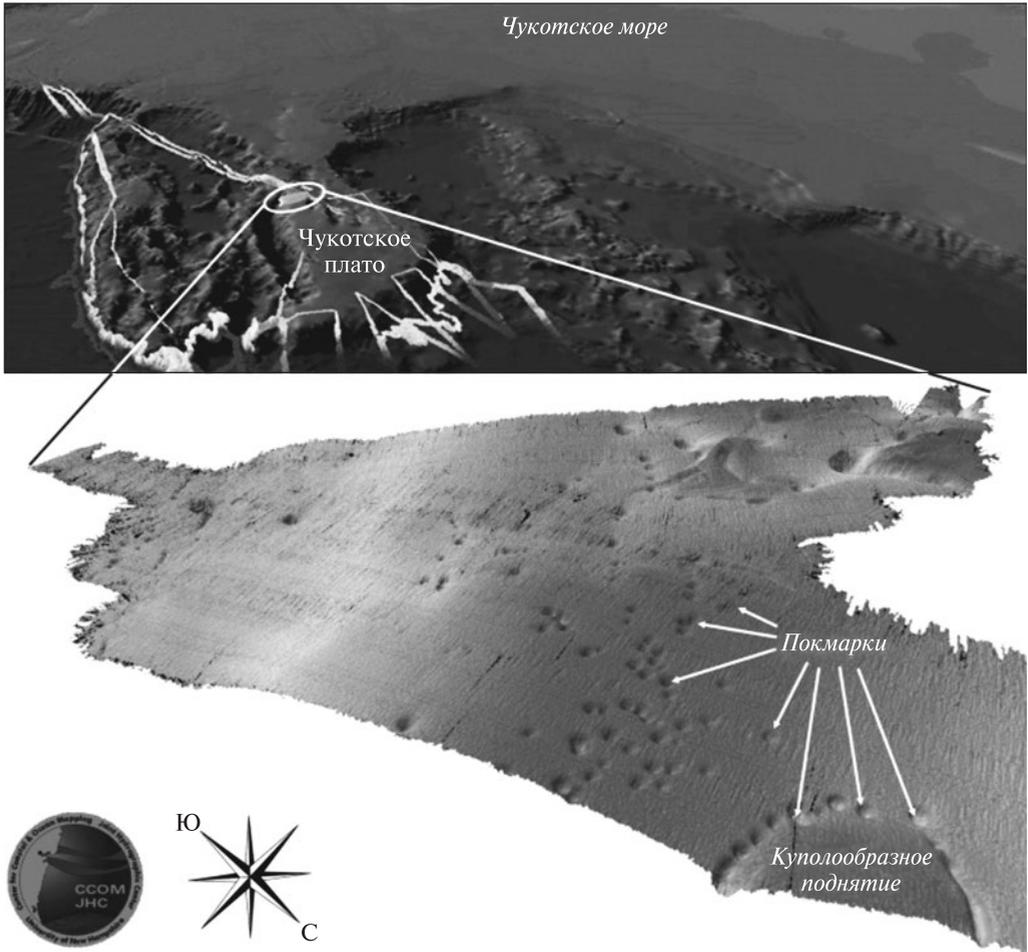


Рис. 1. Трехмерное изображение данных батиметрии северной части Чукотского моря с положением профилей съемки многолучевого эхолота (вверху) и поля покмарков (внизу). [<http://www.ccom-jhc.unh.edu>]

[28]. Позже — были обнаружены в Мексиканском заливе [17], в Беринговом и Норвежском морях [24, 35]. В последнее время они зафиксированы в больших количествах в Атлантическом океане, у берегов Африки [36], Чукотском море [6], в Средиземном море [34], в районе восточных эстуариев Канады, всего более 7470 покмарков [18].

Кроме вышеперечисленных районов покмарки были обнаружены во многих местах, в том числе и в акватории Черного моря. Здесь они, как и в других районах Мирового океана, чаще всего встречаются в пределах внешнего шельфа и континентального склона, т. е. в местах наиболее интенсивного выхода газа (газовых сипов, факелов и т. п.). Часто выходы газа зафиксированы кратерами на дне, т. е. газ выделяется непосредственно из донных западин (рис. 2) [4]. Образования в виде воронок с выходом газа были исследованы в западной части Тарханкутского п-ова (рис. 3) [7].

О покмарках в акватории болгарского побережья сообщалось в 1988 г. Тогда в юго-западной части болгарского сектора Черного моря, во время проведения

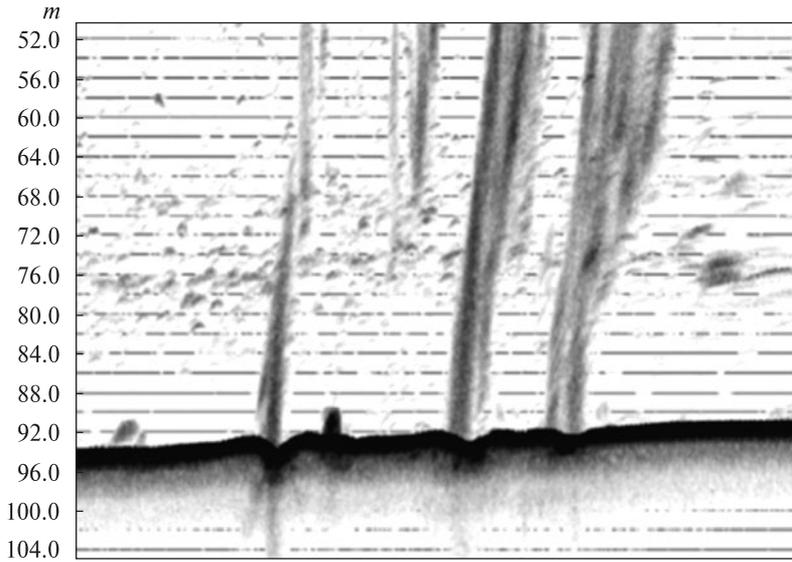


Рис. 2. Струйные газовыделения из донных западин в районе палеодельты р. Днепр в Черном море, [4]

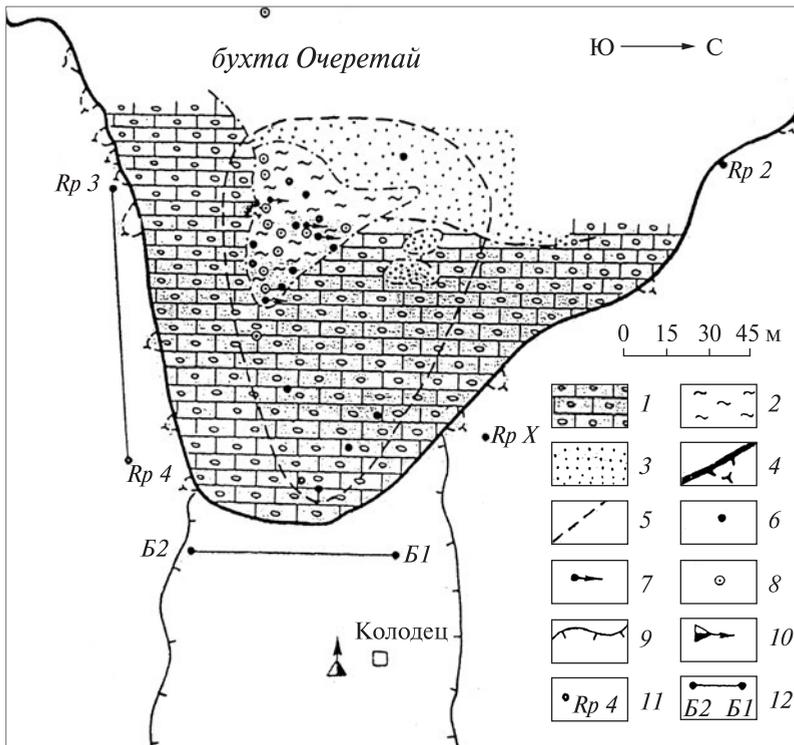


Рис. 3. Схема субмаринных выходов газа, опробования и литология дна в бухте Очеретай на западном побережье Крыма [7]: 1 — выходы известняков сармата на дне; 2 — илистые отложения карстовой воронки; 3 — песчаные отложения на дне бухты; 4 — граница берега с контурами ниш и гротов; 5 — границы площади субмаринных выходов газа; 6 — места постоянных выходов газа; 7 — места периодических массовых выбросов газа; 8 — точка гидрохимического опробования; 9 — граница дна балки Очеретай; 10 — направление движения пресных подземных вод сарматских отложений; 11 — наземные реперы; 12 — базисные линии

