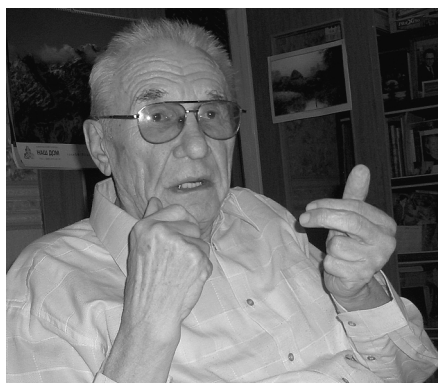


«Соляной глетчер» в загросском (Zagros Mountains) диопириновом куполе.
Фото NASA с сайта http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img_id=16435

УДК 550.41:553.21:576.8:577.37



А.А. Маракушев



С.А. Маракушев

Маракушев А.А.*,
Маракушев С.А.**

Природа ассоциации соляных и нефтяных залежей¹

*Маракушев Алексей Александрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института экспериментальной минералогии РАН, академик РАН, почётный профессор МГУ имени М.В. Ломоносова

E-mail: belova@iem.ac.ru

**Маракушев Сергей Алексеевич, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем химической физики РАН

E-mail: marak@cat.icp.ac.ru

Залежи солей и нефти в осадочных депрессиях пассивных континентальных окраин порождаются глубинными магматическими очагами на щелочной стадии их развития. С этими же очагами на более ранней стадии нормального магматизма генетически связано и образование самих депрессий в результате выщелачивания гранитного слоя трансмагматическими флюидами, сопровождаемое воздыманием мантийного субстрата.

Ключевые слова: соляные залежи, нефть, углеводороды, магматические очаги, щелочной магматизм, осадочные депрессии, алюмосиликатные компоненты.

Соляными залежами, нередко образующими пласты линзы и грандиозные купола, заканчивается развитие платформенных депрессий, в том числе нефтеносных. Их обнажения могут распространяться на громадные территории, фиксирующиеся даже на космических снимках Земли со спутников, например, Zagros Mountains в Иране².

Общая распространенность соленосных депрессий на Земле показана на рис. 1, на котором в пределах окон-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НШ-3634.2010.5 и программы Президиума РАН (фундаментальных исследований № 28, подпрограмма 1).

² Astronaut photo of the southwestern edge of the Zagros Mountains featuring salt domes. 28 February 2006. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/File:ZagrosMtns_SaltDome_ISS012-E-18774.jpg

