



*Пожар на нефтяной платформе Deepwater Horizon в Мексиканском заливе.
Фото с сайта <http://novorab.ru/ArticleSection/Details/568>*

УДК 553.98+553.63(261.54)



Беленицкая Г.А.

Природные соляно-нафтидные узлы – глобальные центры надежд и угроз (на примере бассейна Мексиканского залива)¹

Беленицкая Галина Александровна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ).
E-mail: Galina_Belenitskaya@vsegei.ru, ankudinovo@mail.ru

Выделены глобальные «соляно-нафтидные узлы» – гиганты и супергиганты. Отмечены их общие структурно-тектонические, вещественные, флюидодинамические и нефтегазовые особенности. В качестве эталонного объекта охарактеризован Мексиканский супергигант, дана оценка его показателей, определяющих нефтегазовую сверхпродуктивность и высокую аварийность. Большинство других «соляно-нафтидных узлов» также относятся к числу наиболее высокоперспективных и высокоаварийных.

Ключевые слова: соли, соленосные бассейны, нафтидные бассейны, Мексиканский бассейн, углеводороды, рассолы, очаги разгрузки, грязевой вулканизм, соляной диапиризм, аварийные разливы нефти.

Соляно-нафтидные узлы мира

Соленосные и нафтидные бассейны. Соленосные осадочные бассейны, вмещающие мощные толщи солей, широко распространены в пределах всех континентов, морей, океанических окраин (рис. 1). Общее число соленосных бассейнов мира более 110, около половины из них – крупные, содержащие мощные (от нескольких сотен метров до 1,5–2 км и более) толщи солей. Масштабы соленосных бассейнов колеблются в широких пре-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 09-05-11511-с, 10-05-00555-а.

делах. Для их оценки мы ввели ряд ориентировочных градаций, основанных на пространственных показателях соляных толщ – мощности, площади, объеме (табл. 1).

Таблица 1

**Ориентировочные категории соленосных бассейнов (по пространственным параметрам)
и нефтяных бассейнов (по геологическим запасам)***

Категории бассейнов	Индекс	СОЛЕНОСНЫЕ БАСЕЙНЫ			НАФТИДНЫЕ БАСЕЙНЫ
		Мощность, км	Площадь, тыс. кв. км	Объем, тыс. куб. км	Запасы, млрд. т
Уникальные (супергиганты)	У	2–2,5	> 1500	> 1500	> 100
Гигантские	Г	~1,5	1000–1500	1000–1500	10–100
Крупнейшие	Кш	1,0–1,5	500–1000	500–1000	5–10
Крупные	К	0,6–1,0	200–500	100–500	1–5
Средние	С	0,4–0,6	100–200	10–100	<1
Мелкие	М	< 0,4	< 100	< 10	

*Категории соленосных бассейнов выделены на основании обобщения литературных данных и авторских оценок; нефтяных бассейнов – по К.Н. Кравченко² с дополнениями³.

При отнесении соленосных бассейнов к тем или иным из выделенных размерных категорий использованы имеющиеся в литературе оценки⁴, дополненные расчетными значениями с учетом конкретных пространственных параметров. По масштабам соленосности резко выделяются около 20 бассейнов, содержащих свыше 100 тыс. куб. км солей каждый, из них 14 – свыше 500 тыс. куб. км. Четыре супергиганта – Прикаспийский, Мексиканского залива, Восточно-Сибирский и Средиземноморский – вмещают каждый порядка 1,5–2,5 млн. куб. км солей. Лишь несколько уступают им по масштабу гиганты (1,0–1,5 млн. куб. км соли) – Центрально-Европейский, Персидского залива, Атласско-Северосахарский и Приатлантический (Присевероамериканский). Общие объемы солей, заключенных в крупных соленосных бассейнах, грандиозны – порядка 25 млн. куб. км. Среди соленосных бассейнов мира около половины (при этом среди крупнейших – большинство, а супергиганты – все) на преобладающей части своей площади интенсивно осложнены соляной (солянокупольной) тектоникой и именуется солянокупольными. Наиболее значительные масштабы проявления солянокупольных образований демонстрируют многие соляные супергиганты и гиганты, насчитывающие каждый от нескольких сотен до 1000 и более солянокупольных структур. Среди наиболее крупных соленосных бассейнов мира лишь в некоторых солянокупольная тектоника проявлена весьма ограниченно (Восточно-Сибирский, Амударьинский, Западно-Канадский, Пермский). В целом, в солянокупольных структурах заключено не менее 50–60% всей массы солей мира, а во многих крупнейших бассейнах в них сосредоточено свыше 70–80% общего объема солей этих бассейнов. В итоге, в современной стратифере соляные массы образуют два морфологических (и морфокинетических) типа, контрастно различающихся между собой: солянокупольный (субвертикальный) и стратифицированно-пластовый (субгоризонтальный). Ориентировочная оценка интенсивности проявления соляной тектоники в крупнейших бассейнах мира отражена на рис. 1.

Ныне очевидно, что почти все соленосные бассейны нефтегазоносны (но не все нефтегазоносные – соленосны). Часто границы нефтегазоносных бассейнов проводятся по контурам распространения солей. Значимость солей как фактора, контролирующего размещение залежей углеводородов, хорошо известна; она чрезвычайно высока (хотя и совершенно различна) как при их пластовом залегании, когда соли образуют лучший вид покрышек, так и в условиях солянокупольной тектоники, когда основную контролируемую роль выполняют солянокупольные образования и сопряженные с ними структурно-дислокационные и тектонические осложнения.

Обсуждая геологические аспекты проблемы нефтегазоносности бассейнов, мы будем ориентироваться на общую продуктивность и использовать обобщающий термин «нафтиды», включающий углеводороды «в газовом, жидком, полутвердом и твердом состояниях или в виде смеси этих фаз»⁵. Широко и конструктивно этот термин использовал Н.С. Кравченко⁶, которым был введено понятие «нафтидный бассейн», объединяющий бассейны с широким спектром скоплений углеводородов разного фазового состояния. Для оценки масштабов таких бассейнов К.Н. Кравченко предложил их градацию по общим геологическим запасам углеводородов. Несколько измененный вариант размерных категорий К.Н. Кравченко мы приняли за основу при анализе ориентировочных масштабов

¹ Жарков М.А. Палеозойские соленосные формации мира. М.: Недра, 1974. 391 с.; Беленицкая Г.А. Минералогия соленосных бассейнов мира Соленосные осадочные бассейны Северной Америки // Планета Земля. Энциклопедический справочник. Гл. ред. Л.И. Красный. Т. Минералогия. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. Кн. 1. С. 165–189. Кн. 4. С. 123–214, и др.

² Кравченко К.Н. Бассейновая основа общей теории нафтидогенеза. М.: НИИ-Природа. 2004. 66 с.

³ Гаврилов В.П. Геология и минеральные ресурсы мирового океана. М., Недра. 1990. 323 с.; Карта нефтегазоносности мира. Масштаб 1:15000000. Объяснительная записка. Координаторы В.И. Высоцкий, Ю.Г. Наместников и др. Науч. ред. В.И. Высоцкий, Е.Н. Исаев, К.А. Клещев и др. М.: ВНИИЗарубежгеология, 1994. 196 с. и др.

⁴ Жарков М.А. Указ. соч.; Калинин М.К. Соленаккумуляция, образование соляных структур и их влияние на нефтегазоносность. М., 1973. 132 с.; Беленицкая Г.А. Осадочные бассейны Земли. Соляная тектоника. Литогенез // Энциклопедический справочник «Планета Земля». Гл. ред. Л.И. Красный. Т. 2: Тектоника и геодинамика. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. С. 189–222, 354–375, 1211–1220; Беленицкая Г.А. Минералогия соленосных бассейнов мира. Соленосные осадочные бассейны Северной Америки.

⁵ Леворсен А. Геология нефти и газа. М.: Мир. 1970. С. 15.

⁶ Кравченко К.Н. Указ. соч.

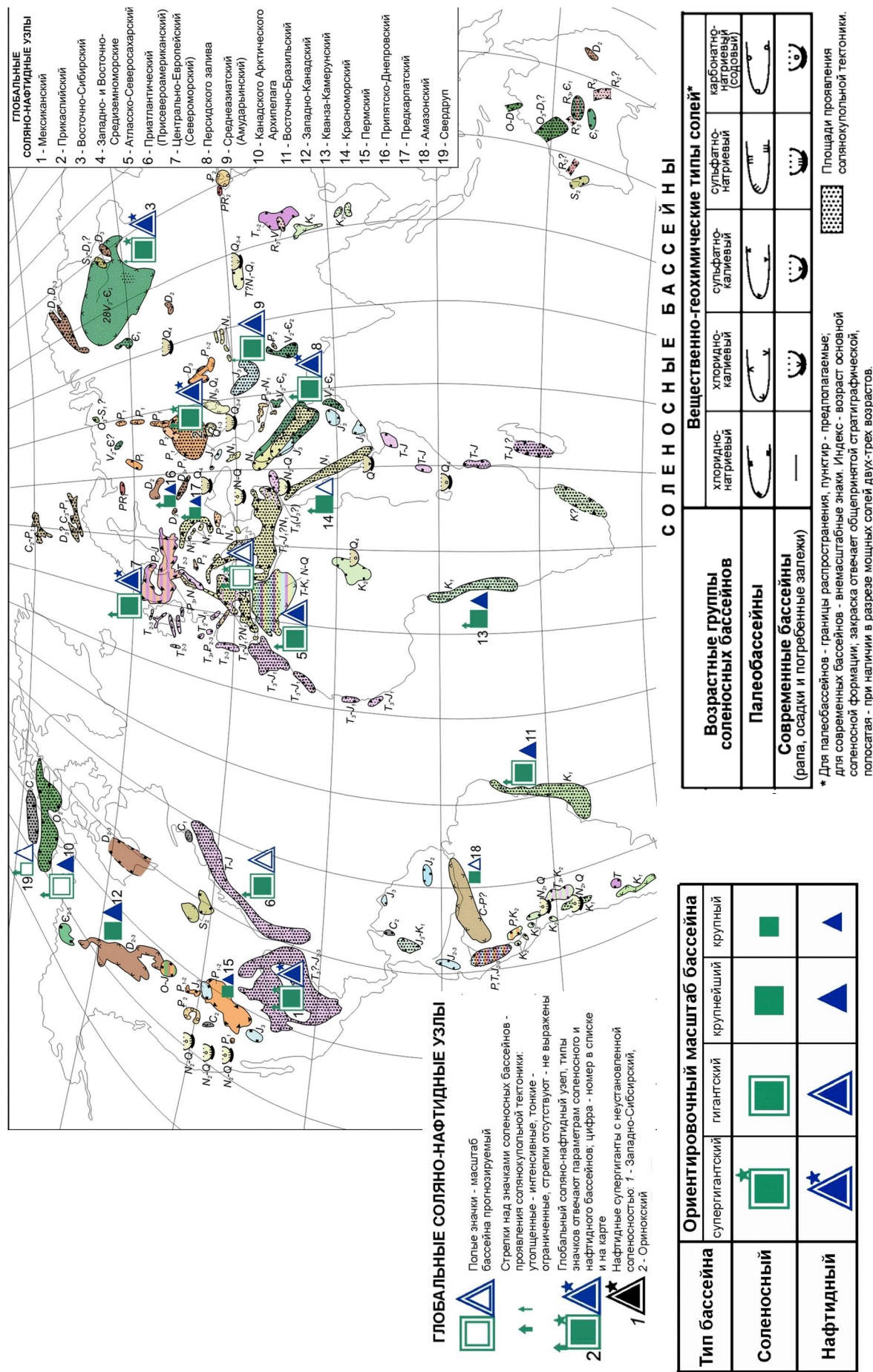


Рис. 1. Схематическая карта крупнейших соляно-нафтидных узлов мира. Составила Г. А. Беленицкая. Обобщение по опубликованным данным и авторским материалам (см.: Беленицкая Г. А. Осадочные бассейны Земли. Соляная тектоника. Литогенез; Беленицкая Г. А. Минералогия соленосных бассейнов мира. Соленосные осадочные бассейны Северной Америки).