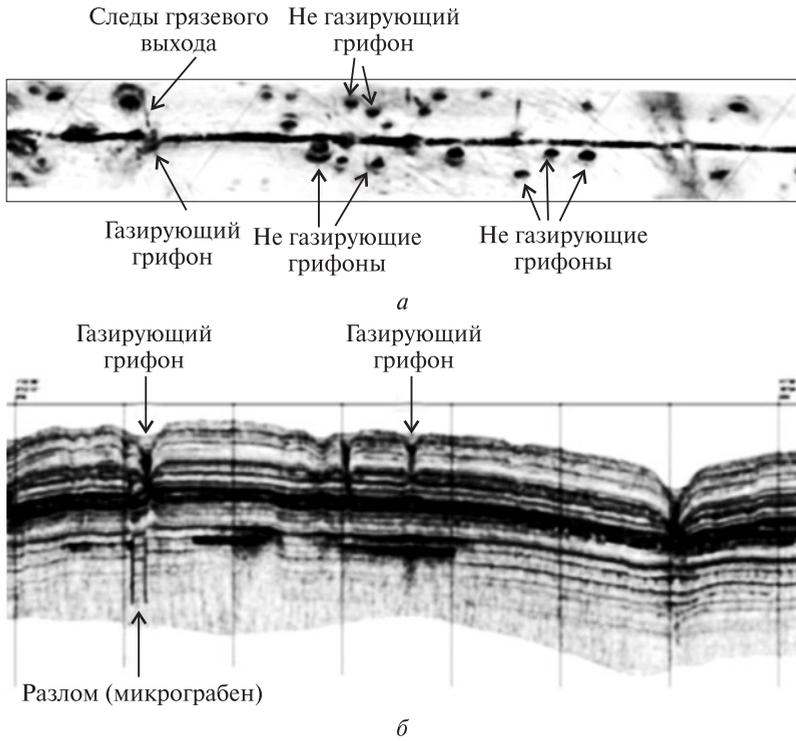


Рис. 4. Покмарки на континентальном склоне у берегов Турции, расположенные на трассе газопровода «Голубой поток». Сонограмма (а) и профилограмма (б) подводных газовых выходов на Понтийском переуглубленном шельфе Черного моря (комплекс МАК-1М), [5]

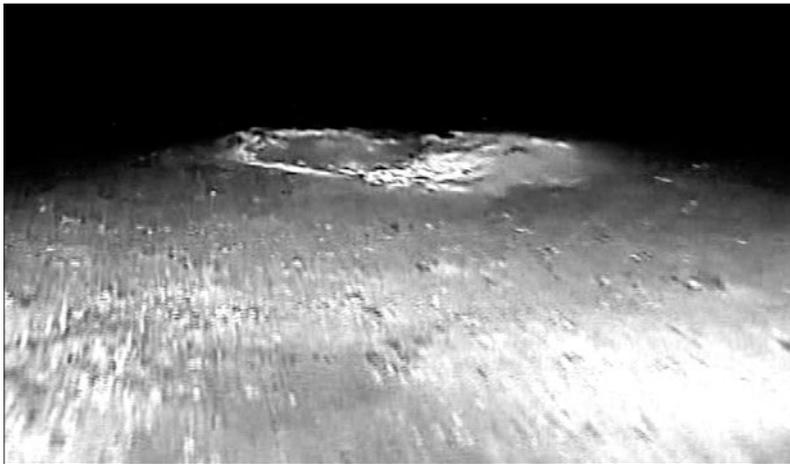


Рис. 5. Кольцевая морфоскульптура газовыделяющей постройки. Кадры видеозаписи аппарата ТПА «Софокл-1» 24 мая 2012 г. (перспективная съемка), [9]

комплексной геолого-геофизической экспедиции «Средецка-88», методом непрерывного сейсмоакустического профилирования на поверхности дна были обнаружены формы рельефа в виде кратеров [2]. Позже подобные формы были обнаружены и на периферии северного шельфа, юго-восточнее мыса Калиакра.

Еще одна область распространения покмарков находится на турецком шельфе в восточной части Черного моря. Детально исследовалась область, расположенная у дельты реки Ешилъырмак (Yeşilirmak) (Синопский прогиб до хребта Архангельского) [20].

Проявления разгрузки углеводородных газов в виде покмарков в этом районе на глубине 200 м были описаны еще при работах ГНЦ «Южморгеологии» в 1998 г. на трассе газопровода «Голубой поток» (рис. 4) [5]. На рисунке видны отдельные темные пятна округлой формы, названные газовыми грифонами (покмарки). На профилограмме этого участка дна им соответствуют воронки, которые являются подводными каналами для газа. Позже, в этом же районе, в Синопском прогибе у берегов Турции в 2005 г. по программе METRO на полигоне Самсун немецкими исследователями под руководством проф. Г. Бормана (Бременский университет) на НИС «Посейдон» проводились работы, в процессе которых были обнаружены многочисленные покмарки, а также газогидраты и грязевые вулканы.

В мае 2012 г. в рамках 5-го рейса подводно-археологических исследований по программе Минкультуры Украины «Берег богов» при помощи самоходного телеуправляемого подводного аппарата «Софокл-1» на западном борту Палеокаланчакского каньона (северо-западный шельф Черного моря) были обнаружены понижения и вдавленности, образованные за счет проседания газонасыщенных и разжиженных илов в центральной части газовыделяющей структуры (рис. 5) [9]. Ранее эти выходы газа были зафиксированы с борта НИС «Профессор Водяницкий» [15]. Обследованный участок газопроявлений относится к зоне перехода шельфа к континентальному склону. Подобные кольцевые морфоструктуры, к которым приурочены газовые сипы, обнаружены и в районе палеодельты реки Палеоднепр (см. рис. 2) [4]. Такие же высачивания газа из конусообразных отверстий были зафиксированы при помощи телеробота Mini Rover МК-11 в приустьевой части р. Супса у побережья Грузии [11].

Процессы и структуры, образующие покмарки

Имеются различные взгляды на формирование покмарков. Когда Л. Кинг и Б. Маклин (1970) [28] впервые сообщили о покмарках, они писали: «Мы поддерживаем гипотезу, в которой главный фактор, ответственный за формирование покмарков — это либо поднимающийся газ, либо вода», т. е. авторы придерживались газовофлюидной модели образования покмарков. Флюиды имеют важное значение, они позволяют массам осадка стать мобильными. Причем все типы флюидов, присутствующие под морским дном, имеют потенциал, чтобы мигрировать на поверхность морского дна.

Многочисленные геохимические исследования Мирового океана показывают, что метан является наиболее важным флюидом, т. к. он очень широко представлен в морских отложениях.

Первые лабораторные эксперименты по образованию покмарков проводились лабораторией Wimpey Laboratories Ltd. Эти и последующие эксперименты показали, что в зависимости от осадка, увлекаемого движущим флюидом, скорости его миграции и энергии выброса образуются различные особенности морского дна — это купола, диапиры, грязевые вулканы, седиментационные шлейфы (плюмы), покмарки.