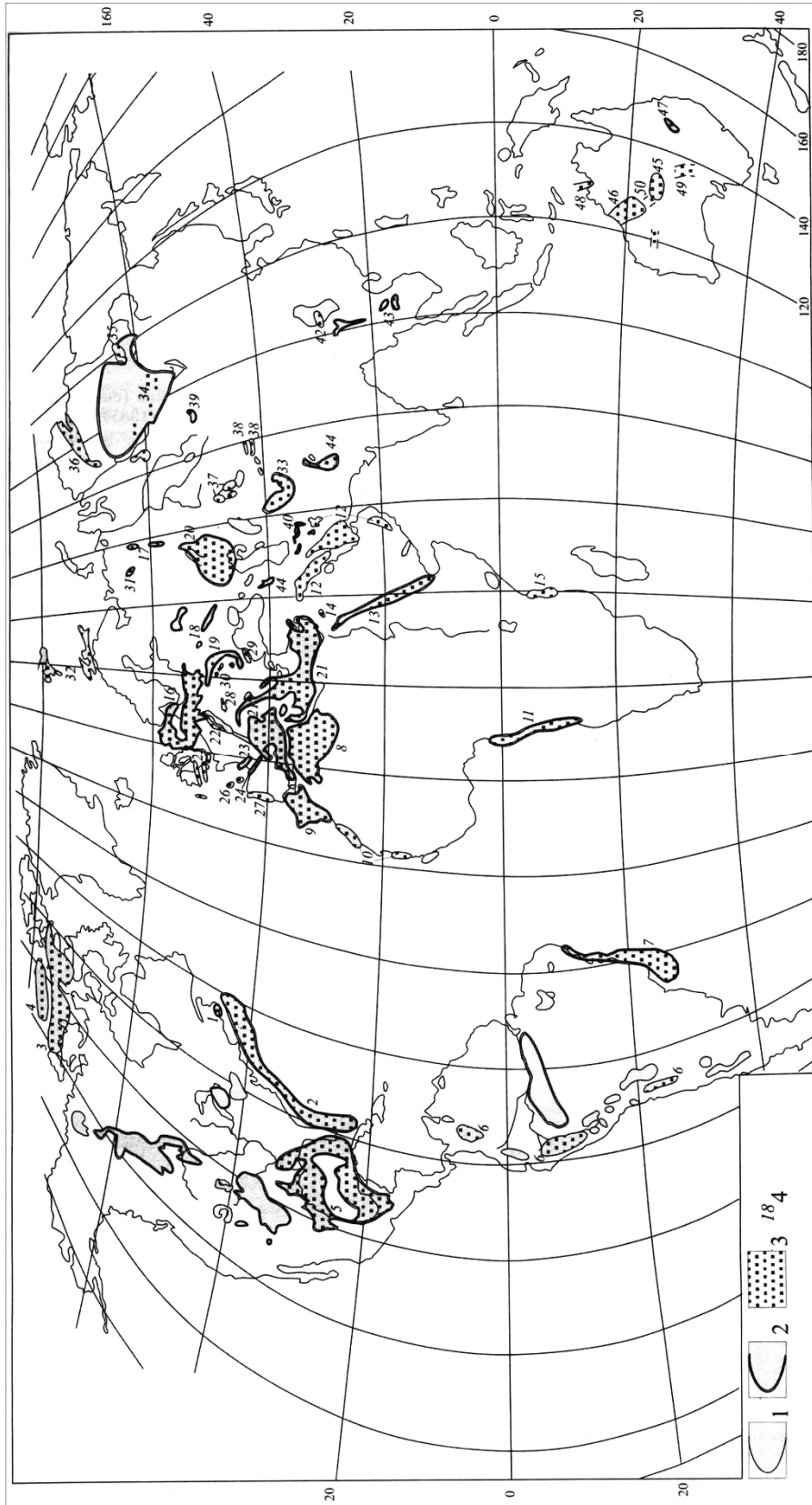


Рис. 1. Солянокупольные бассейны мира. 1 – граница солоненого осадочного бассейна. 2 – то же с установленной калиенностью; 3 – площадь проявления солянокупольной тектоники; 4 – номера солянокупольных бассейнов. Бассейны с проявлением солянокупольной тектоники (в скобках возраст соляной тектоники): 1 – Маргитайм (С₁), 2 – Приатлантические (Североамериканские, Т₃₋₁), 3 – Канадского арктического архипелага (О₂), 4 – Свердруп (С), 5 – Мексиканского залива (Р-К₂), 7 – Восточно-Бразильские (К_{1a}), 8 – Атласко-Североахарские (Т-N₁), 9 – Западно-Марокканский (Т₃₋₁), 10 – Мавритано-Сенегальские (Т-N₁), 11 – Кванза-Камерунский (К_{1a}), 12 – Северо-Аравийские (V-E, N₁), 13 – Данакильско-Красноморский (N₁), 14 – Мертвого моря (N), 15 – Занзибарский (Т-N₁), 16 – Центрально-Европейский (Р, Т), 17 – Солликамский и Верхнепечерский (Р, К), 18 – Припятско-Днепровский (D₃, P₁), 19 – Предкарпатские (N₁), 20 – Прикаспийский (P₁), 21 – Средиземноморские (N₁), 22 – Верхнерейнский (P₂-N₁), 23 – Аквитанско-Бискайский (Т₂₋₁), 24 – Эбро (Т₃, P₂₋₃), 25 – Западно-Европейские (Т₂₋₃), 26 – Западно-Британские (Т₂₋₃), 27 – Лузитанский (Т), 28 – Альпийский (P₂), 29 – Мизийский (P₂), 30 – Закарпатские и Трансильванский (N₁), 31 – Претиманский (V-E₁), 32 – Западно-Баренцевоморские (D₂₋₃), 33 – Амударьинский (I₃), 34 – Восточно-Сибирский (V₂-C₂), 35 – Виллойдский (D₂), 36 – Тунгусско-Хаганский (D₂₋₃), 37 – Чу-Сарьейские (D₂₋₃), 38 – межгорных впадин Тянь-Шаня (N₁), 39 – Тувинский (D2), 40 – межгорных впадин Ирана (P₂-N₁), 41 – Среднеараксинский (N₁), 42 – Верхне-Янцзыйский (R₃-V), 43 – Корат и Сакон-Нахкон (K₂), 44 – Индо-Пакистанский (V-E), 45 – Амадиес (R₃, C), 46 – Кэннинг (O₃-D), 47 – Эдавейл (D₂), 48 – залив Бонопарт-Г алф (Петрел) (O-D), 49 – Аделаида-Горренс (R₂), 5 – Гибсон (R₃).

¹Беленицкая Г. А. Осадочные бассейны Земли. Соляная тектоника. Литогенез // Планета Земля. Энциклопедический справочник / Гл. ред. Л.И. Красный. Т. 2. Тектоника и геодинамика. СПб., 2004. 651 с. 173–182.

туренных соленосных территорий точечным знаком обозначены распространения солянокупольных бассейнов. Соляные купола представлены в основном залежами солей хлоридного и/или сульфатного натрий-магни-калиевого состава. На схеме видно, что соляные бассейны доминируют на северном полушарии вдоль субширотной полосы, к которой приурочены и самые громадные их совмещающиеся в той или иной мере распространенностью нефтяные залежи: Прикаспийская (20), Центрально-Европейская (16), Средиземноморская (21) и Мексиканского залива (5). Они приурочены к самым глубоким депрессиям континентальной земной коры. Наиболее глубокой в их ряду является Прикаспийская депрессия, глубина которой превышает 20 км. На схеме строения этой депрессии (рис. 2) наглядно выражена главная особенность платформенных депрессий, получившая название обращенности рельефа земной коры и мантии. Она выражается в том, что опускание земной поверхности (формирование депрессии, выполняемой осадочными породами) сопровождается встречным воздыманием поверхности мантии.