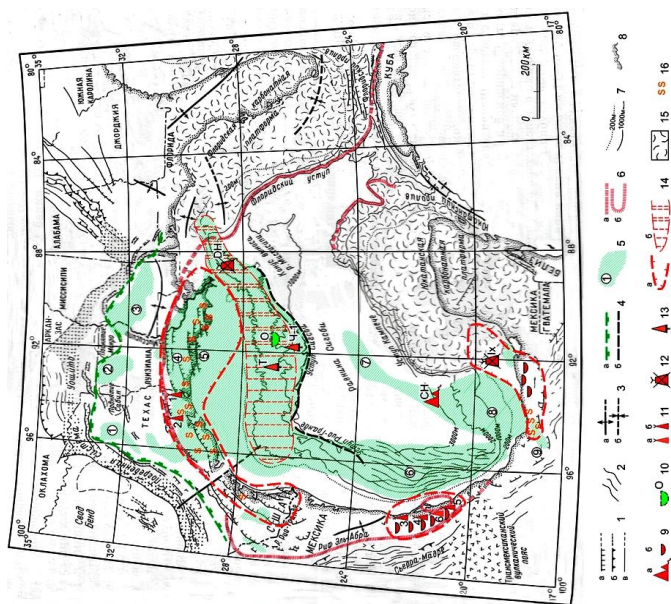


Рис. 2. Схематическая карта Мексиканского нефтяного бассейна Составила Г.А. Беленицкая. Основа модифицирована по Д. Ангуану с соавт.¹; проявления восходящих природных разгрузок, их следствий и геотехногенных аварий – обобщение по разным источникам 1 – тектонические нарушения (пунктир – предполагаемые); а – сбросы, б – надвиги, в – прочие; 2 – антиклинали; 3 – оси сводов (а) и прогибов (б); 4 – границы солянокупольных территорий; а – общая северная граница солянокупольной провинции, б – южная граница распространения соляных покровов континентального склона Мексиканского залива; 5 – области развития солянокупольных структур, цифры в кружках – солоносные бассейны: 1 – Восточно-Техасский, 2 – Северо-Луизианский, 3 – Миссисипский, 4 – побережья Мексиканского залива, 5 – Прибрежный, 6 – Мексиканский, 7 – Сигби, 8 – Кампече, 9 – Теуантепекский; 6 – нижнемеловые рифы: а – барьерный (край нижнемелового шельфа), б – атолл Голд-Лейк; 7 – изобаты; 8 – береговая линия; 9 – асфальтовые глубоководные вулканы Чаполоте (CH) залива Кампече (а) и прибрежные озера Мексики (б); 10 – глубоководное рассольное озеро Орка (O); 11 – фонтанирующие аварийные скважины на суше: а – с рекордными дебитами, б – то же и с рекордными общими излиями² (1 – Спидлтон, 2 – Хамбл, 3 – Бос-Бокас, 4 – Касиано, 5 – Петеро-дель-Льяно, 6 – Серо-Ауль; 12 – крупнейшие аварии платформ глубоководного бурения (DH – Deer Hogtop, IX – Ixtoc); 13 – морские скважины с рекордными показателями: Т – Тибр, самая глубокая в мире продуктивная скважина, Ч-1 – Челленджер-1, пробуренная в 1968 г. на рекордной глубине моря 3585 м; 14 – нефтяногазовые территории в акватории и на побережье Мексиканского залива: а – контуры основных областей с установленной нефтегазоносностью на побережье и шельфе, б – области континентального склона с установленными залежами углеводородов и высокими перспективами нефтегазоносности (двойные линии – то же, с прослеженным широким распространением интенсивных восходящих разгрузок нефти, газов, рассолов, грязевых вулканов, газогидратов, соляных и глиняных диапиров, см. рис. 4); 15 – карбонатные платформы; 16 – основные области распространения месторождений самородной серы в кепроках соляных куполов (сероносные провинции, на севере Техас-Луизианская, на юге Теуантепекская).

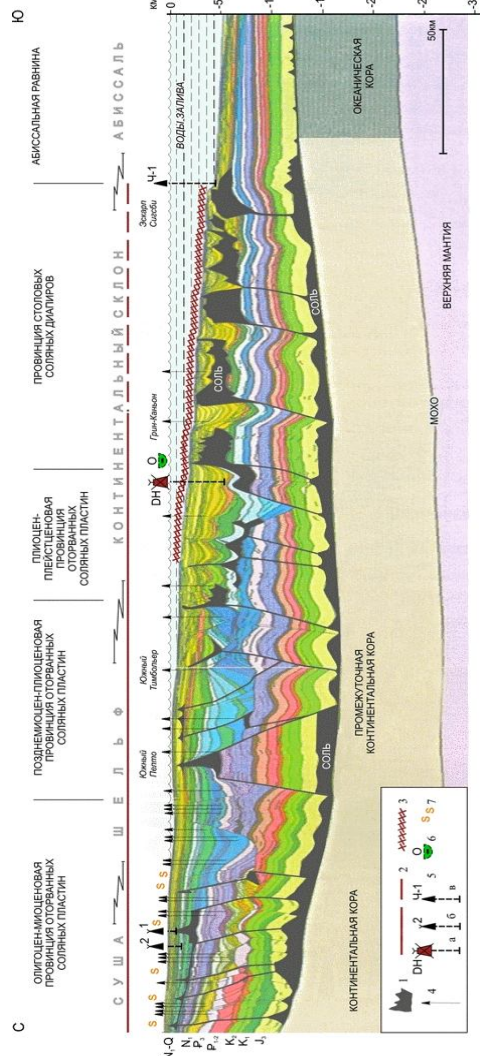


Рис. 3. Субмеридиональный профиль через северную часть акватории Мексиканского залива (от Луизианы до впадины Сигби). Модифицировано по McBride B.C.³ с дополнениями. Стратиграфическая записка отвечает оригиналу (отличается от общепринятой); возрастные индексы указаны слева. 1 – соли: в основании осадочного разреза – Иоанн, в верхней части в составе неоген-четвертичных отложений – аллохтонные соляные покровы, оторванные от материнских солей; 2 – область установленной нефтегазоносности (сплошная линия – подтвержденной бурением); 3 – область установленной современной интенсивности развития восходящих разгрузок нефти, газов, рассолов, грязевых вулканов, газогидратов, а в подстилающем разрезе – соляных и глиняных диапиров и многоразовных залежей углеводородов; 4 – скважины; 5 – ориентировочные проекции на профиль скважин: а – аварийной Deerwater Hogtop, 2010 г., б – аварийных 1 и 2 на северном побережье залива, в – Челленджер-1, 1968 г.; 6 – ориентировочное положение на профиле глубоководного рассольного озера Орка; 7 – область распространения месторождений самородной серы в кепроках соляных куполов (Техас-Луизианская сероносная провинция).

¹ Ангуан Д., Мартин мл. Р., Пайл Т., Брайант У. Континентальные окраины Мексиканского залива // Геология континентальных окраин. Под. ред. К. Берка и Ч. Дрейка. М.: Изд-во Мир, 1979. Т. III. С. 32.
² Перродон А. История крупных открытий нефти и газа. Пер. с англ. М., Мир, 1994. 255 с.; Леворсен А. Геология нефти и газа. М.: Мир, 1970. 640 с.
³ McBride B.C. The evolution of allochthonous salt along a megaregional profile across the Northern Gulf of Mexico Basin. AAPG Bulletin. 1998. V. 82. N 5B. P. 1037–1054.

нафтидных бассейнов, сопряженных с соленосными. При отнесении нафтидных бассейнов к тем или иным из категорий дополнительно использованы обобщающие работы¹, а также многочисленные количественные оценки в отечественных и зарубежных справочных и региональных публикациях.

Нафтидный потенциал многих соленосных бассейнов чрезвычайно высок. Именно им отвечает большинство его глобальных максимумов, в том числе супергиганты и гиганты Мексиканского залива, Прикаспийский, Персидского залива, Североморский, Амударьинский, Западно-Канадский и ряд других. Особенно это характерно для солянокупольных бассейнов, в разрезах которых сосредоточены крупнейшие скопления углеводородов, порой образующие многоуровневые колонны – от неглубоких (первые сотни метров) до вскрываемых на все больших глубинах. Нередко сопоставимы масштабы соленосности и нефтегазоносности и в менее крупных бассейнах.

Есть, однако, и другой уже упоминавшийся аспект проблемы. Не во всех нафтидных бассейнах соли известны. Хотя они широко развиты в большинстве из них, причем особенно масштабно в наиболее крупных, однако факт их отсутствия в разрезах части нафтидных бассейнов (в том числе в супергигантах Западно-Сибирском и Оринококском) делает связи не столь однозначными (правда, «бессолевой» характер некоторых бассейнов, по-видимому, «временный», соли в них просто еще не вскрыты бурением.)

Тем не менее, отчетливое соответствие подавляющему большинству глобальных соляных (и солянокупольных) гигантов столь же масштабных нафтидных гигантов позволяет выделить глобальные «соляно-нафтидные узлы» (СНУ) и анализировать их как единые системы. На схематической карте (рис. 1), отражающей общую картину размещения соляных (и солянокупольных) бассейнов мира, показаны наиболее значительные СНУ. Отвечающие им значки отражают масштабы соленосности и нафтидности каждого СНУ (в принятых градациях) и интенсивность проявления солянокупольной тектоники. В группу крупнейших СНУ вошло большинство соляных и нафтидных гигантов. В их числе: Мексиканский, Прикаспийский, Восточно-Сибирский, Персидского залива, Североморский, Западно- и Восточно-Средиземноморские, Атласско-Северосахарский, Приатлантический, Кванза-Камерунский и др.