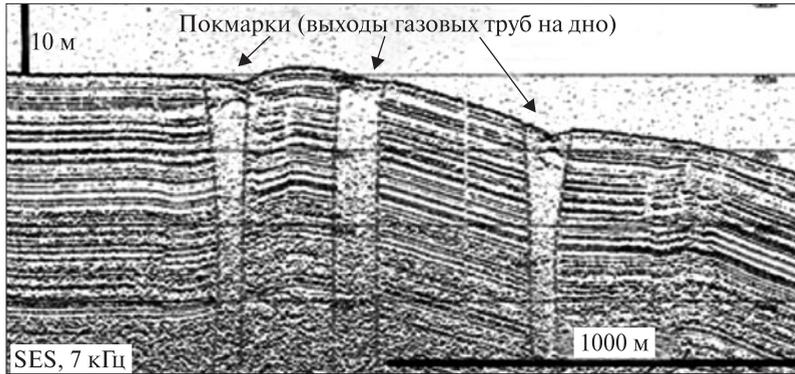


Рис. 6. Покмарки и газовые трубы под ними в Каспийском море, [10]

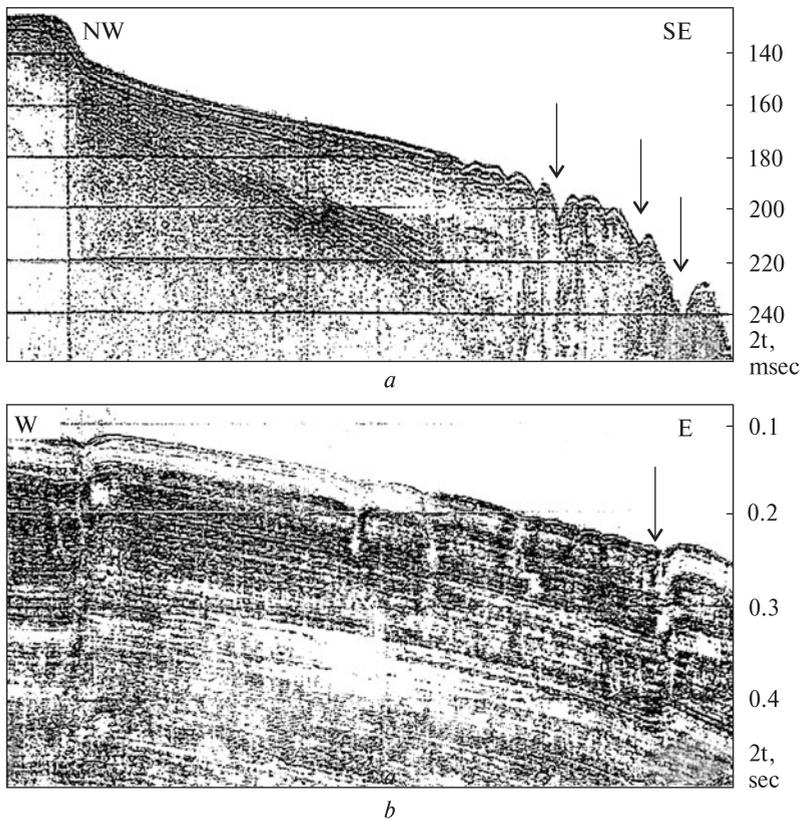


Рис. 7. Сейсмические профили: *a* — иллюстрирует депрессии краевой шельфовой террасы в Калиакрской зоне; *b* — демонстрирует Еминскую кратерную зону. Отчетливо видны газовые карманы под кратерами и каналы, по которым мигрирует газ, [3]

Множество лабораторных экспериментов позволили определить газово-жидкую модель образования покмарков наиболее обоснованной, хотя имеются и другие взгляды на их формирование.

Для того, чтобы образовались покмарки, осадочная толща должна содержать достаточное количество газа, а дно сложено тонкозернистым осадочным

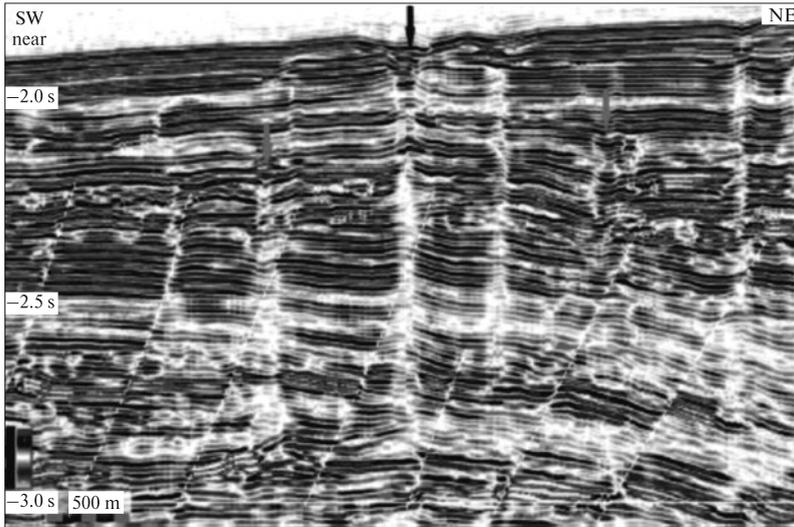


Рис. 8. Трубки дегазации, как действующие (раскрытые) так и закрытые (действовавшие в прошлом), [31]

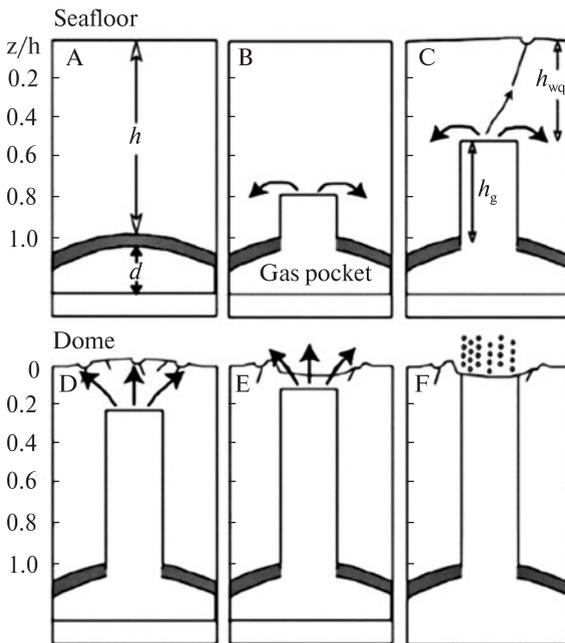


Рис. 9. Стадии формирования газовой трубы и донных западин [19]: А — под слабопроницаемым слоем (обозначен темно-серым цветом) скапливается некоторый объем газа, обладающий достаточной плавучестью, и под воздействием гидростатических сил насыщенная газом смесь начинает приподнимать и продавливать вышележащий слой; В — формирующийся газовый диапир вклинивается в вышележащую осадочную толщу, образуя там вначале «газовый карман» (gas pocket), выжимая при этом из выдавливаемой толщи воду; С — когда диапир достигает примерно половины своего пути к поверхности морского дна (seafloor), над ним начинают появляться первые мелкие западины; D — по мере подъема диапира поверхность дна вспучивается и покрывается более обширной сетью мелких западин; E — растущие западины сливаются в одну крупную западину; F — выход диапира к поверхности сопровождается его активной дегазацией. Цикл формирования газовой трубы завершен

материалом (илами, глинами). Кроме того, должны отсутствовать сильные течения, которые очень быстро приводят к эрозии покмарков.

Модель газовофлюидного генезиса покмарков была предложена и детально описана в работе [24]. По мнению авторов, постепенное накопление газа и уве-

личение порового давления в верхней части осадочного чехла приводит к взрывному выделению газа. И если дно подстилается тонкозернистыми осадками, происходит их выброс в водную толщу с образованием на морском дне покмарка — конусообразной депрессии.