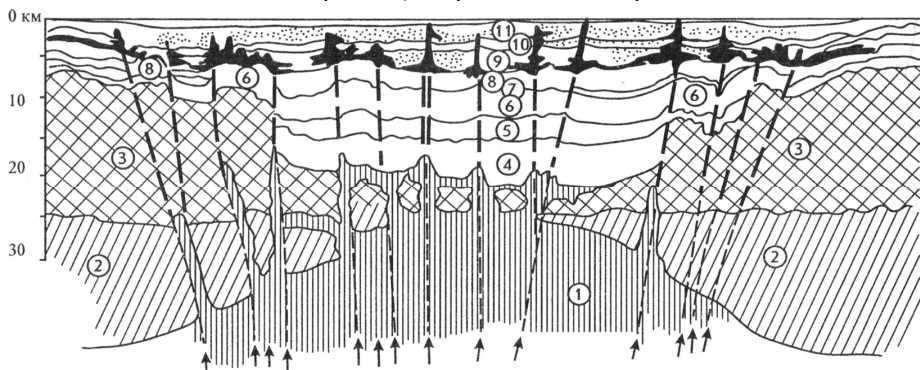


Рис. 2. Схема строения Прикаспийской соляной депрессии¹. Цифры в кружках: 1 – гипербазиты (воздымания мантии); 2 – основные породы (базальтовый слой); 3 – граниты и гнейсы (гранитный слой); 4, 5 – осадочные породы рифея (4) и девона (5); 6 – карбонатные отложения девона; 7 – терригенные отложения перми; 8 – карбонатные и песчано-глинистые отложения (карбон – пермь); 9 – карбонатно-сульфатно-галитовые и терригенные породы карбона, перми и триаса (черное – соляные залежи); 10 – глинисто-карбонатные и карбонатные отложения (верхняя пермь); 11 – терригенные отложения (триас). Точками обозначено красноватое изменение пород.

относящимися к рифею, фиксируется начало развития депрессии, которое, начиная с карбона (9 на рис. 2) радикально усложняется в результате сочетания его с формированием соляных залежей, образующих согласные пласты большей частью в сочетании с грандиозными куполами, имеющими в разрезе явно секущее положение. Согласно цитируемым авторам³ куполами фиксируется внедрение флюидных соляных расплавов из глубины по направлениям, показанным на схеме штриховыми линиями и стрелками. По нашим представлениям это разделение стратиграфического разреза Прикаспийской депрессии на верхнюю (соленосную) и нижнюю части отражает эволюцию глубинного магматического очага, который на ранней стадии развития (рифей – карбон) характеризовался магматизмом нормальной щелочности, а на поздней стадии (карбон – триас) приобрел щелочной уклон и генерировал солевые флюидные расплавы, мигрировавшие в депрессию и формировавшие в ней залежи, генетически связывающиеся с щелочным магматизмом⁴. На это указывает нередко наблюдаемая ассоциация соляных куполов с нефтяными залежами, как например в Кванза-Камерунском нефтяном солянокупольном бассейне (рис. 3).

Секущие соляные купола увенчаны нефтяными залежами, которые залегают также в осадочных толщах на непосредственном продолжении вверх соляных куполов. Такие соотношения определенно указывают на совместную генерацию галогенов и углеводородов в глубинных очагах. Эти первичные расплавы были флюидными, разделяющимися в динамике их восходящей миграции на флюидные, нефтяные и солевые фазы, перечисленные в последовательности понижения их подвижности.

Трансмагматические флюиды в очагах на стадии генерации солевых компонентов, связывающих щелочные металлы, приобретали агрессивность, обусловленную их кислотным характером, по отношению к осадочным породам. Они их интенсивно выщелачивали, создавая протяженные каналы и другие разнообразные пустоты, заполняемые затем углеводородами и соевыми расплавами. Воздействие флюидов на осадочные породы проявляется также в образовании грязевых вулканов, представленных флюидными выбросами на земную поверхность из глубины огромной массы недорастворенного материала осадочных пород.

В подьеме к поверхности нефть опережает солевые расплавы, так что нефтяные залежи образуются и сохраняются только в прогибах осадочного выполнения депрессий (см. рис. 3). В структурах воздымания соляные купола могут достигать поверхности, а сопряженная с ними нефть рассеиваться или вовлекаться в осадочный процесс с образованием углеродных отложений (черных сланцев и др.). В приповерхностной обстановке

Ранее была показано², что это строение платформенных депрессий обусловлено их генетической связью с очагами глубинного магматизма. Они обеспечивали внедрение ультраосновных расплавов (1 на рис. 2) в базальтовый (габбро-гранулитовый) слой земной коры (2 на рис. 2), обеспечивая воздымание мантийного субстрата. Одновременно с этим внедрением восходящие потоки трансмагматических флюидов выщелачивали гранитный (гранито-гнейсовый) слой (3 на рис. 2), создавая тем самым грандиозную депрессию земной коры, заполняемую осадочными породами (4–11 на рис. 2). Древнейшими породами,

¹ Иванкин П.Ф., Назарова Н.И. Флюидно-метасоматические преобразования и рудоносность осадочных толщ Прикаспийского бассейна М., 2005. 104 с.