Некоторые общие особенности соляно-нафтидных узлов. Крупные СНУ имеют ряд однотипных особенностей структурно-тектонического размещения, состава и строения. Главные черты их геоструктурной и палеотектонической позиции во многом аналогичны таковым солянокупольным бассейнов². Типична связь с гигантскими и глубочайшими депрессионными геоструктурами длительного и интенсивного развития; большая глубина погружения фундамента и, соответственно, резко увеличенная (до 10–22 км) мощность осадочного (иногда – вулканогенно-осадочного) выполнения; значительно сокращенная мощность континентальной коры; иногда наличие «окон» коры океанического типа; четко выраженные системы ступенчатых разломных ограничений. Среди разных типов геоструктурных элементов, контролирующих размещение значительных СНУ, особое значение имеют краевые (окаинно-континентальные) системы зон сочленения платформ с подвижными областями, находящиеся на разных стадиях развития. Основные среди них – пассивноокаинные, особенно активизированные их разновидности (Кванза-Камерунский, Восточно-Бразильский, Присевероамериканский, Мексиканского залива), краевые прогибы активноокаинных и коллизионных поясов и остаточные бассейны (Северо-Аравийские Средиземноморские, Прикаспийский и др.), а также межконтинентально-рифтовые – еще только формирующиеся окраины (Красноморский). Меньшие масштабы типичны для СНУ рифтогенных систем внутренних частей платформ (Припятско-Днепровский) и впадин складчатых областей (Трансильванский). Намечается трансрегиональная поясность размещения, отражающая таковую контролирующих геодинамических систем.

Разрезам большинства СНУ присуща вертикальная дисгармоничность: как правило, в них выделяются разделенные солями два структурных мегакомплекса, которым отвечает два этажа нефтегазоносности – подсолевой и надсолевой, – резко различающиеся типом и интенсивностью дислоцированности пород и характером нефтегазоносности.

Специфика соляных толщ – их масштаб, состав, строение, морфология и кинетика – входит в число важных общих особенностей СНУ. В их числе: очень значительные мощности, часто присутствие в разрезе 2–3, а иногда и более соляных толщ, калиеносность солей; значительные (до 5–10 км, иногда больше) глубины расположения основных – наиболее значительных по мощности соляных толщ. Общие черты характеризуют и проявления соляной тектоники: часто весьма высокая интенсивность, совпадение областей интенсивного проявления с наиболее погруженными частями (депоцентрами) осадочных бассейнов и самих соляных толщ; тяготение зон максимальной интенсивности к разломам, крутым флексурам и другим осложнениям фундамента или подсолевого ложа, бортовым ограничениям впадин и др. Весьма характерно наличие аллохтонных соляных покровов (правда, их генетическая природа получила обоснование лишь в последние годы³ и пока идентифицируется сравнительно редко). Широко распространен парагенез соленосных толщ с масштабными рифогенно-карбонатными формациями (часто с «карбонатными платформами»), которые либо подстилают соленосные толщи, либо перекрывают их (причем их соотношение отчетливо зависит от палеотектонической позиции⁴).

Устойчивым показателем состава нафтидов СНУ является их высокая сернистость. В наибольшей мере она свойственна рифогенно-карбонатным коллекторам. Именно с ними связаны все без исключения глобальные максимумы газовой серы⁵.

¹ Гаврилов В.П. Указ. соч.; Карта нефтегазоносности мира...; Перродон А. История крупных открытий нефти и газа. Пер. с англ. М.: Мир. 1994. 255 с., и др.

² Беленицкая Г.А. Осадочные бассейны Земли. Соляная тектоника. Литогенез.

³ McBride B.C. Op. cit.; Беленицкая Г.А. Типы седиментогенеза: расширенный вариант классификации // Отечественная геология. 2008. № 3. С. 29–45; Беленицкая Г.А. Мексиканский залив – центр природных и геотехногенных нефтяных катастроф // Рег. геол. и металлогения. 2011. № 45. С. 51–69.

⁴ Беленицкая Г.А. Минералогия соленосных бассейнов мира Соленосные осадочные бассейны Северной Америки.

⁵ Belenitskaya G.A. Distribution pattern of hydrogen sulphide-bearing gas // Petroleum Geoscience. London. 1998. N 4. P. 49–66.

Чрезвычайно важная черта СНУ – высокая флюидодинамическая напряженность недр, определяющая интенсивную восходящую разгрузку рассолов и углеводородов, особенно широко и эффектно проявленную в бассейнах с активной солянокупольной тектоникой. Здесь сосредоточены и разные типы их высокодебитных источников рассолов и нефтей, и озера-разливы (также рассольные и нефтяные), и сверхпродуктивные фонтанирующие скважины, связанные с зонами высоких аномальных пластовых давлений в недрах, и области широкого и масштабного развития грязевого и рассольно-соляного вулканизма, и активный соляной и глиняный диапиризм¹. Локализация в пределах СНУ разных видов современных масштабных разгрузок позволяет отнести их к числу крупнейших очагов восходящей разгрузки.

И еще одна особенность большинства СНУ, являющаяся во многом производной от предыдущей (хотя и несколько иной – геотехногенной – природы): чрезвычайно высокая аварийность при бурении на нефть и газ.

Более подробно и наглядно мы рассмотрим типичные показатели СНУ на конкретном примере Мексиканского бассейна – одного из крупнейших в мире по богатству недр солями и углеводородами.

Мексиканский бассейн как эталонный соляно-нафтидный узел. Даже среди других гигантских бассейнов мира Мексиканский бассейн выделяется и пространственными характеристиками, и чрезвычайно ярким проявлением многих важнейших показателей – геологических, нефтегазовых, флюидодинамических. Он входит в число мировых супергигантов как соляных, так и нафтидных. Отражая типичные черты тех и других, он может служить модельным и эталонным объектом. К тому же он фокусирует главные контрастные тенденции современного развития нефтегазовой геологии и нефтедобычи: с одной стороны – стремительное освоение все более глубоких и глубоководных областей, обязанное колоссальным достижениям науки, техники и технологии, рост коэффициентов успешности бурения и процента «гигантов» среди открытых месторождений; с другой – столь же стремительный, а порой и опережающий рост сложностей и, главное, угроз со стороны «потребованных» недр, все чаще выходящих из-под контроля. Именно в Мексиканском бассейне установлены рекорды почти всех показателей нефтяного бурения – и победные и «провальные»: и общей глубины, и глубоководности, и продуктивности, и аварийности. Особенно ярко высветила все эти тенденции авария Deepwater Horizon, продемонстрировав одновременно и действительно высочайшие достижения человека, и очевидный факт превышения им пределов дозволенности при вторжении в земное неведомое, и неготовность к ликвидации экологических последствий.

Геологические, нефтегазовые и флюидодинамические особенности Мексиканского бассейна

Мексиканский осадочный и отвечающий ему нефтегазоносный бассейн представляет собой гигантское осадочно-породное тело, своеобразный наполненный до краев котлован, диаметром 1,5–2 тыс. км и глубиной до 15 км. Его борта и дно (фундамент) сложены дислоцированными и в разной мере метаморфизованными образованиями, а выполнение – слоистыми комплексами осадочных пород и многочисленными рвущими их солянокупольными телами. Большая внутренняя часть бассейна погружена под акваторию Мексиканского залива, включающую шельф, континентальный склон и сравнительно плоскую центральную абиссальную равнину – зону Сигсби-Дип, глубиной 3,75–4,38 км (рис. 2, 3).

Заложение котловины Мексиканского бассейна связано с распадом в поздне триасово-юрское время возникшего незадолго до этого, в конце палеозоя, глобального суперматерика Пангеи. Ее заполнение осадками протекало на фоне процессов рифтогенеза, переходящего в спрединг, формирования малого океанического бассейна и последующего интенсивного прогибания преимущественно в пассивноокеаничном режиме. В итоге возникла крупнейшая депрессионная геоструктура, одна из ключевых особенностей которой – наличие в центральной части «базальтового окна» (разрыва в подстилающей континентальной коре) – особенность, свойственная лишь ограниченному числу осадочных бассейнов, всегда – самых крупных. Непосредственно над «окном» мощности осадочного выполнения резко сокращаются, глубины же акваторий, наоборот, возрастают, образуя уступы, обрамляющие наиболее глубокую центральную равнину. Для западного и южного внешних обрамлений бассейна характерна высокая тектоническая активность, начавшаяся уже в мелу и проявляющаяся до настоящего времени.

Наиболее значимые черты осадочного выполнения Мексиканского бассейна – огромные общие мощности, достигающие 10–15 км (величин, для осадочных бассейнов максимальных) и сочетание в разрезе трех также мощнейших (тысячи метров), но по составу совершенно различных мегакомплексов: соляного, рифогенно-карбонатного и терригенного². Соли Лоанн (T_3 – J_3) – основная составляющая нижнего мегакомплекса – являются доминирующим элементом и всего разреза. Возникнув на ранней континентально-рифтовой стадии формирования бассейна, они ныне на своем «законном» месте в нижних частях разреза сохраняются ограниченно. Значительная же их часть находится либо в солянокупольных структурах, протыкающих вышележащие слоистые толщи, либо в расслаивающих эти (вышележащие) толщи соляных покровов. Особенности залегания солей и их перемещений чрезвычайно важны и для распределения углеводородов и для жизни бассейна в целом, так что мы вернемся к этому вопросу чуть ниже. Для среднего рифогенно-карбонатного мегакомплекса доминантой являются барьерные рифы и атоллы, составляющие основу так называемой карбонатной платформы – одной из крупнейших в мире. Ее кольцеобразное, не замкнутое лишь на юго-востоке тело имеет гигантские размеры (протяженность – почти 5 тысяч км, ширина – нескольких сотен км, мощность – до 2 км) и содержит лучшие коллекторы и ловушки углеводородов. Третий верхний мегакомплекс, существенно терригенный, сложенный песчано-

¹ Беленицкая Г.А. Мексиканский залив – центр природных и геотехногенных нефтяных катастроф.

² Антуан Д., Мартин мл. Р., Пайл Т., Брайант У. Указ. соч.; Гаврилов В.П. Указ. соч.; Перродон А. Указ. соч.; Геология и минеральные ресурсы мирового океана. М.: Недра. 1990. 323 с.; История крупных открытий нефти и газа. Пер. с англ. М.: Мир. 1994. 255 с.; Забанбарк А. Структурные черты и перспективы нефтегазоносности континентальных склонов бассейна Мексиканского залива (акватория США). Океанология. 2006. Т. 46. № 4. С. 596–602; Конохов А.И. Геологическое строение, этапы развития и нефтегазоносные комплексы бассейна Мексиканского залива // Литология и пол. ископ. 2008. № 4. С. 425–440 и др.

глинистыми отложениями дельт и подводных конусов выноса, богат одновременно и прекрасными коллекторами, и ловушками, и глинистыми покрывками. Глинистым толщам, широко развитым в составе мегакомплекса, во многом обязаны масштабные проявления глиняного диапиризма и грязевого вулканизма. Все выполнение неравномерно (от нескольких до 20–30 %) пропитано подземными водами, преимущественно рассольными, и содержит множество скоплений свободных углеводородов – главную притягательную силу бассейна.