Модель газовофлюидного генезиса покмарков подтверждается также результатами сейсмического профилирования. Во многих регионах под покмарками прослеживаются вертикальные газопроводящие каналы (трубы), уходящие на большую глубину (рис. 6) [10]. Они были зафиксированы у берегов западной Африки [36] и во многих других местах [19], в том числе и в акватории Черного моря (рис. 7) [3], в частности в районе болгарского шельфа. Причем на сейсмических профилях могут быть идентифицированы как действующие (раскрытые), так и захороненные (действующие в прошлом, а сейчас перекрытые осадком) трубки дегазации (рис. 8) [31]. Результаты численного моделирования формирования газовых труб и донных покмарков над ними показаны на рис. 9 [19].

Кроме газовофлюидного генезиса морских западин имеются и другие модели их формирования. Например, образование покмарков связывают с субмаринной разгрузкой подземных вод, хотя они встречаются в больших количествах и там, где структурно-геологические условия не благоприятны для субмаринной разгрузки. Не исключая возможности образования некоторых покмарков под влиянием субмариной разгрузки, более обоснованной все-таки является модель газовофлюидного генезиса.

Ряд внешних факторов также могут влиять на формирование покмарков. Так, некоторые исследователи, привлеченные к эксплуатации нефтяных платформ и трубопроводов в Северном море в 1970-х гг., к внешним условиям образования покмарков отнесли: метеорное влияние, размытые углубления вокруг валунов, эратические валуны айсбергов, техногенные артефакты, явления, связанные с последним ледниковым периодом, например понижения, вызванные дренажем талых вод через отверстия в морском льду, следы котловин, которые подразумевают в прошлом существование больших масс льда, покрытые отложениями, рухнувшие подводные бугры пучения, конические холмы с ледяным ядром, которые обрушиваются при таянии льда, оставляя относительно легко эродируемые отложения и в дальнейшем — депрессии. Некоторые авторы пишут о влиянии на процесс образования покмарков приливов и отливов.

Однако очевидным есть то, что возникновение покмарков следует связывать, прежде всего, с глубинными структурными процессами, т. к. ни один из экзогенных факторов не в состоянии объяснить наличие многокилометровых корней под покмарками. В пользу газовофлюидной модели происхождения покмарков говорят и многочисленные исследования восходящих газов, глубинность которых во многих случаях подтверждается наличием в смеси водорода и гелия, а также наличие в газовых выделениях гомологов метана, которые могут образовываться только в условиях высоких температур и давлений.

Закономерности распространения

Особенности распределения многих донных форм рельефа, в том числе и покмарков, подвержены влиянию или контролю подповерхностных (подводных) особенностей, определяющих распределение путей миграции газа

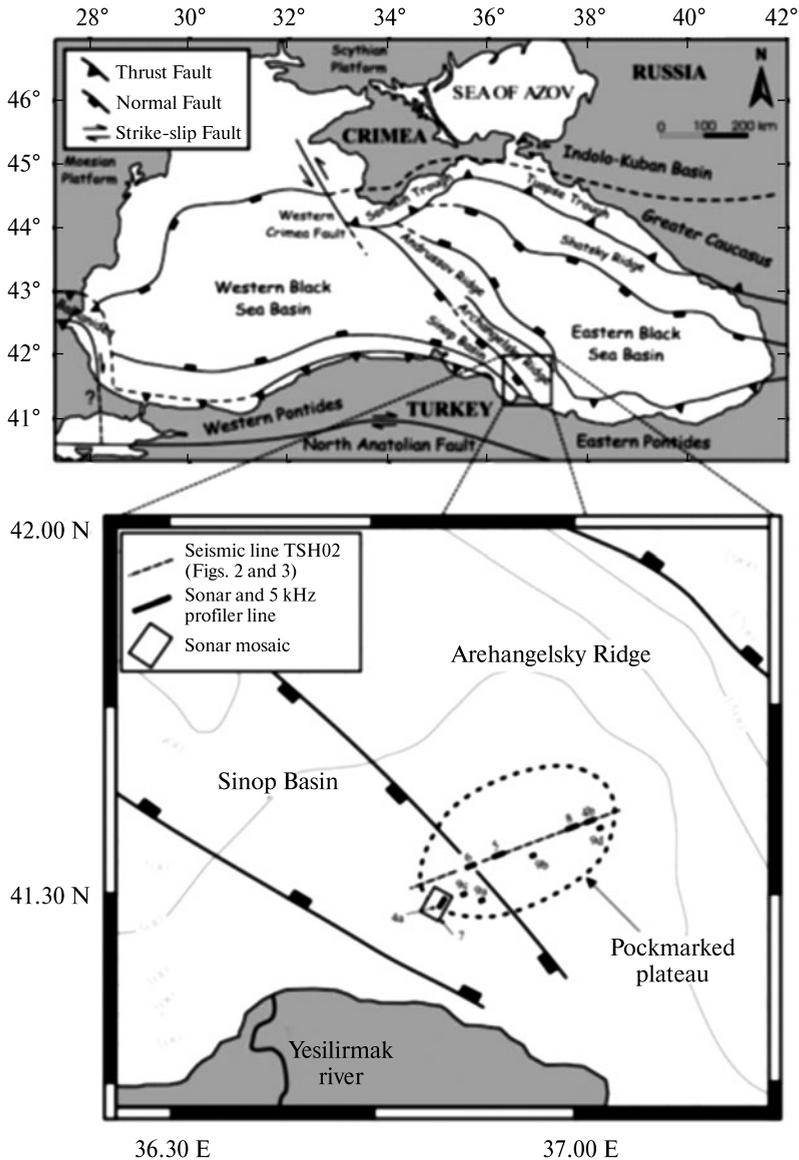


Рис. 10. Схематическая тектоническая карта Черного моря (по Robinson et al. 1996; Казьмин и др., 2000). Крупный план показывает область исследования

(флюида). В ряде случаев прослеживается четкая или завуалированная связь распространения покмарков с разломной тектоникой, глобальной и локальной трещиноватостью (линейной разуплотненностью) подстилающих пород. Эрозивная расчлененность дна и геоморфологические различия, возможно, вносят свои коррективы, но они не являются определяющими в отношении плотности размещения покмарков. Из-за непрерывной загрузки осадков и тектонического сжатия газ в приповерхностных отложениях и поровые флюиды становятся избыточными и мигрируют к морскому дну через проницаемые пути. Этими путями могут быть грязевые диапиры, тектонические нарушения, трещиноватости, разуплотнения осадков. Установлено, что для образования трещиноватости дос-

таточно, чтобы давление газа достигало 75—90 % литостатического давления [33]. При этом предполагается, что с учетом нарастания давления газа с глубиной, разрыв в литифицированных породах может происходить на глубинах более 500 м, в нелитифицированных алевритах — около 30 м, а в песках уже в пределах первых нескольких метров.

Системы покмарков, развитые по протяжению разрывных нарушений, наблюдаются во многих морских акваториях, в том числе и в Черном море. Достаточное внимание этому вопросу уделялось при изучении покмарков в болгарском секторе Черного моря. Местоположение локализации здесь кратеров — это длинная (41 км) и узкая (от 2 до 5 км) зона на юго-западном шельфе Черного моря и прилегающий к нему континентальный склон. В геологическом плане — это район балканид, пояс горных пород, подвергшийся альпийской складчатости. Л.Ив. Димитров [3] предполагает, что газ мигрирует по тектоническим нарушениям (вероятно, консидементационным сбросам малой амплитуды) и связанным с ними зонам повышенной трещиноватости. Такие зоны, а также углеводородные скопления проявляются на сейсмопрофилях в виде акустических аномалий. Все кратеры сопровождаются подводными акустическими аномалиями, т. е. формы типа кратеров связаны с местами разгрузки газов. Так как погребенные борта Черноморской впадины являются одним из перспективных структур в нефтегазоносном отношении [13] Л.Ив. Димитров [2] допускает, что развитие покмарков не ограничивается данным районом, а имеет намного больший ареал распространения.