² Маракушев А.А. Новая модель формирования платформенных депрессий и приуроченных к ним стратиформенных рудных месторождений // Проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. Сборник. М.: ИГЕМ РАН. 2004. С. 11–25.

³ Иванкин П.Ф., Назарова Н.И. Указ. соч.

⁴ Маракушев А.А., Маракушев С.А. Образование нефтяных и газовых месторождений // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 5. С. 505–521.

нефтяные перекрытия соляных куполов подвергаются окислению и превращаются в так называемые кепроки (от английского Cap и Rock), состоящие из ангидрита, карбонатов, содержащие самородную серу и реликтовые тела высокосернистой нефти (рис. 4).

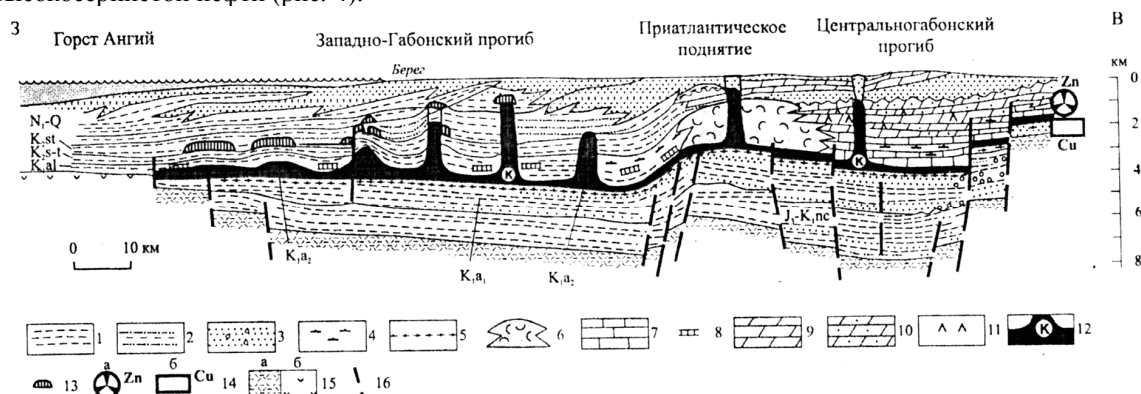


Рис. 3. Субширотный профиль через северную часть Кванза-Камерунского солянокупольного бассейна (современная пассивная окраина Западной Африки)¹: 1 – аргиллиты, 2 – чередование аргиллитов, алевролитов и песчаников, 3 – песчаники и конгломераты, 4 – мергели, 5 – углеродистые отложения, 6 – карбонатные отложения, 7 – известняки, 8 – известковые слои, 9 – доломиты, 10 – песчанистые доломиты, 11 – ангидриты, 12 – галиты с горизонтами калийных солей, 13 – залежи нефти, 14 – цинковое (а) и медное (б) оруденения, 15 – фундамент: а – континентальный, б – океанический, 16 – тектонические нарушения.

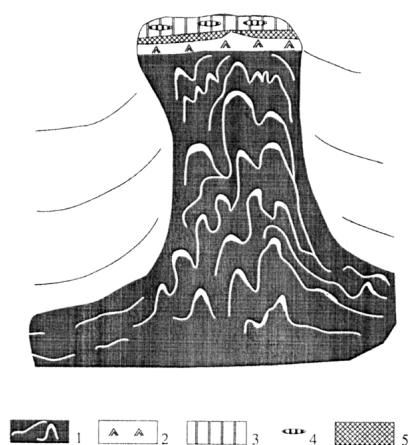


Рис. 4. Соляной купол с кепроком²: 1 – каменная соль; 2, 3 – кепрок (2 – ангидритовый, 3 – карбонатный); 4 – залежи высокосернистых нефтей; 5 – залежи самородной серы.

Сложные взаимоотношения соляных и нефтяных залежей возникают в результате многофазного развития нефте-соляных месторождений, пример которых представлен на Осташковичском месторождении (рис. 5). Нефтяные и солевые залежи на нем образуют пачку взаимного переслаивания, которая рассекается более поздним внедрением соли, образующей громадный купол высотой более 2 км, выходящий на поверхность. Он заместил при своем образовании огромный объем вмещающих пород, что

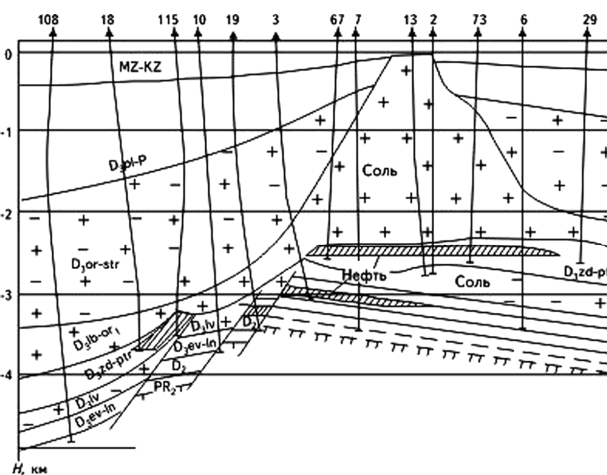


Рис. 5. Геологический профиль через Осташевичское и Южно-осташевичское нефтяные месторождения (Припятский прогиб)³.