Высокая нефтегазовая продуктивность с тысячами открытых нефтегазовых залежей, в том числе крупнейших, характеризует весь надсолевой разрез вплоть до плейстоценовых отложений. В становлении нефтегазоносности Мексиканского бассейна определяющую роль играли и продолжают играть литолого-формационные и тектонические особенности его геологического строения. Литолого-формационные мегакомплексы обеспечивают углеводороды прекрасными многоуровневыми резервуарами и покрывками. Системы солянокупольных образований контролируют крупные зоны нефтегазонакопления, а отдельные соляные поднятия, покровы, диапиры и их кепроки – многочисленные залежи. «Базальтовое окно», ограниченное рифтогенными системами, обеспечивает устойчивое интенсивное прогибание дна бассейна, его повышенную открытость и проницаемость для восходящих энергетических и флюидо-массопотоков из подстилающего субстрата. Повышенная тектоническая активность западного и южного обрамлений с преобладанием напряжений сжатия усиливает общую напряженность и сейсмо-тектоническую активность недр.

Главная черта флюидодинамики бассейна – высокая энергетическая напряженность недр с общим восходящим вектором напоров. Ее отражением и свидетельством является ряд взаимосвязанных энергетических и вещественных признаков: высоконапорная нефтегазоносность, значительные величины пластовых давлений, часто аномально- и сверхвысоких, градиентность этих значений в пространстве и пульсационность во времени, многоуровенность нефтегазовых залежей (до 20–30 и более), высокая мобильность углеводородных и других подвижных систем, наличие восходящих потоков флюидов – «труб» и «струй», фиксируемых сейсмическими методами, многочисленные соляные и глиняные диапиры, а также обилие сверхпродуктивных фонтанирующих скважин¹. Показательно, что эти особенности характеризуют весь разрез, от максимальных достигнутых глубин до самых молодых плиоценовых и даже плейстоценовых осадков, залегающих неглубоко от поверхности дна. В итоге недр бассейна, пронизанные восходящими напорными потоками, субвертикальными системами расположенных друг над другом скоплений углеводородов и других подвижных масс – жидких, газообразных, разжиженных и пластичных, подобны своеобразному гигантскому закипающему реактору. «Объемы флюидов, прорывающихся под высоким давлением сквозь нефтепроводящие толщи... измеряются астрономическими цифрами... Механизм периодических квантовых прорывов... связан с колебательными современными тектоническими подвижками»². Именно через их восходящую динамику «человек ощущает современную жизнь недр»³.

Особенно важным участником и инициатором восходящих перемещений являются соли.

Соляные недра Мексиканского бассейна

Соляные массы, заключенные в недрах Мексиканского бассейна, играют исключительную роль в их жизни, действительно являясь их «солью». Бассейн представляет уникальное скопление соляных масс, занимающих огромные (около 1,5 млн. км²) площади в пределах большей части акватории (включая многие ее абиссальные участки) и обрамляющей суши⁴. Соли Лоанн (T₃?–J₃) залегают на глубинах от 5–6 км на севере и северо-западе бассейна до 10–12 км и более в его центральных областях (рис. 2, 3, 4). Больше половины их массы ныне находится либо в восходящем диапировом, либо в перемещенном покровообразном состоянии.

В Мексиканском бассейне установлено широчайшее развитие чрезвычайно интересных соляных образований – аллохтонных покровов. В других солянокупольных бассейнах мира они распространены весьма ограниченно, либо просто не опознаны. Здесь же они прослежены на огромных площадях⁵ (рис. 3, 4). Их возникновение рисуется следующим образом. Соль диапиров в ходе их восходящего роста достигала дна акваторий соответствующего времени и, продолжая интенсивно выдавливаясь, растекалась, образуя сначала затеки-языки, а затем – уплощенные тела, субсогласно налегающие на нормально-осадочные комплексы (а позже, в свою очередь, перекрытые более молодыми осадками). Поскольку толщина подводящих каналов-диапиров по мере перетока солей часто сокращается, вплоть до полного пережима, возникшие в итоге на новых уровнях тела перемещенных соляных масс не всегда сохраняют видимые связи с материнскими солями. За что получили в американской литературе название аллохтонных покровов. Так что для Мексиканского бассейна, наряду с «традиционными» субвертикальными солянокупольными телами, типичны также и субгоризонтальные, залегающие выше материнских солей и часто как бы вне связи с ними. Активное образование покровов началось в палеогене, наиболее интенсивно проявлялось в миоцене, достигло максимума в позднем миоцене и продолжалось в плио-плейстоцене. Они широко распространены в пределах тех областей шельфа и особенно континентального склона, которые максимально интенсивно прогибались в соответствующие отрезки времени, создавая уклоны, благоприятные для стекания солей. Уступ Сигсби по этой схеме рассматривается в качестве фронта сползающих к югу соляных масс. Образование покровов процессы галокинеза не завершаются. Многие из них, в свою очередь, весьма интенсивно осложнены диапирами и разделяющими их глубокими впадинами. Так что соль непрестанно живет – движется, восходит, течет.

¹ Аникиев К.А. Аномально высокие пластовые давления в нефтяных и газовых месторождениях. Л.: Недра. 1964. Тр. ВНИГРИ. Вып. 233. 168 с.; Леворсен А. Указ. соч.; Перродон А. Указ. соч.; История крупных открытий нефти и газа; Sassen R., Sweet S.T., Milkov A.V. et al. Thermogenic vent and gas hydrat in the Gulf of Mexico slope: Is gas hydrat decomposition significant? *Geology*. 2001. V. 29. N 2. P. 107–110, и др.

² Аникиев К.А. Указ. соч. С. 90.

³ Там же. С. 104.

⁴ Беленицкая Г.А. Осадочные бассейны Земли. Соляная тектоника. Литогенез; Беленицкая Г.А. Минералогия соленосных бассейнов мира Соленосные осадочные бассейны Северной Америки.

⁵ McBride Barry C. *Op. cit.*, и др.

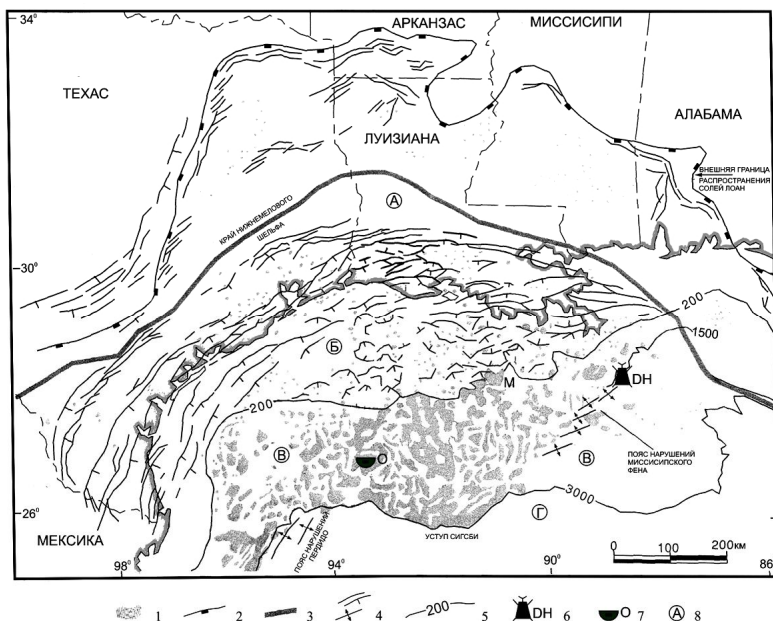


Рис. 4 Схема распространения соляных диапиров и покровов в северной половине бассейна Мексиканского залива (до глубины 3000 м). По McBride В.С.¹, модифицировано, с дополнениями. 1 – соляные диапиры и покровы (М – один из наиболее крупных соляных покровов Махогони); 2 – северная внешняя граница распространения солей Лоан (Т₃?–J₂₋₃); 3 – нижнемеловой барьерный риф (край нижнемелового шельфа); 4 – разломы и глубоководные складки; 5 – изобаты, м; 6 – местоположение аварийной скважины платформы Deer Horizon; 7 – глубоководное рассольное озеро Орка; 8 (буквы в кружках) – А – суша, Б – шельф, В – континентальный склон, Г – абиссаль.

Столь масштабная, разнообразная и при этом высоко мобильная осадочность осадочного чехла Мексиканского региона во многом определяет характернейшую черту его нефтегазоносности – многообразные, тесные и ярко выраженные связи залежей углеводородов с соляными телами. Сонахождение залежей углеводородов и соляных тел, в разной мере проявляющееся практически во всех нефтегазоносных регионах, где присутствуют соли, для Мексиканского бассейна особенно значимо. Как и везде, характер таких связей различен при пластовом и солянокупольном нахождении солей. Важно, что функции покрывок нефтегазовых залежей здесь успешно выполняют и аллохтонные покровы и более мелкие нависающие соляные «козырьки» диапиров.

Ярко выражен еще один аспект взаимосвязей солей и углеводородов, хорошо известный, но привлекающий меньше внимания. Речь о совместной восходящей миграции солей и углеводородов, обусловленной некоторым сходством их миграционно-реологических особенностей в условиях повышенных температур погружающихся осадочных толщ, и о транспортирующей роли солей в ходе такой миграции. Соль в своем диапировом восхождении как более плотная субстанция сильнее нарушает целостность вмещающих слоистых толщ и вокруг диапиров и над ними, формируя зоны повышенной проницаемости, куда и устремляются углеводороды. Т.е. соляные диапиры играют роль своеобразных таранов и «эвакуаторов», способствуя более интенсивной восходящей миграции углеводородов (правда, одновременно немного и тормозящих их восхождение – создавая на путях следования «заторы» в виде структурно-тектонических ловушек и покрывок). Важно, что и сами высоконапорные углеводороды, в свою очередь, изо всех сил «подталкивают» соли снизу. О высокой значимости всех таких процессов для Мексиканского бассейна свидетельствует как постоянное сопровождение солянокупольных структур с углеводородами, так и множество других неоднократно описанных и проиллюстрированных особенностей их характерных теснейших соотношений⁴.

Подобные «миграционные» взаимосвязи углеводороды обнаруживают не только с солями, но и с любыми «подвижными» породами, прежде всего с глинистыми – главными участниками глиняного диапиризма и грязевого вулканизма.

А что же происходит при выходе всех этих подвижных восходящих потоков из недр на поверхность – на морское дно и прибрежную сушу?

Ныне насчитывается свыше тысячи солянокупольных структур. Сотни из них – очень крупные, с горизонтальными сечениями, достигающими сотен кв. км. Например, размеры сечения одного из крупнейших и хорошо изученных штокообразных тел Махогени, представляющего собой осложнение соляного покрова, около 400 кв. км (рис. 4)². Мощности солей при пластовом залегании составляют 1–1,5 (2,0) км, в покровах – 6 км, а в диапирах превышают 10 км.

В итоге огромное осадочное тело Мексиканского бассейна ныне неравномерно расчленяется своеобразной гигантской соляной решеткой, созданной сочетанием субгоризонтальных тел (материнских в основании разреза и аллохтонных, расстилающихся выше лежащие более молодые отложения) и лесом субвертикальных, восходящих от них образований (столбов, башен, гигантских капель, протяженных хребтов, стен и т.д.). Обратим еще раз внимание, что вертикальные соляные тела прорывают даже самые молодые плейстоценовые осадки, выходят на поверхность и возвышаются над ней. Т.е. растут и поныне. «Благодаря своим особым физическим свойствам, соль вовлечена в вечный круговорот... Она никогда не достигает конечного состояния покоя»³.