Наличие покмарков на турецком шельфе Черного моря, в частности, в восточной его части, как считают авторы работы [20], обусловлено сейсмической активностью Северо-Анатолийского разлома (САР). Покмарковая зона здесь расположена на глубинах 180—300 м (шельф и бровка континентального склона) и является удлинённой областью (около 25,7 км) в направлении ЮЗ-СВ (рис. 10). К северо-восточному краю Синопского бассейна покмарки становятся более вытянутыми и имеют тенденцию следовать линейному тренду. Сейсмически активный САР оказывает значительное влияние на региональную тектонику и может циклически изменять условия избыточного давления сжиженного газа на шельфе. Этому вопросу посвящен ряд работ. Так, Согур и Туьсуз (1997), [25]) изучали влияние САР на тектонику на южном окончании хребта Архангельского и Синопского бассейна. На основе сейсмических данных они предположили, что такие колебания в режиме давлений вдоль САР также существуют и в открытом море. Исследователи пришли к выводу, что формирование Синопского бассейна было побочным явлением начального движения вдоль САР. Поэтому, любое увеличение в режиме давления вдоль САР вблизи шельфа может изменить избыточное давление газа в районе покмарков. На рис. 11 показаны параллельные тонкие осадочные слои с многочисленными небольшими смещениями, близкими положению разломов на сейсмическом профиле TSHO2 в более глубоком разрезе осадочных слоев. Сопоставив местоположение разломов на сейсмическом профиле с тектонической картой, исследователи пришли к выводу, что места разломов на профиле полностью соответствуют южному флангу хребта Архангельского, где он сильно иссечен системой разломов. Следовательно, эти нарушения интерпретируются как мелкие части системы разломов, сформированных вдоль южных флангов хребта Архангельского, соединяющие фланги хребта с Синопским бассейном. Разломы могут обеспечивать активные

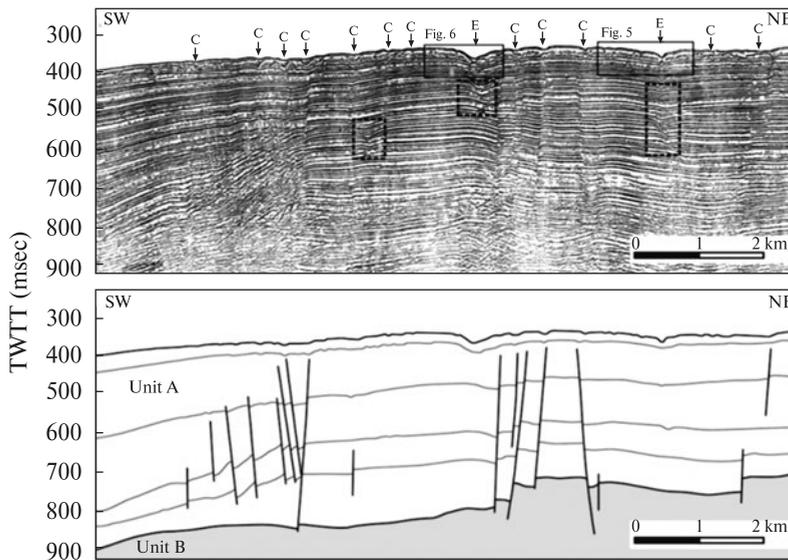


Рис. 11. Фрагмент сейсмического профиля у реки Ешилърмак на восточной части турецкого черноморского шельфа и его интерпретация: несколько небольших смещенных вертикальных разломов и покмарки на морском дне (стрелки), а также погребенные покмарки (пунктирные прямоугольники), [20]

каналы для миграции газа на поверхность морского дна и создавать зоны повышенной проницаемости, позволяя газу выходить на поверхность. На сейсмическом разрезе (см. рис. 11) также показаны погребенные покмарки (обозначены пунктирными прямоугольниками) в глубоких осадочных слоях и покмарки на морском дне (обозначены стрелками). Наличие погребенных покмарков указывает на то, что миграция газа из глубин морского дна не была непрерывной, а периодически повторялась в течение определенных отрезков времени. Периодическое прерывание и реактивация газов покмарков обусловлены разными причинами. Этому вопросу посвящен ряд работ [25]. Авторы исследований пришли к выводу, что причина периодического прерывания и реактивации газов в районе исследований заключается в сейсмологическом периодическом изменении условий избыточного давления. Сейсмически активный САР оказывает значительное влияние на условия избыточного давления в зоне и может изменять циклически условия избыточного давления на шельфе.

При небольших наклонах дна распределение покмарков имеет внешне хаотичный характер. С увеличением уклона их расположение становится более упорядоченным. Покмарки образуют цепочки, вытянутые в сторону опускания дна, которые со временем сливаются в ложбины, не связанные с выносом обломочного материала с суши. На болгарском шельфе прослеживается связь покмарков с поверхностными проявлениями, что дает основание предположить, что наблюдаемые формы депрессий не изолированы друг от друга, а выстроены в системы удлиненных депрессий и каналов, которые развиты по протяжениям разрывных нарушений. Для того чтобы происходила разгрузка газа, разломы должны быть активными (открытыми), что наиболее ярко проявляется при сейсмичности.

Так, через 10 дней после землетрясения в Петерском заливе (Северная Греция) в 1993 г., данные гидролокатора бокового обзора показали образовавшиеся

покмарки от 25 до 150 м в диаметре и от 0,5 до 15 м глубиной [26]. Большинство покмарков активно дегазировали. Отложения в этой области между плейстоценом и голоценом являются газонасыщенными примерно на 70%. Гидрографическая станция, расположенная в Петерском заливе, перед землетрясением регистрировала три импульса повышения температуры воды, связанные, по всей видимости, с огромным количеством горячего газа, периодически выделявшегося из покмарков.

9 февраля 1971 г. землетрясение произошло в Сан-Фернандо в 50 км к северо-востоку от Малибу-Пойнт. На расстоянии 500 м от берега на поверхности моря была замечена большая площадь бурлящего газа. На следующий день аквалангисты обнаружили на дне высачивание газа из небольших кратеров (40 см в диаметре и 10—15 см глубиной) в мелкозернистых песках с обильными органическими включениями.

Ряд специалистов предполагает и обратную связь. Они считают, что многие слабые землетрясения могут быть обусловлены подводными выхлопами газа, разрушающими целостность донных отложений, следствием чего является образование покмарков [1, 8].

В отдельных случаях наблюдалась связь аномалий магнитного поля с покмарками. Предположительно она обусловлена повышенной электрохимической активностью в грунтах.

Морфология

Морфология поверхностей покмарков, как правило, отражает степень их эволюции. Есть покмарки образовавшиеся недавно, заполненные осадками после образования, покмарки полностью заполненные недавними осадками, есть погребенные покмарки, бывают новообразовавшиеся покмарки за счет повторного выброса газа в той же зоне, где была прежняя.

Покмарки обычно имеют круглую или удлиненную форму, их диаметры варьируют от нескольких метров до нескольких десятков метров. Глубина покмарков изменяется в пределах от менее одного метра до десятков метров [24]. Гигантские покмарки могут иметь кратеры до нескольких сотен метров в ширину и 200 метров в глубину [21].

R. Pilchen, J. Argent [36] обобщили данные 57-ми публикаций и получили логарифмическую зависимость между диаметром и глубиной покмарков. Средняя статистическая оценка диаметра составляет 128 м, а глубина — 9,6 м. Было установлено, что глубина покмарков (y) связана с мощностью голоценовых отложений (x) корреляционной зависимостью: $y = 0,4x$ при коэффициенте корреляции 0,6.