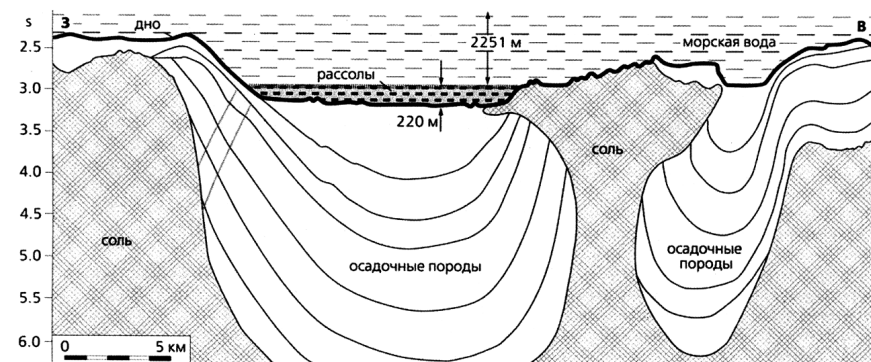


Рис. 6. Глубоководное рассольное озеро Орка, сейсмический профиль, Мексиканский залив, континентальный склон⁴.

¹ Беленицкая Г.А. Указ. соч.

² Там же.

³ Грибик Я.Г., Микуцкий С.П., Сви́дский Э.И. Геология нефтеносности запада Восточно-Европейской платформы. Мн., 1997.

⁴ Pilcher R.S., Blumstein R. D. Brine volume and salt dissolution rates in Orca Basin, nortest Gulf of Mexico // AAPJ Bulletin. 1998. V. 91. № 6. P. 823–833.

возможно лишь при сопровождении его флюидов, агрессивных по отношению к силикатным породам, способных осуществлять массовый вынос их вещества. Еще более наглядно это выражено на рис. 6 (Мексиканский залив), отражающем типичные соотношения, которые возникают при внедрении огромных масс соли в складчатые комплексы осадочных пород. Соляные купола, представленные на этом профиле, прослежены на глубину по сейсмическим данным. Их обнажения на морском дне размываются с образованием придонных глубоководных рассолов.

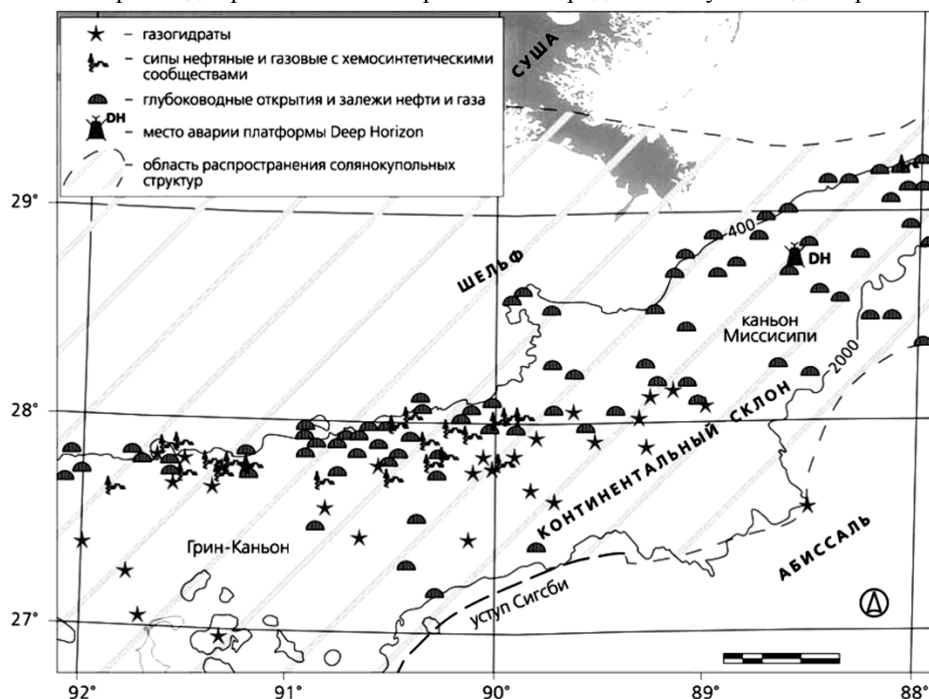


Рис. 7. Схема распространения сипов, хемосинтетических сообществ, газогидратов, грязевых вулканов и залежей углеводородов в центральной части континентального склона Мексиканского залива¹.