¹ Ibid.

² Rowan M., Ratiff R., Trudjill B., Duart J. Emplacement and evolution of the Mahogeny salt body, central Louisiana outer shelf, Northern Gulf of Mexico. AAPJ Bulletin. 2001. V. 85. N 6. P. 947–969.

³ Trusheim F. Zur Bildung der Sal lager im Rotliegenden und Mesozoikum Mitteleuropas. Beihefte zum Geologischen Jahrbuch. Hannover, 1971. Helt 112. S. 11.

⁴ Леворсен А. Указ. соч. Перродон А. Указ. соч., и др.

Живое дно Мексиканского залива

Поверхностными проявлениями динамичности недр и пульсирующей жизни внутриземных систем являются всевозможные «выплески» подвижных компонентов на дно акваторий и окружающие побережья – естественные очаги их разгрузки. Разнообразные типы таких очагов зафиксированы на всех глубинах залива.

Широкий спектр подвижных участников разгрузок по их вещественно-реологическим и миграционным особенностям можно разделить на две группы: флюиды (подземные воды и рассолы, жидкие углеводороды, газы) и текущие породные массы (разжиженные и пластично-текучие). Для участников каждой группы характерны свои типы очагов разгрузки и свои особенности динамики. Основные их разновидности систематизированы в табл. 2.

Таблица 2

Восходящие «холодные» (амагматические) разгрузки¹

РАЗГРУЖАЮЩИЙСЯ МАТЕРИАЛ		ХАРАКТЕР РАЗГРУЗКИ	
Группа	Подгруппа	Объекты разгрузки	Способ разгрузки
ФЛЮИДЫ	Газы (CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S и др.)	Очаги разгрузки: восходящие источники, грифоны, сипы, сипажки, покмарки, высачивания и др., иногда с образованием озер (наземных и подводных)	Излияние, истечение, фонтанирование
	Жидкие УВ (нефть, конденсат)		
	Подземные минеральные воды, рассолы		
ТЕКУЩИЕ ПОРОДНЫЕ МАССЫ	Флюидизированные (разжиженные) породные массы (УВ-водно-грязевые, УВ-рассольно-соляные)	«Осадочные вулканы»: грязевые, УВ-рассольно-соляные, гидро-, газовые, смешанные	Извержение (амагматическое) эксплозивное, взрывное, истечение
	Рейдные (пластично-текучие) породные массы, участвующие в диапиризме (глинистые, кремнистые, соляные и др.)	Диапиры глиняные, кремнистые, соляные, гипсовые и др.	Диапировое выдавливание, излияние, растекание

Флюиды вырываются из недр в основном через разные виды источников путем излияний, истечений, фонтанирования; разжиженные породные массы – через так называемые «осадочные вулканы» путем эксплозивных извержений и истечений; пластично-текучие массы – через диапиры и диапироподобные тела путем выдавливания, излияния, растекания. Разные виды очагов разгрузки обычно образуют сочетания – парагенезы, включающие диапиры, осадочные вулканы, восходящие источники газов, нефтей, подземных вод и их смесей. Их локализация в одних и тех же регионах создает разномасштабные сгущения – «узлы разгрузки». Мексиканский залив в целом можно рассматривать как «суперузел разгрузки», в котором широко и масштабно представлены все типы подводных и наземных выходов на поверхность внутриземных систем: и высокодебитные источники, и озера-разливы (рассольные и нефтяные), и поля газогидратов, и «осадочные вулканы» с грязевыми и уникальными соляными и нефтеасфальтовыми излияниями, и ядра протыкания открытых диапиров. Внутри же этого суперузла прослеживаются многочисленные более локальные сгущения – узлы разгрузки меньших масштабов (рис.5).

Охарактеризуем немного подробнее особенно наглядные виды очагов разгрузки.

Восходящие источники, струи, потоки – наиболее выразительные и широко развитые выходы самых подвижных участников разгрузок – нефтей, газов, рассолов, их смесей. Если всего 20–30 лет назад они были известны, главным образом, лишь на суше, то теперь установлены повсеместно и в акваториях, в том числе и в самых глубоких их частях. Так, многочисленные сипы, струи, прорывы, выносящие нефть, газ, рассолы закартированы на обширных территориях всего северного континентального склона Мексиканского залива² (рис. 5). На многих из них, наряду с насыщающими осадки углеводородами, карбонатными корками, бактериальными матами, обнаружены и более значительные биогенные «постройки» и цветущие сообщества, по разнообразию видового состава весьма близкие описанным на знаменитых высокотемпературных «курильщиках». Над донными выходами нефти на водной поверхности залива неоднократно отмечались блуждающие нефтяные пятна. С газовыми разгрузками связаны их подповерхностные (поддонные) производные – скопления газогидратов, образующие обширные поля, слои, а также разнообразные поднятия, часто локализованные непосредственно вокруг выходов газовых струй.

Над высокодебитными источниками рассолов, нефтей, газов и вокруг них нередко возникают напорные озера-разливы. Для таких озер, «принудительно» питаемых снизу, характерны резкие аномалии ионно-солевого, микрокомпонентного и газового состава, разные виды придонной стратификации. Особенно интересны нефтяные и асфальтовые озера, буквально «вытекающие» из недр. Чрезвычайно богаты ими побережья Мексиканского залива, особенно южное и западное, где, наряду с другими естественными выходами нефти, их – «тысячи, и размеры их подчас очень велики»³. Использование именно таких проявлений нефти неоднократно обеспечивало успех при поисках углеводородов.

Широко распространены *грязевые вулканы*, причем все большее их количество устанавливается в акваториях. Очень характерны они для подводного конуса выноса реки Миссисипи. Объемы изливающихся при извержениях разжиженных породных масс, по имеющимся оценкам, огромны: при наземных извержениях – до 10 млрд. кв. м и более, при субаквальных – десятки млрд. кв. м. Весьма велик и сопряженный с грязевым вулканизмом флюидный вынос через многочисленные сальзы и грифоны.

¹ Беленицкая Г.А. Типы седиментогенеза: расширенный вариант классификации.

² Sassen R., Sweet S.T., Milkov A.V. et al. Thermogenic vent and gas hydrat in the Gulf of Mexico slope: Is gas hydrat decomposition significant? *Geology*. 2001. V. 29. N 2. P. 107, 108.

³ Перродон А. Указ. соч. С. 69

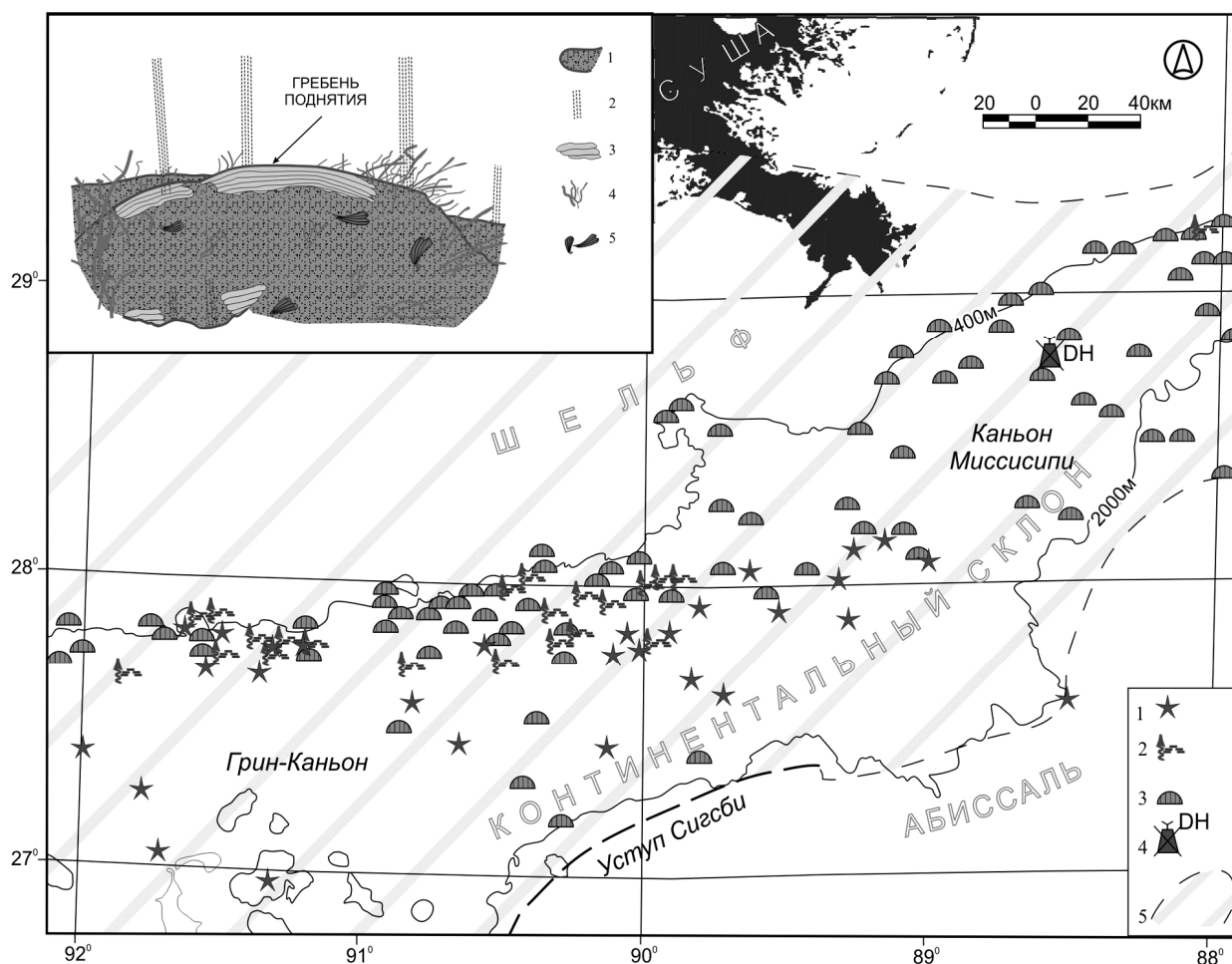


Рис. 5. Схема распространения сипов, хемосинтетических сообществ, газогидратов и залежей углеводородов в центральной части континентального склона Мексиканского залива (на глубинах 400–2000 м). Модифицировано по Sassen R., Sweet S.T., Milkov A.V. et al.¹: 1 – газогидраты; 2 – сипы нефтяные и газовые с хемосинтетическими сообществами; 3 – глубоководные открытия и залежи нефти и газа; 4 – место аварии платформы Deepwater Horizon; 5 – область широкого распространения соляных диапиров и соляных покровов.

На врезке – типичное газогидратное поднятие с газовыми струями и хемосинтетическими сообществами: 1 – газогидратное поднятие на дне; 2 – сипы и газовые струи; 3 – бактериальные маты; 4 – трубчатые черви; 5 – рассеянные бентосные биоценозы.