Размеры покмарков в изучаемых районах Черного моря, в частности в болгарском секторе, варьирует в значительном диапазоне — от 0,5 до 300 м в диаметре, а глубина их составляет в среднем 3—6 м. Изменялись также углы наклонов кратеров. Чем глубже расположен кратер, тем больше, как правило, наклон. Количество кратеров, как показали исследования, обратно пропорционально их размерам. Чем меньше по размерам кратер, тем больше, как правило, их частота по площади. Эта закономерность справедлива и для других районов. Например, на побережье Грузии была исследована акватория в 200 км² вдоль побережья Поти-

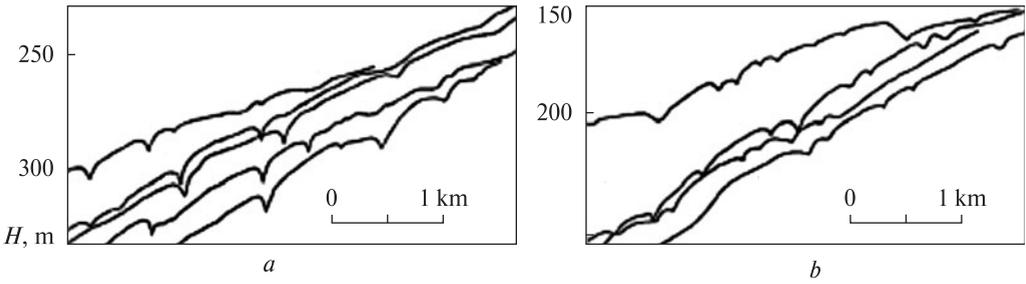


Рис. 12. Характерный профиль через северную (а) и южную (b) часть кратерной зоны. С глубиной изменяется форма кратеров — от растяжных U-образных до острых V-образных, [3]

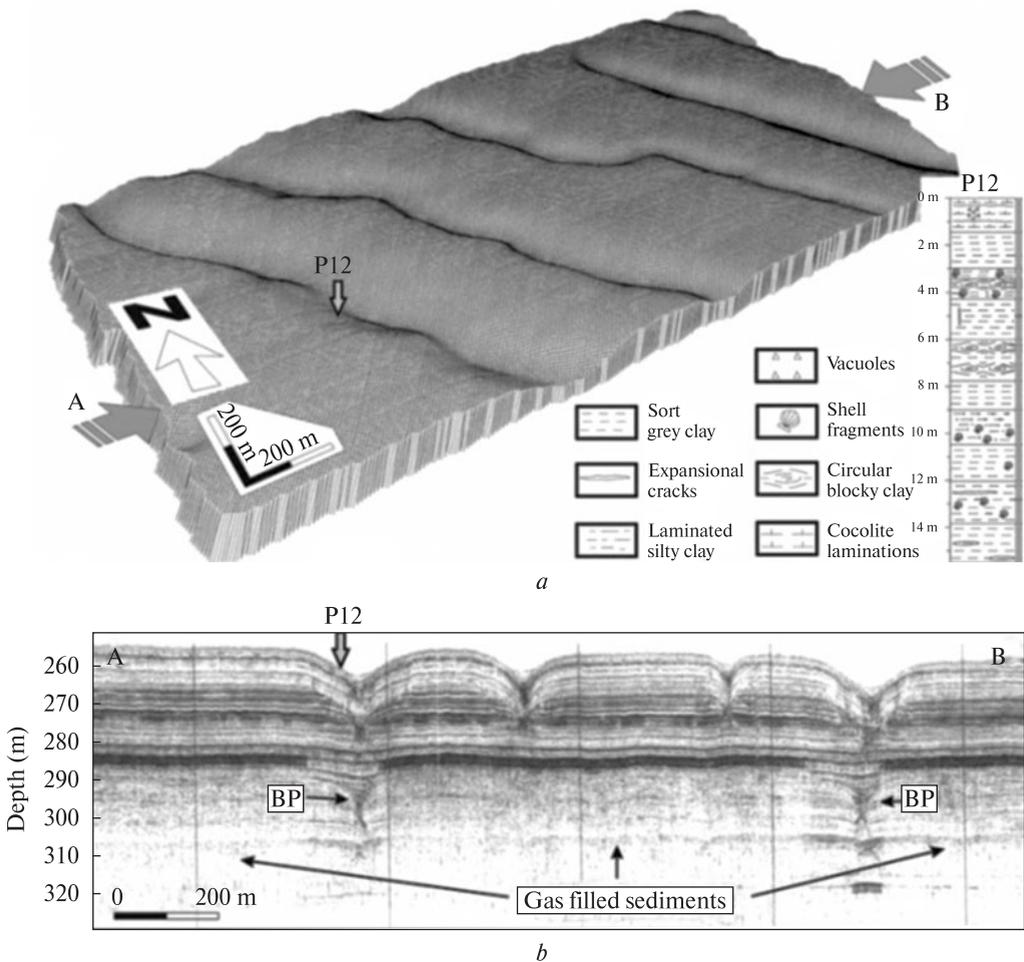


Рис. 13. Фрагмент плато покмарков, показывающий ряд параллельных удлиненных покмарков как депрессии на морском дне. Глубины кратеров здесь не более 15 м. Удлиненные покмарки шириной около 150–200 м и длиной 2 км, [20]

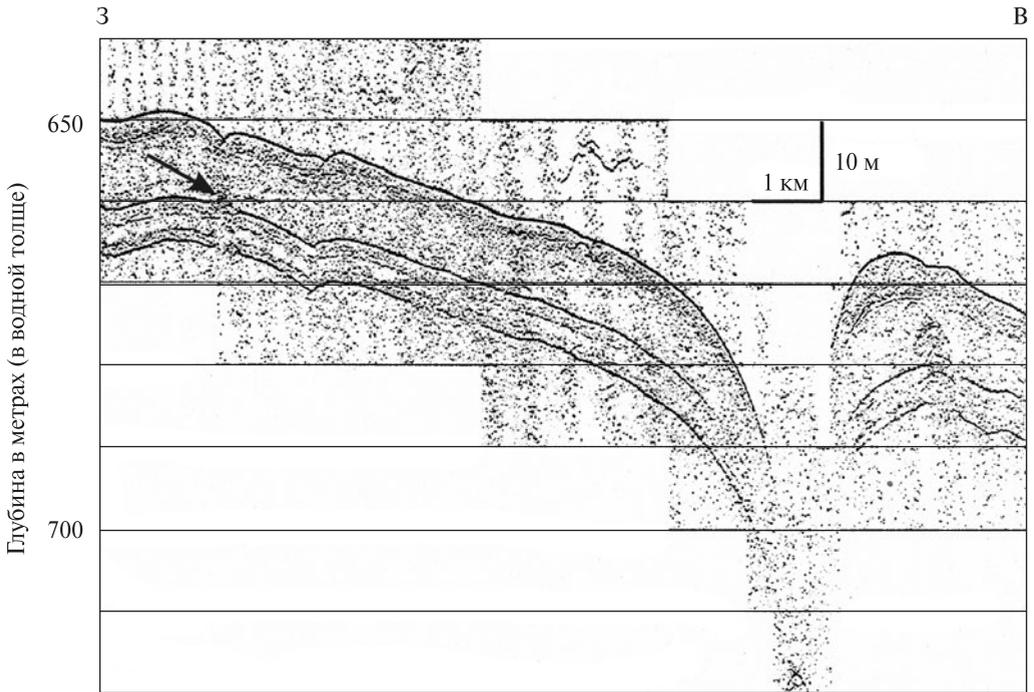


Рис. 14. Фрагмент профиля SES-003, на котором в его восточной части виден крупный покмарк размерами более 2 км и глубиной 50 м. На склонах покмарка отражающие горизонты срезаются. Исчезновение отражающих горизонтов и зона акустической мутности (стрелка) под покмарком в западной части профиля дает основание предположить наличие газа (Баренцево море), по Б.В. Баранову, К.А. Дозоровой, А.С. Соломатину, 2011

Батуми. Подводные наблюдения показали, что газ высачивается из дна через отверстия диаметром 10 мм, края которых имеют конусообразные формы. На каждом квадратном метре газоносного поля отмечалось до 25 таких отверстий.