Грандиозная нефте-солевая депрессия Мексиканского залива глубиной до 15 км характеризуется по обзорной публикации Г.А. Беленицкой². Парагенезис соли и нефти наиболее наглядно выражен проявлениями современного углеводородно-солевого вулканизма. Депрессии охватывают не только площадь залива, но и обрамляющую сушу (рис. 7). Все осадочное залегание депрессии Мексиканского залива от самых древних триасовых и юрских до молодых плейстоценовых отложений пронизано и расчленено взаимосвязанными согласными и секущими солевыми телами (пластовыми, линзовидными, жильными и столбообразными купольными), увенчанными нефтяными залежами и кепроками (см. рис. 4). Вертикальные купольные залежи, внедренные в разновозрастные осадочные толщи на огромном протяжении, могут иметь громадные поперечные размеры: 29x14 км (штук Мохогени). Их вертикальные внедрения в горизонтально залегающие слоистые толщи происходило по механизму расплавленного замещения под действием фильтрующихся через солевые расплавы флюидов, выносящих вещество осадочных пород подобно тому, как это происходит в развитии грязевых вулканов.

При внедрении соли отставали от углеводородов, что определило в основном надсолевое положение нефтяных залежей. Для концентрации углеводородов наиболее благоприятна была верхняя часть осадочного разреза, представленная терригенными песчано-глинистыми отложениями, благоприятными для развития грязевых вулканов. К верхней части приурочены и горизонты черных сланцев. Высокая нефтегазовая продуктивность, представленная тысячами нефтегазоносных месторождений и проявлений, характерна для всего надсолевого разреза депрессии Мексиканского залива. Широкая полоса их распространения приурочена в основном к границе между шельфом и континентальным склоном, как показано на рис. 8.

«Особенно интересны нефтяные и асфальтовые озера, буквально вытекающие из недр»³. Еще более экзотично широкое распространение асфальтовых вулканов, извергающих нефть и асфальт. В генетическом плане важно обнаружение широкого распространения нефте-асфальтовых вулканов в центральных частях обширных соляных диапиров, обнажающихся на морском дне. Они определенно свидетельствуют о многофазности нефтесолевого развития депрессии Мексиканского залива. Это развитие характеризовалось флюидным характером на всех его стадиях. Источником флюидов был глубинный очаг щелочного магматизма, генерировавший щелочные хлориды и углеводороды. Связь осуществлялась по подводящим каналам, определяемым экстраполяцией на глубину многочисленных субвертикальных структур депрессии Мексиканского залива. На меридиональном разрезе этой депрессии показано, что ее субвертикальные разломные структуры в северной части падают на юг, а в южной части – на север. Экстраполяция их на глубину определяет положение магматического очага под депрессией (рис. 8). С ним было

¹ 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. № 2. P. 107–110.

² Беленицкая Г.А. Мексиканский соляно-нефтяной реактор // *Природа*. 2011. № 3. С. 18–31.

³ Там же. С. 25.

связано и само развитие депрессии, обусловленное потоками порождаемых очагом трансмагматических флюидов, выщелачивающих гранито-гнейсовый слой континентальной окраины в триасово-юрское время. Происходило это в режиме рифтогенного растяжения земной коры, благодаря чему первично водородные флюиды, исходящие из земного ядра селективно теряли водород и приобретали кислотный характер благодаря относительной концентрации в них кислородных компонентов (CO, NO, SO и др.).

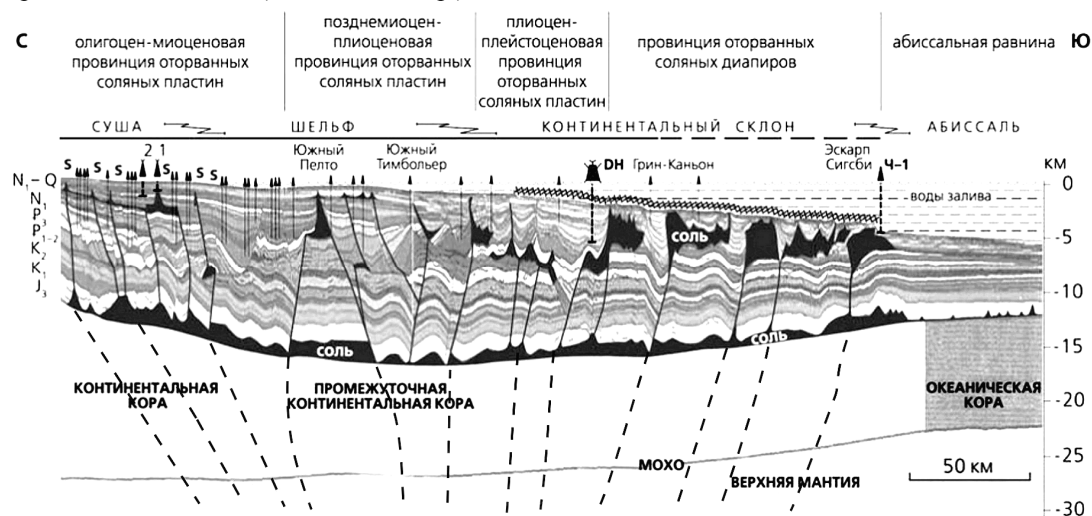
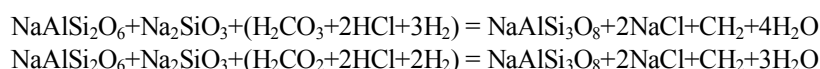