Открытые соляные диапиры, мощные «ядра протыкания» которых выходят на дно залива и прибрежную сушу и даже восходят над ними в виде соляных поднятий, холмов, столбов, можно отнести к одному из наиболее масштабных «каменных» проявлений и свидетельств восходящих разгрузок недр. Особенно впечатляют они на мрачных подводных глубинных равнинах². Правда, из-за сравнительно небольших скоростей подъема (по человеческим меркам, по геологическим же – чрезвычайно высоких), они далеко не самые динамичные из восходящих образований. Даже в фазы тектонической активности, когда скорости роста диапиров резко (на порядки) возрастают (К.А. Аникиев, Р.Р. Рахманов, З. Кукал). В этом отношении более наглядны сопровождающие их разгрузки высококонцентрированных рассолов и углеводородов. Но еще эффектнее катастрофические выбросы смесей газов, рапы и дробленой соли. Этот вид взрывных выбросов, главными участниками которых, в отличие от грязевых вулканов, являются соли и рассолы, хорошо известен при авариях скважин, а в природных условиях как будто впервые был отмечен в солянокупольных структурах на севере Галф-Коста³. Пока он еще не получил ни «научного статуса», ни наименования. По своим признакам он может быть отнесен к «соляному вулканизму» (точнее – рассольно-углеводородно-соляному) – разновидности «осадочного вулканизма». Весьма выразительны и глиняные диапиры, особенно в сочетании с надстраивающими их грязевыми вулканами, также широко распространенные в пределах шельфа и континентального склона Мексиканского залива.

Стоит особо отметить еще два интересные и масштабные образования, обязанные восходящим разгрузкам – подводные рассольные озера и асфальтовые вулканы.

¹ Sassen R., Sweet S.T., Milkov A.V. et al. Op. cit.

² Асфальтовые вулканы // Знание – сила. 2010. № 7. С. 26–31.

³ Леворсен А. Указ. соч.; Перродон А. Указ. соч.

Глубоководное рассольное «озеро» Орка (рис. 6) – одно из самых известных их представителей¹. Находясь под более чем двухкилометровой толщиной нормальной морской воды, это «озеро» содержит мощный (до 220 м) слой высококонцентрированных (порядка 250 г/л) рассолов. Оно расположено во впадине среди соляных диапиров и покровов в северной части континентального склона Мексиканского залива на глубинах около 2400 м. Впечатляют и глубины нахождения «озера», и значительные мощности слоя рассолов, и чрезвычайно большая их площадь (около 123 кв. км), и целый ряд геохимических особенностей рассолов, в частности высокие концентрации железа. По многим показателям – и вещественным, и пространственно-морфологическим, и генетическим – «озеро» весьма сходно с самым знаменитыми глубоководными рассолоносными котловинами Красного моря (по сути – такими же «озерами») и с менее масштабными рассолоносными впадинами в Средиземном. На суше же такие рассольные озера – вещь более обычная. И один из наиболее близких нам примеров – рассольное озеро Баскунчак.

«Асфальтовые вулканы» – другое еще более экзотическое образование Мексиканского залива³ (рис. 7). В 2003–2004 гг. в заливе Кампече в области континентального склона на глубинах около 3300 (!) м в зоне развития целой соляной горной системы, состоящей из гигантских подводных соляных холмов, поднимающихся над морским дном на 450–800 м, были открыты и обследованы нефте-асфальтовые излияния. Закартировано множество кратеров, извергающих нефть и асфальт, которые и были названы «асфальтовыми вулканами». Первый из них – Чапопоте (у ацтеков – смола) имел ширину до 5 км и высоту 400 м. Мощные, напоминающие лаву, нефте-асфальтовые потоки образуют целые поля, их толщина достигает 20 м; площадь покрытых асфальтом участков морского дна – более 1 кв. км. Удалось проследить даже динамику формирования покровов, увидеть «как текут асфальтовые реки, как они ветвятся, как пласты асфальта наслаиваются друг на друга и как здесь расселяются колонии необычных микроорганизмов, основу жизни которых составляет хемосинтез»⁴. Над асфальтовыми «вулканами» наблюдаются восходящие потоки и струи углеводородов, на поверхности моря – пятна нефти, а в ареалах вулканов и вблизи от них – проявления газогидратов и выходы свободного газа. Все эти образования вероятнее всего являются продуктами миграции углеводородов из их скоплений, разрушаемых в подстилающих отложениях. Окрестности вулканов и мощные слои асфальта населены бактериями и богатыми сообществами организмов – трубчатых червей (Vestimentifera), крупных двусторчатых моллюсков, крабов, мелких креветок, некоторых видов рыб и беспозвоночных. Во многих местах поверхность асфальта покрыта белой бактериальной пленкой.

Подводные и наземные естественные выходы нефтей и наземные нефтяные озера довольно многочисленны как в других участках Мексиканского региона, так и в некоторых других нефтегазоносных бассейнах. Однако столь значительные по масштабу, глубине и динамике излияния – все же редкость.

Отметим еще одно косвенное, но чрезвычайно важное свидетельство сравнительно недавних (главным образом в плиоцене) интенсивных углеводородных разгрузок недр Мексиканского бассейна – широко распространенные месторождения *самородной серы*, в том числе очень крупные, локализованные в кепроках соляных куполов в пределах северных и южных обрамлений бассейна (рис. 2, 3). Их образование обязано масштабным восходящим прорывам-разгрузкам углеводородов из глубин в приповерхностные зоны Земли – в область распространения кислородсодержащих вод. Особенно благоприятны для накопления самородной серы углеводороды, обогащенные соединениями серы. А именно такие характерны для юрско-нижнемеловых карбонатных комплексов, перекрывающих соли Лоанн⁵.

Итак, нет сомнений, что Мексиканский регион, и особенно его дно, являются средоточием вырывающихся из недр напорных восходящих разгрузок – масштабных, разнообразных и повсеместных. А если так, то и разгрузки, в свою очередь, могут служить важными поставщиками информации о состоянии недр.

Нефтяные аварии как геотехногенное явление

Наряду с естественными очагами разгрузки, для характеристики флюидодинамического состояния недр чрезвычайно интересны сведения о напорных скважинах, прежде всего о фонтанирующих, изливающих на

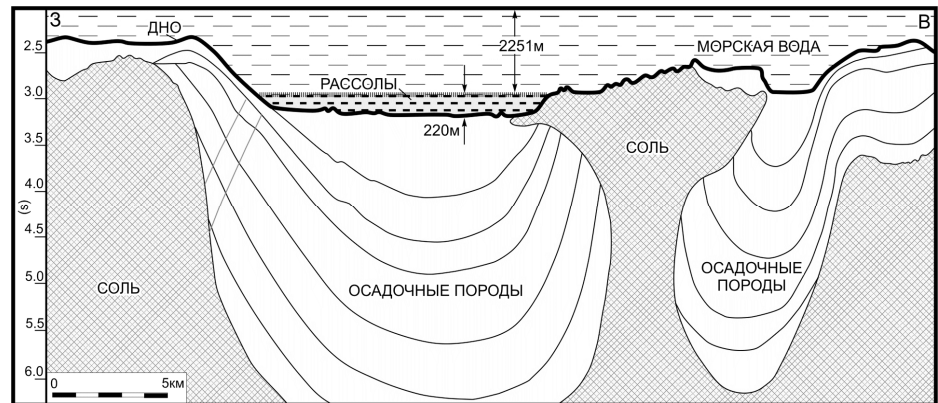


Рис. 6. Глубоководное рассольное «озеро» Орка, сейсмический профиль, Мексиканский залив, континентальный склон, глубины 1650–2470 м. Модифицировано по Pilcher R.S. and Blumstein R.D.². Глубина «озера» 220 м, поверхность рассолов на глубине 2251 м ниже уровня моря.

¹ Pilcher R.S., Blumstein R.D. Brine volume and salt dissolution rates in Orca Basin, nortest Gulf of Mexico. AAPJ Bulletin. 1998. V. 91. N 6. P. 823–833.

² Ibid. P. 827.

³ Асфальтовые вулканы.

⁴ Там же. С. 30.

⁵ Belenitskaya G.A. Op. cit.

поверхность нефть либо ее смесь с газом или с водой (водо-нефтяную эмульсию). Буровые скважины, эти тончайшие «зонды», запущенные в недра Земли, несут информацию не только о нефтегазовом потенциале, но и о состоянии недр. Аварийные же скважины сигнализируют о неблагоприятном состоянии и о возможности высконапорных выбросов и прорывов.

Вообще-то аварийные прорывы из недр происходят не только через скважины, но и через любые зоны возросшей проницаемости, возникающие при активизации сейсмостектонических или иных природных сил. В таких условиях прорывы рвущихся вверх флюидов не только вполне закономерны, но порой и неизбежны, а скважины лишь ускоряют их высвобождение, облегчая выход из недр на поверхность. Показательны случаи, когда после перекрытия фонтанов из аварийных скважин нефтяные струи многократно выбивались и мощно фонтанировали из трещин, образовавшихся вокруг скважин и даже в стороне от них¹.

Всколыхнувшая весь мир недавняя авария на платформе глубоководного бурения Deepwater Horizon, крупнейшая за всю историю нефтедобычи, мгновенно приковала внимание всего мира к Мексиканскому заливу, сделав его на все месяцы отчаянной борьбы с мощно фонтанирующими недрами самым обсуждаемым регионом (рис. 2, 3). Между тем, эта авария имеет множество знаменитых предшественников и в заливе и на его побережьях, самые масштабные из которых как раз и связаны с неконтролируемым фонтанированием скважин. Среди них наиболее известны сверхпродуктивные скважины, представляющие особый интерес именно «с точки зрения изучения тех подземных сил, которые обуславливают эту высокую продуктивность»². В Мексиканском бассейне находятся многие из таких «выдающихся» скважин с максимальными показателями и аварийных дебитов и общих изливов нефти³. Три из них – абсолютные мировые рекордсменки – расположены в «Золотом кольце» Мексики (как раз в районе многочисленных природных асфальтовых озер, нередко очень крупных). Это – Потреро-дель-Льяно-4 (1909 г.), Сан-Диего-39 (1908 г.) и Серро-Асуль-4 (1916 г.). Еще две скважины с крупнейшими аварийными излияниями – Спиндлтон и Хамбл – находятся на северном побережье Галф-Коста (в районе концентрации множества активных диапиров, соляных вулканов и месторождений самородной серы). Символично, что здесь же, в акватории Мексиканского залива, произошли и обе самые масштабные за всю историю нефтедобычи аварии на нефтяных платформах. Сначала в 1979 г. скважина Иксток-1 в заливе Кампече, выбросив 400–460 тыс. т нефти, стала мировой рекордсменкой и 30 лет удерживала свой титул. И вот последний «победитель» – Deepwater Horizon. Эта пожалуй самая знаменитая на сегодня скважина, заложенная на северо-востоке Мексиканского залива в области континентального склона при глубине вод 1524 м, потерпела аварию, достигнув глубины 5596 м с температурами более 200° и давлениями 600 атм. При аварийном дебите нефти около 13–14 тыс. т/сут., величина ее общего излива (600–780 тыс. т, по сути – целое небольшое месторождение) стала новым мировым рекордом.