В Черном море глубина кратеров не превышает 10 м, хотя изредка встречаются и более 25 м. Углы наклона стенок покмарков в изучаемых районах варьируют от 6° до 12° , при этом происходит формирование асимметричной конусообразной формы. К малым глубинам, как правило, приурочены группы U-образных депрессий. С глубиной их профили меняются на V-образные (рис. 12) [3]. С глубиной наклон кратера может увеличиваться до 12° . Изменение угла наклона покмарков с глубиной болгарские ученые объясняют наличием на мелководье грубозернистых придонных осадков (старые кратеры на мелководье часто заполняются современными осадками). Большая заполняемость кратера на турецком мелководье, в отличие от глубоководных, объясняется более интенсивным осадконакоплением вблизи берега, что связано с материалом, переносимым рекой Ешильырмак. Углы наклона морского дна также способствуют перемещению осадков. Нужно отметить также, что глубоководные покмарки, как правило, более вытянутые, чем мелководные.

В сторону склона постепенно нарастает сращивание депрессий, размеры их увеличиваются, и на краю бровки шельфа образуется подобие борозды, длина которой может достигать 2 км. Подобные явления имеют место в различных районах Черного моря. В частности, удлинённые покмарки путем слияния нес-



Рис. 15. Реликтовые борозды айсбергового выпаживания на дне Балтийского моря, [30]

кольких круглых образуются в турецкой части Черного моря (рис. 13) [20]. Турецкие ученые [23], считают, что удлиненные покмарки могут быть сформированы растягивающим напряжением, которое может вызвать линейные ослабленные зоны вблизи бровки континентального склона, где происходит резкое увеличение угла наклона, и где накопленные газы легко высвобождаются, вызывая развитие удлиненных покмарков.

Покмарки размерами более 350 м и углублением свыше 35 м были названы гигантскими [29]. Встречаются также покмарки, размер которых превышает 1 км при глубине несколько десятков метров (рис. 14).

На российском шельфе Арктики обнаружены многочисленные неоднородности, включая так называемые плугмарки (протяженные борозды). Большое количество таких объектов обнаружены ООО «Питергаз» на дне Штокмановского месторождения. В ряде случаев размеры плугмарков достигают многих километров в длину, 100—200 м в ширину и 5—10 в глубину (рис. 15) [30]. Специфическая V-образная форма многих из борозд говорит об их образовании в процессе выпаживания айсбергами (экзарации), а большие глубины свыше 300 м свидетельствуют о гигантских размерах этих айсбергов, или другой природы их происхождения (однократного выхлопа газа или многократных, из-за постоянного подтока газов из глубины по газопроводящим каналам — «газовым трубам»).

Литология

Как отмечалось выше, для того чтобы образовались покмарки, осадочная толща должна содержать достаточное количество газа, а дно сложено тонкозернистым осадочным материалом.

На большей части болгарского шельфа и континентального склона, где обнаружены покмарки, они подстилаются отложениями, насыщенными метаном. В состав осадков входят обогащенные органикой илы голоцена, снесенные в эту область из Дуная южным черноморским течением, четвертичный торф, которые залегают на нефтяных породах девон-палеоценового возраста и меловых углях. Поверхностные (новочерноморские) осадки в зонах локализации кратеров представлены преимущественно неконсолированными известковистыми кокколитами, алевролитовыми илами.

В районе распространения покмарков в восточной части черноморского турецкого шельфа между изобатами 180—30 м, у дельты реки Ешилдырмак морское дно подстилается мощным накоплением неконсолированных мелкозернистых отложений, образующихся в Синопском бассейне между хребтом Архангельского и турецким побережьем. Большое количество органического

вещества, поставляемого рекой, способствует образованию больших объемов газонасыщенных осадков, а геологическая обстановка, как было изложено выше, способствует формированию и миграции газа с избыточным давлением, результатом чего и является формирование покмарков. Керн, отобранный внутри кратеров покмарков, состоит преимущественно из текучей глины с обломками моллюсков и кокколитовых илов. Разрывы в сплошности в керне могут быть связаны с путями миграции газа.

Выявленные кольцевые газовыделяющие морфоструктуры в районе Палеокаланчакского каньона и палеodelьты Днепра образовались за счет проседания газонасыщенных илов в центральной части газовыделяющих структур, т. е. происходит эрозия грунта восходящими струями газа, разрыхляющими и взмучивающими донные отложения. Исследуемый участок приурочен к зоне перехода северо-западного шельфа Черного моря к континентальному склону. В Черном море, как и в других районах Мирового океана, покмарки достаточно часто встречаются в пределах континентального склона, т. е. в местах наиболее интенсивного выхода газа. Палеокаланчакский каньон, палео-Днепр, а также палео-Днестр принадлежат к Западночерноморской области погребенных палеодолин, в которой борта и днища подводных долин и каньонов развиты на морских и лиманно-морских алеврито-пелитовых илах, местами раковинно-детритовых илах и алевритах.

В пределах северо-западного шельфа и континентального склона газовые факелы наиболее широко развиты в районах Палеокаланчакского и Палеоднепровского каньонов. В одном из притоков палео-Днепра во время 27 рейса НИС «Владимир Паршин» был обнаружен район из пяти грязевых конических кратеров, некоторые из них газифицирующие. При прохождении судна над одним из них был зафиксирован мощный подводный канал к вершине антиклинальной структуры. На глубинах 200 и 600 м выявлены газовые карманы, разгрузка которых и обуславливает поток газа из более глубоких горизонтов [16].

Весьма вероятно, что грязевые кратеры притока палео-Днепра, сипы и покмарки Палеокаланчакского каньона и палеodelьты Днепра связаны с флюидно-газовым окном Одесско-Синопской разломной зоны глубокого заложения, которая служит каналом разгрузки газифлюидных скоплений глубинных горизонтов.

За счет проседания донных отложений формируются и другого рода покмарки, размер которых превышает 1 км при глубине несколько десятков метров. Наиболее вероятно проседание в таких случаях происходит за счет оттаивания природных массивов палео льда и гидролакколитов или за счет разложения газогидратов. Исследователи [27] полагают, что при разложении газогидратов происходит образование покмарков за счет взрывного выделения больших объемов метана. Разложение газогидратов обусловлено понижением уровня моря в позднеледниковый период (14–25 тыс. лет назад) и, соответственно, изменениями РТ условий, главным образом за счет уменьшения гидростатического давления.

Наблюдается отчетливая привязка эпох активного формирования покмарков к временам климатических перестроек, смене эпох максимального оледенения на межледниковые эпохи потепления климата [37].

Согласно работам [22, 32 и др.] установлено, что уход ледника с территории между Шотландией и Норвегией (ориентировочно 12,5 тыс. лет назад) в границах современного Северного моря спровоцировал образование покмар-

ков с активной дегазацией, о чем свидетельствуют успешные поисково-разведочные работы и эксплуатация многочисленных месторождений в настоящее время. Комплексы геофизических работ доказывают современное обширное распространение донных покмарков. В работах [24, 26 и др.] приводятся материалы, подтверждающие широкое распространение покмарков и периодическое проявление дегазации не только в пределах Северного моря, но и в морской акватории между Великобританией и Ирландией, которые в прошлом также были сушей.