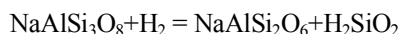
Рис. 8. Субмеридиональный профиль через северную часть акватории Мексиканского залива (от Луизианы до впадины Сигсби). Черное – соли: в основании осадочного разреза – юрские Лоанн, в верхней части в составе неоген – четвертичных отложений – аллохтонные соляные покровы. Утолщенная линия над профилем – область установленной нефтегазоносности (сплошная линия – подтвержденной бурением). Штриховка над дном Мексиканского залива – область современного развития восходящих разрузок нефти, газов, рассолов и др. Вертикальные тонкие линии – скважины; пунктирные утолщенные линии – ориентировочные проекции на профиль скважин: ДН – аварийный Deerwater Horizon (2010), Ч-1 – Челленджер-1 (1968). Возрастные индексы указаны слева, стратиграфическая закрапка отвечает оригиналу (отличается от общепринятой). Модифицировано по С. McBride¹, с небольшими дополнениями. Добавлены штриховые линии в качестве предполагаемых подводящих каналов.

С переходом к режиму сжатия земной коры, которое фиксируется дислокациями осадочного заполнения депрессии, миграция водорода из флюидов прекращалась и флюиды приобретали первичный водородный состав. Под давлением водорода кислотные компоненты флюидов разлагались с приобретением ими углеводородной специализации ($H_2CO_3 + 3H_2 = 3H_2O + CH_4$ и др.) и магматизм в глубинном очаге приобретал щелочной уклон. Главное в этом развитии была потеря магмами кремнезема с переходом полевых шпатов в фельдшпатоиды² и образование щелочных силикатов (без алюминия). Они реагировали с фельдшпатоидами (нефелины и др.), что приводило к освобождению щелочных металлов, что и составило основу формирования солевых компонентов, $NaAlSi_2O_6 + Na_2SiO_3 + 2HCl = NaAlSi_3O_8 + 2NaCl$. Суммарно рассмотренные процессы можно выразить следующими реакциями:



С вариациями содержания свободного водорода (H_2) связывается образование всего разнообразия углеводородов, входящих в состав нефти. Участвующий в реакциях щелочной полевошпатовый компонент реально представлен натриевой и калиевой разновидностями $(Na,K)AlSi_3O_8$, что определяет вариации этих компонентов, наблюдаемые в солях.

Повышения давления водорода приводит к частичному восстановлению кремнезема до двухвалентного состояния, что определяет его способность к вхождению в алюмосиликатные структуры и приводит к выносу из магм, создавая их выщелачивание:



При наличии углерода процесс может сопровождаться образованием углеводородов:



Схематически рассмотренные процессы представлены на петрохимической диаграмме, рис. 9. На ней четко различаются щелочные магматические породы (бедные кремнеземом) и породы нормальной щелочности, с трансмагматическими флюидами которых связывается раннее (досолевое) развитие депрессии, а расходящиеся стрелками обозначены рассмотренные выше реакции генерации парагенезиса углеводородов и солей.

¹ McBride С. The evolution of allochthonous salts along a megaregional profile across the Northern Gulf of Mexico // AAPJ Bulletin. 1998. V. 82. № 5B. P. 1037–1054.

² Фельдшпатоиды (от нем. Feldspat – полевой шпат) – породообразующие минералы, каркасные алюмосиликаты натрия, калия, отчасти кальция. По химическому составу они близки к полевым шпатам, но содержат меньше кремния.