Локализация столь многих мировых аварийных рекордов в Мексиканском регионе в большой мере определяется высокой активностью этого соляно-нефтяного реактора, подтверждая зависимость аварийности скважин от современной флюидодинамики разбуриваемых недр.

Для человека буровые скважины – всего лишь им же проделанные отверстия, над которыми он – естественный хозяин. Ну а для недр – своего рода микроотдушины, не важно кем и зачем проделанные, за власть над которыми стоит бороться. Поэтому контроль за клапанами осуществляет не только человек, но и сами недра. А задачи у них – полярные. У недр – главная – выбить любые задвижки, превенторы и высвободить, излить все, что «накопилось» и рвется наверх, выплеснув – куда придется. У человека же – удержать контроль и над клапанами и над всем, что изливается. Авария – момент победы недр, озаглавленной «свободно» бьющим нефтяным фонтаном. Так что не стоит забывать, что аварийное фонтанирование – явление, пусть и инициированное человеком, но предопределенное и поддерживаемое силами природы. Иначе говоря – явление смешанное, природно-техногенное или геотехногенное. Именно как геотехногенные образования следует рассматривать и изливающиеся аварийные скважины. Естественно, что явления геотехногенной природы требуют и соответствующих подходов, поскольку они могут быть обязаны не только «человеческому фактору», но и природному, в частности, любым перепадам «настроения» недр, при которых человеку «просто» не удастся сдержать их возросший напор.

С таких позиций можно, даже не сильно фантазируя, увидеть зависимости между разными явлениями, связанными с активностью земных недр – и стимулирующими ее рост, и являющимися ее производными. С одной стороны, такими, как солнечная активность, общая напряженность недр Земли и разные ее региональные проявления. А с другой – геотехногенные аварии. При этом те или иные признаки роста сейсмостектонической активности, флюидодинамической напряженности и неравномерности недр Мексиканского бассейна и прорывы клапанов на скважинах выступают как звенья в череде природных событий. И даже могут быть использованы для взаимного прогноза.

Соляно-нафтидные узлы как глобальные центры перспектив, надежд, угроз

Авария Deepwater Horizon в Мексиканском заливе еще раз чрезвычайно внятно заявила, что недра – это действительно очень и очень серьезно, ярко высветив и нашу склонность превышать пределы безопасности и неготовность к ликвидации последствий. Тем не менее никто по сути не сомневается, что и в будущем ситуация вряд ли принципиально изменится. Вера человека в наличие нефти в глубинах недр и растущее умение достигать этих глубин (пусть с риском!) гарантируют, что добровольно остановиться на этом пути вряд ли возможно. Пока же счет пробуренным скважинам идет уже на сотни тысяч, количество платформ глубоководного бурения измеряется тысячами, а глубины морских скважин достигли неслыханных цифр, превысив 10(!) км. Естественно, не стоит на месте и количество аварий.

¹ Аникиев К.А. Аномально высокие пластовые давления в нефтяных и газовых месторождениях. Л., Недра. 1964. Тр. ВНИГРИ. Вып. 233. 168 с.; Перродон А. Указ. соч.

² Леворсен А. Указ. соч. С. 446.

³ Леворсен А. Указ. соч.; Гаврилов В.П. Указ. соч.; Перродон А. Указ. соч.; Москвин А.Г. Месторождения природного асфальта как резерв мировой энергетики. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2006. № 1. С. 1–11.

Мексиканский бассейн занимает лидирующую позицию и по продвинутой нефтяных платформ в глубоководные области и по достигнутым глубинам. Здесь в глубоководной части залива, на больших (свыше 800–1000 м) глубинах открыты сотни месторождений, а на сверхглубинах (свыше 1600 м и до 3000 м) – десятки. В 2009 г. пробурена самая глубокая морская нефтяная скважина Тибр, глубиной 10685 м при глубине моря 1259 м (рис. 2, 3), и открыто одно из самых крупных современных морских месторождений нефти (около 500 млн. т)¹. Весьма высоко оцениваются и дальнейшие перспективы².

Бассейн Мексиканского залива – бесспорно ярчайший представитель соляно-нафтидных гигантов мира. Однако и большинство других значительных СЧУ сопоставимы с ним по многим показателям. Практически все выделенные СЧУ относятся к числу наиболее высокоперспективных и интенсивно развивающихся нафтидных бассейнов. Это, прежде всего, Прикаспийский, Североморский, Персидского залива, Западно- и Восточно-Средиземноморские, Атласско-Северосахарский, Восточно-Бразильский, Кванза-Камерунский, Амударьинский и др. Часто они локализируются вокруг крупных и активно прогибающихся акваторий. Сближают их между собой и с Мексиканским бассейном упоминавшиеся выше общие особенности. Это и высочайшая нафтидная продуктивность, и масштабная соленость, и частая осложненность солянокупольной тектоникой, и близкая структурно-тектоническая позиция. Особенно значимым представляется сходство флюидодинамических показателей, в целом также подобных Мексиканскому бассейну: высокая и сверхвысокая пластовая энергия, высоконапорная нефтегазоносность, растущие с глубиной температуры, давления и другие показатели, становящиеся при этом все более нестабильными и плохо предсказуемыми, активность и мобильность углеводородных, рассольно-соляных и других подвижных систем. И еще: избирательно связанные именно с соляно-нафтидными системами высочайшие концентрации сероводорода, уникальные по запасам серы, но при этом – лидеры и по агрессивности. Все эти показатели – причем одни и те же – делают эти СЧУ одновременно и максимально перспективными для поисковых работ и добычи нафтидов и максимально опасными.

Очевидно, что в ближайшем будущем объектами внимания останутся нефтегазоносные территории с уже установленными гигантскими скоплениями и ожидаемыми еще более крупными, причем во все более глубоких и в более глубоководных областях, поскольку именно для них наиболее уверенно предполагается грядущая – «самая большая нефть». Особые надежды и экстремальные риски связываются с глубоководными подсолевыми коллекторами. Нет сомнения, что в ближайшие годы главной тенденцией станет смещение в области со все более агрессивными нафтидами. Уже и сегодня все силы нефтяной индустрии нацелены именно на их освоение. И хотя благодаря этому появляются все новые и новые технологии и бурения и предотвращения аварий, система становится все менее устойчивой и предсказуемой, свои неминуемы, как из-за природных факторов, так и из-за человеческих (будь то «маленький краник» или «простая оплошность»). Замкнутый круг: бурим там, где максимум перспектив, а максимум перспектив именно там, где одновременно и максимум угроз. Предсказуем и итог: геотехногенные нефтяные катастрофы, вызванные взрывными разгрузками нефтяных геореакторов в ответ на буровые проколы – неизбежны.

На фоне растущих угроз приходится с сожалением констатировать, что человечество пока не готово адекватно реагировать на устрашающие экологические последствия нефтяных разливов. Во всяком случае судя по только что продемонстрированной достаточной беспомощности и беспорядочности использовавшихся способов борьбы с ними. Непростительно мало внимания уделяется разработке микробиологических методов очистки от последствий нефтяных загрязнений – одного из наиболее перспективных, эффективных и, главное, максимально близких используемым самой природой и в настоящее время и в прошлом³. Но – требующих очень серьезных научных и экспериментальных исследований. Хотя работы этого плана также проводятся, публикации имеются, однако очевидно, что их масштабы совершенно не адекватны масштабу угроз. Так же как они не отвечают размаху тех направлений исследований, которые вызывают и усиливают эти угрозы. Международная научная кооперация и проведение незамедлительных системных исследований – единственный надежный и верный путь. Возможно, необходимо обеспечить принудительное финансирование такого рода исследований нефтяными магнатами – главными поставщиками угроз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аникиев К.А. Аномально высокие пластовые давления в нефтяных и газовых месторождениях // Тр. ВНИГРИ. Вып. 233. Л.: Недра. 1964. 168 с.
Anikiev K.A. (1964). Anomal'no vysokie plastovye davleniya v neftnyakh i gazovykh mestorozhdeniyakh. Tr. VNIGRI. Vyp. 233. Nedra. Leningrad. 168 p.
2. Антуан Д., Мартин мл. Р., Пайл Т., Брайант У. Континентальные окраины Мексиканского залива // Геология континентальных окраин. Под. ред. К. Берка и Ч. Дрейка. М.: Изд-во Мир. 1979. Т. III. С. 28–40.
Antuan D., Martin ml. R., Pail T., Braiant U. (1979). Kontinental'nye okrainy Meksikanskogo zaliva // Geologiya kontinental'nykh okrain. Pod. red. K. Berka i Ch. Dreika. Izd-vo Mir. Moskva. T. III. Pp. 28–40.
3. Асфальтовые вулканы // Знание – сила. 2010. № 7. С. 26–31.
Asfal'tovye vulkany. Znanie – sila. 2010. N 7. Pp. 26–31.
4. Беленицкая Г.А. Осадочные бассейны Земли. Соляная тектоника. Литогенез // Планета Земля. Энциклопедический справочник. Гл. ред. Л.И. Красный. Т. 2: Тектоника и геодинамика. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. 2004. С. 189–222, 354–375, 1211–1220.
Belenitskaya G.A. (2004). Osadochnye basseiny Zemli. Solyanaya tektonika. Litogenez. In Planeta Zemlya. Entsiklopedicheskii spravochnik. Gl. red. L.I. Krasnyi. T. 2: Tektonika i geodinamika. Izd-vo VSEGEI. Sankt-Peterburg. Pp. 189–222, 354–375, 1211–1220.
5. Беленицкая Г.А. Минералогия соленосных бассейнов мира Соленосные осадочные бассейны Северной

¹ Куда доплывет нефть // Огонек. 2010. № 21. С. 18

² Забанбарк А. Указ. соч.; Конохов А.И. Указ. соч.

³ Беленицкая Г.А. Последствия нефтяных катастроф глазами седиментолога // Природа. 2010. № 2. С. 25–34.