Из вышеизложенного очевидно, что Черное море со значительно смещающейся береговой линией в обозримом геологическом прошлом (последние несколько десятков тысяч лет) может представлять собой интерес для изучения покмарков. Покмарки шельфа турецкого, болгарского и украинского секторов Черного моря некогда были частью суши. И наоборот, отдельные районы Причерноморской низменности, содержащие, вне всякого сомнения, западинные формы рельефа, были дном моря, т.е. здесь мы можем наблюдать взаимные переходы покмарков в западины суши и наоборот. Такое явление может быть в пользу предполагаемой гипотезы [14] о генетическом родстве западин суши с покмарками Мирового океана, т.е. что мы имеем дело, в сущности, с одним и тем же явлением, проявляющимся в разных условиях среды, и имеющим более глобальные масштабы, чем это ранее предполагалось.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Ю.А., Виноградов А.Н., Кровотинцев В.А. Применение геофизических методов для дистанционного контроля динамики процессов деструкции ледовых покровов Арктики. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 87–89.
2. Димитров Л.Ив. Формы типа кратеров на дне Черного моря. *Докл. Болгарской АН*. 1990. 43, № 5. С. 37–39.
3. Димитров Л.Ив., Дончева В.Г. Газови кратери на морского дъна в южнобългарския сектор на Черное море. *Трудове на Института по океанология*. 1998. Т. 2. С.77–89.
4. Егоров В.Н., Артемов Ю.Г., Гулин С.Б. Метановые сипы в Черном море: средообразующая и экологическая роль. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 365 с.
5. 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.
6. Логвина Е.А., Матвеева Т.В., Гладыш В.А., Крылов А.А. Комплексные исследования покмарков на Чукотском плато. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2011. 2(88). С. 45–54.
7. Лушик А.В., Морозов В.И., Палин В.П. Особенности формирования подземных вод в западной части равнинного Крыма (на примере бухты Очеретай). *Геол. журн.* 1985. 45, № 3. С. 101–107.
8. Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы. *Росс. хим. журнал*. 2003. 47, № 3. С. 70–79.
9. Пасынков А.А., Воронов С.А., Блинцов В.С., Кадуринов С.В. Морфоструктурные особенности морского дна на участках газопроявлений в северо-западной части Черного моря. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2012. № 4. С. 82–87.
10. Путанс В.А., Левченко О.В., Мерклин Л.Р., Плешко А.Ю. Сейсмоакустические аномалии в осадочном чехле западных морей России. *Совр. проблемы науки и образования*. 2013. № 5. С. 52–63.
11. Ткешелашвили Г.И., Егоров В.Н., Мествиришвили Ш.А. Метановые газовые выделения со дна Черного моря в приустьевой зоне р. Супса у побережья Грузии. *Геохимия*. 1997. № 3. С. 331–335.

12. Троцюк В.Я. Газовые кратеры на дне — индикаторы процессов миграции углеводородов из недр. Докл. IV Междунар. симп. Геология, история и процессы современного осадкообразования Черного и Балтийского морей. 1988. Октябрь, Варна. С. 26—32.
13. Туголесов Д.А., Горшков А.С., Мейснер Л.Б. и др. Тектоника мезо-кайнозойских отложений Черноморской впадины. М.: Недра, 1985. 215 с.
14. Шестопалов В.М., Лукин А.Е., Згонник В.А., Макаренко А.Н., Ларин Н.В., Богуславский А.С. Очерки дегазации Земли. Киев: Ітек-Сервіс, 2018. 631 с.
15. Шнюков Е.Ф., Пасынков А.А., Клещенко С.А. и др. Газовые факелы на дне Черного моря. Киев: Гнозис, 1999. 133 с.
16. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Кузнецов А.С. и др. Проблема сапропелей Черного моря. Киев, 2010. 138 с.
17. Bernard B., Brooks J., Sacket W. Earth and Planetary. *Science Letters*. 1976. 31. P. 48—54.
18. Brothers L.L., Kelley J.T., Belknap D.F. et al. Shallow stratigraphic control on pockmark distribution in north temperate estuaries. *Marine Geology*. 2012. Vol. 329—331. P. 34—45.
19. Cathles L.M., Sub Zhend, 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. 21. Issue 1. P. 82—91.
20. Cifci G. et al. Deep and shallow structures of large pockmarks in the Turkish shelf, Eastern Black Sea. *Geo-Mar. Lett.* 2003. P. 311—322.
21. Cole D, Stewart S.A., Cartwright J.A. Giant irregular pockmark craters in the Palaeogene of the Outer Moray Firth Basin, UK North Sea. *Mar Petrol. Geo.* 2000. 7. P. 563—577.
22. Discussed in depth in chapters 2—4 in *Before History of Scotland Before History*. Alistair Moffat. 2005. Thames Hudson Inc.
23. Ergu E n M., Dondurur D., Cë ifce i G. Acoustic evidence for shallow gas accumulations in the sediments of the eastern Black Sea. *Terra Nova*. 2002. 14. P. 313—320.
24. Hovland M. Judd A.G. Seabed Pockmarks and Seepages. Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. Graham and Trotman Ltd. London, 1988. 293 p.
25. Gorur N., Tuysuz O. Petroleum geology of the southern continental margin of the Black Sea. In: Robinson A.G. (ed) *Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region*. AAPG Mem. 1997. P. 241—254.
26. Judd A., Hovland M. Seabed fluid flow — impact on geology biology and the marine environment. Cambridge University Press, Cambridge. 2007. 400 p.
27. Kennet J.P., Cannariato K.J., Hendy I.L., Behl R.J. Methane Hydrates in Quaternary Climate Change: the clathrate gun hypothesis. Washington, DC: American Geophysical Union — Special Publication. 2003. Vol. 54.
28. King L.H., MacLean B. Pockmarks on the Scotian Shelf. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1970. 81: P. 3141—3148.
29. Kutterof S., Jegen M., Mitrovica J.X. et al. A detection of Milankovich frequencies in global volcanic activity. *Geology*. 2013. № 41 (2). P. 227—230.
30. Long D., Lammers S., Linka P. Possible hydrate mounds within large sea-floor craters in the Barents Sea. Gas Hydrates: Relevance to word Margin Stability and Climate Change. Henriet J.P., Mienert J. (ed). Geological Society of London. Special Publication. 1998. V. 137. P. 223—237.
31. Loseth H., Wensaas L., Arnsen B., Hanken N.M., Basire Ch., Graue K. 1000 m long gas blow-out pipes. *Marine and Petroleum Geology*. 2011. № 28. P. 1047—1060.
32. Mapping Doggerland: The Mesolithic Landscapes of the Southern North Sea. V. Gaffney, K. Thomson and S. Fitch (editors). 2007. Archaeopress. 131 p.
33. Moss J.L., Cartwright J. 3D seismic expression of km-scale fluid escape pipes from offshore Namibia. *Basin Research*. 2010. Vol. 22. № 4. P. 481—501.
34. Moss J.L., Cartwright J. Moore B. Evidence or fluid migration following pockmark formation: Examples from the Nile Deep Sea Fan. *Marine Geology*. 2012. Vol. 303—306. P. 1—13.
35. Nelson H, Tor D.R, Sandstrom M.W., Kvenvoldreiri K.A. Modern biogenic gas-related craters (sea-floor pockmarks) on the Bering Shelf, Alaska. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1979. 90. P. 1144—1152.
36. Pilchen R., Argent J. Mega-pockmarks and linear pockmark trams on the West African continental margin. *Marine Geology*. 2007. Vol. 244, Iss. 1—4. P. 15—32.

37. Plaza-Faverola A., Biinz S., Mienert J. Repeated fluid expulsion through subseabed chimneys offshore Norway in response to glacial cycles. *Earth and Planetary Science Letters*. 305 (3). P. 297–308.
38. Yun J.W., Orange D.L., Field M.E. Subsurface gas offshore of northern California and its link to submarine geomorphology. *Marine Geology*. 1999. 154. P. 357–368.

Статья поступила 15.04.2019

О.М. Рыбак, Л.В. Ступіна

ПОКМАРКИ ЧОРНОГО МОРЯ

У статті розглянуто існуючі моделі формування покмарків, процеси і структури, що їх утворюють. Особлива увага приділена закономірностям їх розвитку в Чорному морі, формам, розмірам і особливостям, які представляють інтерес для подальшого вивчення покмарків у зв'язку з їх використанням як пошукової ознаки на вуглеводні.

Ключові слова: Чорне море, покмарки, газовиділення.

E.N. Rybak, L.V. Stupina

BLACK SEA POCKMARKS

The article considers the existing models of pokmark formation, processes and structures that form them. Special attention is paid to the regularities of their development in the Black Sea, shape, size and features that are of interest for further study due to their potential search feature on hydrocarbons.

Keywords: the Black Sea, marks, gas emissions.