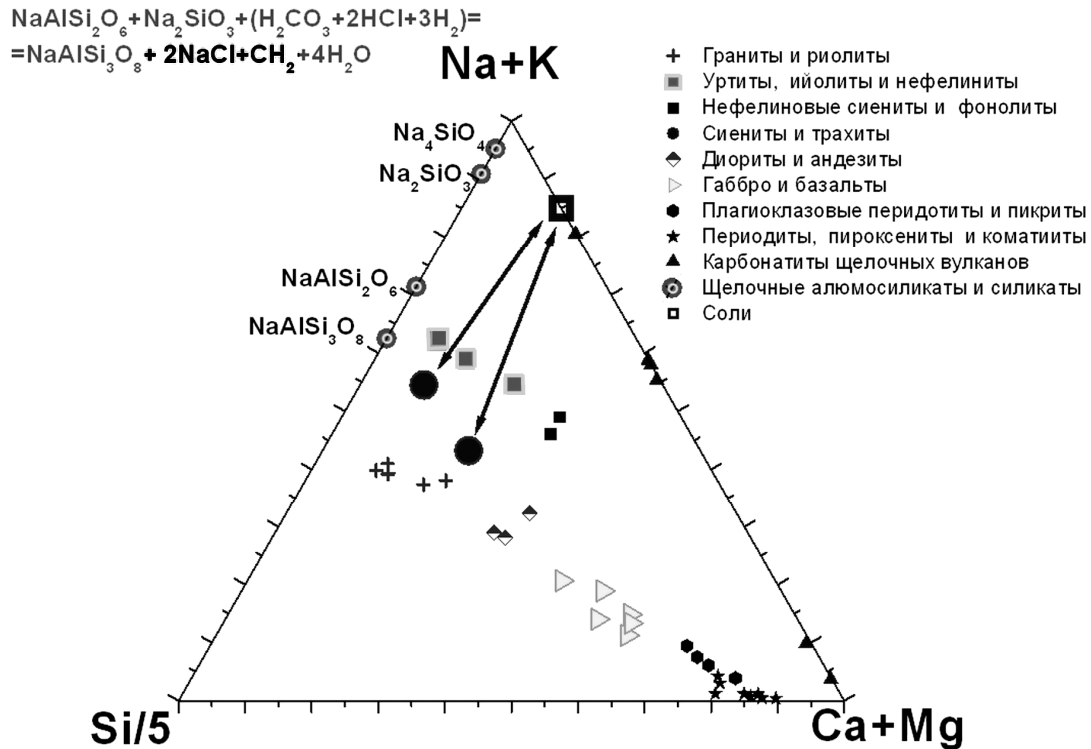


Рис. 9. Петрохимическая диаграмма магматических пород, щелочных алюмосиликатных и силикатных компонентов. Расходящиеся стрелки отражают процессы образования ассоциации углеводородов и щелочных хлоридов. Их упрощенный вариант (без участия Ca+Mg компонентов) представлен в виде реакции. Диаграмма насчитана по данным А.А. Маракушева¹.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беленицкая Г.А. Мексиканский соляно-нефтяной реактор // Природа. 2011. № 3. С. 18–31.
Belenitskaya G.A. (2011). Meksikanskii solyano-neftyanoi reaktor. Priroda. N 3. Pp. 18–31.
2. Беленицкая Г.А. Осадочные бассейны Земли. Соляная тектоника. Литогенез // Планета Земля: Энциклопедический справочник / Гл. ред. Л.И. Красный. Т. 2: Тектоника и геодинамика. СПб., 2004. С. 173–182.
Belenitskaya G.A. (2004). Osadochnye basseiny Zemli. Solyanaya tektonika. Litogenez. Planeta Zemlya: Entsiklopedicheskii spravochnik. Gl. red. L.I. Krasnyi. T. 2: Tektonika i geodinamika. Sankt-Peterburg. Pp. 173–182.
3. Грибик Я.Г., Микуцкий С.П., Сви́дерский Э.И. Геология нефтеносности запада Восточно-Европейской платформы. Мн., 1997.
Gribik Ya.G., Mikutskii S.P., Sviderskii E.I. (1997). Geologiya neftenosnosti zapada Vostochno-Evropeiskoi platformy. Minsk.
4. Иванкин П.Ф., Назарова Н.И. Флюидно-метасоматические преобразования и рудоносность осадочных толщ Прикаспийского бассейна, 2005. М., 104 с.
Ivankin P.F., Nazarova N.I. (2005). Flyuidno-metosomaticheskie preobrazovaniya i rudonosnost' osadochnykh tolshch Prikaspiiskogo basseina. Moskva. 104 p.
5. Маракушев А.А. Петрография. М.: Изд-во Московского Университета, 1993. 320 с.
Marakushev A.A. (1993). Petrografiya. Izd-vo Moskovskogo Universiteta. Moskva. 320 p.
6. Маракушев А.А. Новая модель формирования платформенных депрессий и приуроченных к ним стратиформенных рудных месторождений // Проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. Сборник. М.: ИГЕМ РАН. 2004. С. 11–25.
Marakushev A.A. Novaya model' formirovaniya platformennykh depressii i priurochennykh k nim stratiformennykh rudnykh mestorozhdenii // Problemy rudnoi geologii, petrologii, mineralogii i geokhimii. Sbornik. M.: IGEM RAN. 2004. S. 11–25.
7. Маракушев А.А., Маракушев С.А. Образование нефтяных и газовых месторождений // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 5. С. 505–521.
Marakushev A.A., Marakushev S.A. (2008). Obrazovanie neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii. Litologiya i poleznye iskopaemye. N 5. Pp. 505–521.
8. McBride C. The evolution of allochthonous salts along a megaregional profile across the Northern Gulf of Mexico // AAPJ Bulletin. 1998. V. 82. № 5B. P. 1037–1054.
9. Pilcher R.S., Blumstein R. D. Brine volume and salt dissolution rates in Orca Basin, northeast Gulf of Mexico. AAPJ Bulletin. 1998. V. 91. № 6. P. 823–833.
10. Sassen R., Sweet S.T., Milkov A.V. et al. Thermogenic vent and gas hydrate in the Gulf of Mexico slope: Is gas hydrate decomposition significant? Geology. 2001. V. 29. № 2. P. 107–110.

¹ Маракушев А.А. Петрография. М.: Изд-во Московского Университета, 1993. 320 с.