- Америки // Планета Земля. Энциклопедический справочник. Гл. ред. Л.И. Красный. Т. «Минералогия». СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. Кн. 1. С. 165–189. Кн. 4. С. 123–214.
- Belenitskaya G.A. (2008). Mineragiya solenosnykh basseinov mira Solenosnye osadochnye basseiny Severnoi Ameriki. In: Planeta Zemlya. Entsiklopedicheskii spravochnik. Gl. red. L.I. Krasnyi. T. «Mineragiya». Izd-vo VSEGEI. Sankt-Peterburg. Kn. 1. Pp. 165–189. Kn. 4. Pp. 123–214
6. Беленицкая Г.А. Типы седиментогенеза: расширенный вариант классификации // Отечественная геология. 2008. №3. С. 29–45.
Belenitskaya G.A. (2008). Tipy sedimentogeneza: rasshirennyi variant klassifikatsii. Otechestvennaya geologiya. N 3. Pp. 29–45.
 7. Беленицкая Г.А. Последствия нефтяных катастроф глазами седиментолога // Природа. 2010. № 2. С. 25–34.
Belenitskaya G.A. (2010). Posledstviya neftnykh katastrof glazami sedimentologa. Priroda. N 2. Pp. 25–34.
 8. Беленицкая Г.А. Мексиканский залив – центр природных и геотехногенных нефтяных катастроф // Рег. геол. и металлогения. 2011. № 45. С. 51–69.
Belenitskaya G.A. (2011). Meksikanskii zaliv – tsentr prirodnykh i geotekhnogennykh neftnykh katastrof. Reg. geol. i metallogeniya. N 45. Pp. 51–69
 9. Гаврилов В.П. Геология и минеральные ресурсы мирового океана. М., Недра. 1990. 323 с.
Gavrilov V.P. (1990). Geologiya i mineral'nye resursy mirovogo okeana. Nedra. Moskva. 323 p.
 10. Жарков М.А. Палеозойские соленосные формации мира. М., Недра, 1974. 391 с.
Zharkov M.A. (1974). Paleozoiskie solenosnye formatsii mira. Nedra, Moskva. 391 s.
 11. Забанбарк А. Структурные черты и перспективы нефтегазоносности континентальных склонов бассейна Мексиканского залива (акватория США). Океанология. 2006. Т. 46. № 4. С. 596–602.
Zabanbark A. (2006). Strukturnye cherty i perspektivy neftegazonosnosti kontinental'nykh sklonov basseina Meksikanskogo zaliva (akvatoriya SShA). Okeanologiya. T. 46. N 4. Pp. 596–602.
 12. Иванов А. Асфальтовые вулканы прошлого и современная катастрофа в Мексиканском заливе // ТрВ. Новости. 25 мая 2010 г. № 54. С. 15.
Ivanov A. (2010). Asfal'tovye vulkany proshlogo i sovremennaya katastrofa v Meksikanskom zalive. TrV. Novosti. 25 maya 2010 g. N 54. Pp. 15.
 13. Иванов С. Вулкан заасфальтировал океан. 2009. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.oceanology.ru/goto/http://www.gazeta.ru>.
Ivanov S. (2009). Vulkan zaasfal'tiroval okean. URL: <http://www.oceanology.ru/goto/http://www.gazeta.ru>.
 14. Калинин М.К. Соленакпление, образование соляных структур и их влияние на нефтегазоносность. М., 1973. 132 с.
Kalinko M.K. (1973). Solenakoplenie, obrazovanie solyanykh struktur i ikh vliyanie na neftegazonosnost'. Moskva. 132 s.
 15. Карта нефтегазоносности мира. Масштаб 1:15000000. Объяснительная записка. Координаторы В.И. Высоцкий, Ю.Г. Наместников и др. Науч. ред. В.И. Высоцкий, Е.Н. Исаев, К.А. Клещев и др. М., ВНИИзарубежгеология. 1994. 196 с.
Karta neftegazonosnosti mira. Masshtab 1:15000000. Ob'yasnitel'naya zapiska. Koordinatory V.I. Vysotskii, Yu.G. Namestnikov i dr. Nauch. red. V.I. Vysotskii, E.N. Isaev, K.A. Kleshchev i dr. VNIIZarubezhgeologiya. Moskva. 1994. 196 p.
 16. Конюхов А.И. Геологическое строение, этапы развития и нефтегазоносные комплексы бассейна Мексиканского залива. Литология и пол. ископ. 2008. №4. С. 425–440.
Konyukhov A.I. (2008). Geologicheskoe stroenie, etapy razvitiya i neftegazonosnye komplekсы basseina Meksikanskogo zaliva. Litologiya i pol. iskop. N 4. Pp. 425–440.
 17. Кравченко К.Н. Бассейновая основа общей теории нафтидогенеза. М.: НИИ-Природа. 2004. 66 с.
Kravchenko K.N. (2004). Basseinovaya osnova obshchei teorii naftidogeneza. NIA-Priroda. Moskva. 66 p.
 18. Куда доплывет нефть. Огонек. 2010. №21. С. 18
Kuda doplyvet neft'. Ogonek. 2010. N 21. Pp. 18
 19. Леворсен А. Геология нефти и газа. М., Мир. 1970. 640 с.
Levorsen A. (1970). Geologiya nefti i gaza. Mir. Moskva. 640 p.
 20. Москвин А.Г. Месторождения природного асфальта как резерв мировой энергетики // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2006. № 1. С. 1–11.
Moskvin A.G. (2006). Mestorozhdeniya prirodnogo asfal'ta kak rezerv mirovoi energetiki. Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie. N 1. Pp. 1–11.
 21. Перродон А. История крупных открытий нефти и газа. Пер. с англ. М., Мир. 1994. 255 с.
Perrodon A. (1994). Istoriya krupnykh otkrytii nefti i gaza. Per. s angl. Mir. Moskva. 255 p.
 22. Belenitskaya G.A. Distribution pattern of hydrogen sulphide-bearing gas. Petroleum Geoscience. London. 1998. N 4. P. 49–66.
 23. McBride B.C. The evolution of allochthonous salt along a megaregional profile across the Northern Gulf of Mexico Basin. AAPJ Bulletin. 1998. V. 82. N 5B. P. 1037–1054.
 24. Pilcher R.S., Blumstein R.D. Brine volume and salt dissolution rates in Orca Basin, nortest Gulf of Mexico. AAPJ Bulletin. 1998. V. 91. N 6. P. 823–833.
 25. Rowan M., Ratiff R., Trudjill B., Duart J. Emplacement and evolution of the Mahogeny salt body, central Louisiana outer shelf, Northern Gulf of Mexico. AAPJ Bulletin. 2001. V. 85. N 6. P. 947–969.
 26. Sassen R., Sweet S.T., Milkov A.V. et al. Thermogenic vent and gas hydrat in the Gulf of Mexico slope: Is gas hydrat decomposition significant? Geology. 2001. V. 29. N 2. P. 107–110.
 27. Trusheim F. Zur Bildung der Sal lager im Rotliegenden und Mezozoikum Mitteleuropas. Beihefte zum Geologischen Tahrbuch. Hannover, 1971. Helt 112. S. 1–51.
 28. Valentine D.L. et al. Asphalt volcanoes as potential source of methane to late Pleistocene coastal waters. Nature Geoscience. 2010. V. 3. P. 345–348.

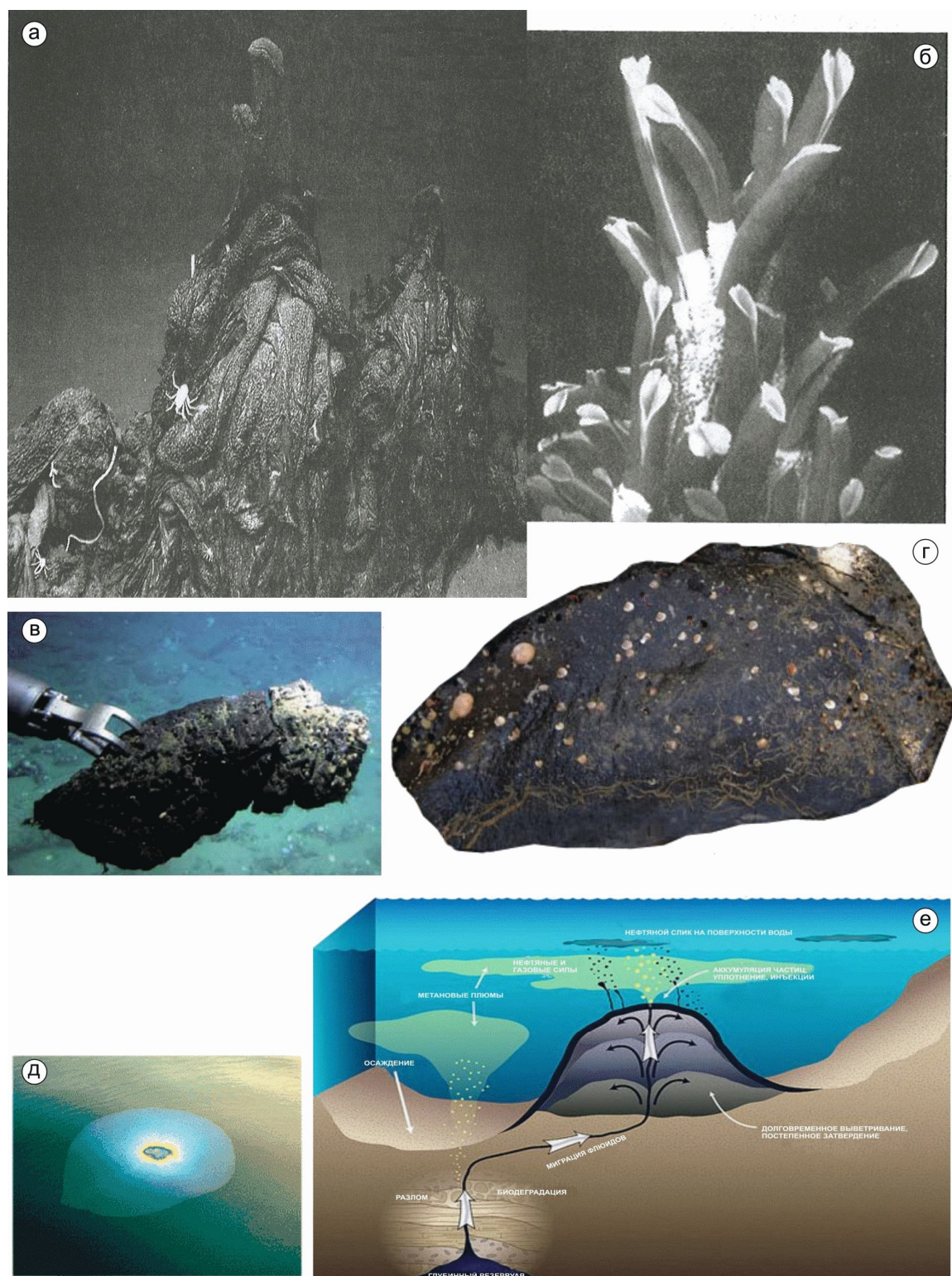


Рис. 7. Глубоководные асфальтовые вулканы: а, б – асфальтовый вулкан Чапопоте (а) и фрагмент привулканического нефтогенного оазиса (б), из работы McBride¹; в, г – большие образцы асфальтовой лавы с асфальтовых вулканов во впадине Санта-Барбара (в – образец отбирается манипулятором с аппарата Alvin, г – поднятый пятном всплывшей нефти на поверхности Мексиканского залива, фото Jonathan Blair); е – схема формирования асфальтового вулкана и сопутствующих выбросов нефти и метана (модифицировано); в-е – по источникам².

¹ McBride B.C. Op. cit.

² Иванов А. Асфальтовые вулканы прошлого и современная катастрофа в Мексиканском заливе // ТрВ. Новости. 25 мая 2010 г. № 54. С. 15.; Иванов С. Вулкан заасфальтировал океан. 2009. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.oceanology.ru/goto/http://www.gazeta.ru>; Valentine D.L. et al. Asphalt volcanoes as potential source of methane to late Pleistocene coastal waters. Nature Geoscience. 2010. V. 3. P. 345–348.