

ЭНЕРГЕТИКА, ДИНАМИКА И ДЕГАЗАЦИЯ ЗЕМЛИ

А.Н. Дмитриевский

Институт проблем нефти и газа РАН, e-mail: a.dmitrievsky@ipng.ru

ВВЕДЕНИЕ

Хаотические процессы захвата пылевых и газообразных компонентов при аккреции Земли сменились направленными процессами формирования сферических оболочек.

Формирование сферических оболочек способствовало дифференциации энергетических процессов. Геосферные оболочки имеют индивидуальную энергетическую характеристику, а взаимодействие энергетических полей определяет особенности динамических процессов.

В свою очередь, динамика геосферных оболочек активизирует процессы дегазации. Таким образом, можно сделать вывод о связи энергетики, динамики и дегазации Земли. При этом ведущая роль принадлежит энергетическим процессам.

Основным продуктом дегазации Земли являются флюиды. Глубинный флюид представляет собой сложную открытую энергетически концентрированную динамическую систему, постоянно меняющую свой состав и связи. Скорость перемещения флюидов зависит от энергетических возможностей системы и внешних условий. Следует различать фоновую дегазацию, когда функционирование динамической системы сводится к диссипации энергии и флюидов, и «прорывную» дегазацию, когда внешние энергетические и динамические условия вызывают перемещение системы без потери собственной энергии и флюидов.

При перемещении глубинных флюидов от внутренних геосферных оболочек к внешним происходит их существенное преобразование. Энергетика процессов ядра и нижней мантии переводит флюиды в «закритическое» состояние, когда флюиды представлены только ядрами элементов. По мере перемещения к внешним геосферам ядра элементов приобретают электронные оболочки и формируются глубинные восстановленные флюиды. Изменение условий фильтрации может снова привести к потере ядрами своих электронов. При снижении температуры отмечается формирование гидротермальных растворов. Восстановленный состав флюидов и наличие в них водорода и углерода предопределяют возможность минерального синтеза углеводородов. Минеральный синтез углеводородов может происходить как в глубокозалегающих флюидизированных очагах,

так и в пространственно-временных диссипативных структурах, сформировавшихся в результате энергетического воздействия.

В пределах осадочного чехла происходит дальнейшее преобразование и трансформация глубинных флюидов и их активное участие в формировании месторождений нефти и газа.

Изучение волновых процессов позволило установить нелинейные свойства геологической среды, обусловленные разномасштабной структурированностью энергетических потоков. Дано описание волновой и автоволновой динамики геологической среды и солитонов (сгустков смеси электромагнитной, акустической, сейсмической и накопленной энергии химического потенциала). Обоснованы механизмы формирования автосолитонов на основе активных систем, реализующих диффузионные процессы с активатором – флюидом или полем дилатансии и ингибитором – накопленной энергией в структуре среды. Подобные нелинейные эффекты определяют специфику тектонических процессов, обеспечивают преодоление флюидом непроницаемых толщ. Разработана технология, позволяющая фиксировать эти эффекты в шумовом спектре электромагнитных и сейсмических полей.

Усовершенствованы алгоритмы и методы эмиссионной сейсмической томографии, что позволяет:

- структурировать потоки эндогенной энергии,
- фиксировать энергетическое состояние геологической среды,
- отслеживать вертикальные перемещения солитонов в геологической среде в режиме реального времени,
- регистрировать автоволновую динамику геосреды, контролирующую флююидодинамические процессы,
- исследовать динамические характеристики электромагнитных пульсаций в ионосфере.

Разработаны теоретические основы комплексирования пассивных геофизических методов поисков и разведки месторождений углеводородов. Для нелинейных флюидонасыщенных сред установлена аналитическая связь между спектрами геофизических полей в трех частотных диапазонах (акустическом 10^3 – 10^4 Гц, сейсмическом 10 – 10^2 Гц, волн деформаций геосреды часы – сутки, наблюдаемых в вариациях гравитационного потенциала и изменениях структуры геологической среды).

Реализация этого подхода позволяет существенно повысить разрешающую способность пассивных геофизических методов.

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГОАКТИВНЫХ ЗОН ЗЕМЛИ

Постоянное эндогенное энергетическое воздействие приводит к формированию пространственно-временных геологических структур, в которых происходит образование суммарного энергетического поля, названного автоволновым полем [1]. При этом возможна:

- аккумуляция энергии, что приводит к формированию энергоактивных зон литосферы;
- трансформация энергии;
- диссипация с частичным накоплением энергии, что обеспечивает стабильность существования геологической структуры как диссипативной на потоке энергии и определяет время жизни таких структур.

Знание энергетики и динамики пространственно-временных геологических структур зон важно для решения задач нефтяной геологии и геофизики. Они являются либо зонами генерации нефти и газа, либо транзитными зонами (коровыми волноводами), в которых происходит процесс накопления глубинных углеводородов.

Движущей силой указанных процессов является организованная в результате формирования локальных когерентностей энергия в дальнем инфракрасном диапазоне теплового спектра электромагнитного поля и гиперзвуковой части акустического спектра. С этим же диапазоном электромагнитного спектра связана энергия супрамолекулярных структур, приводящих, в конечном итоге, к минеральному синтезу углеводородов. В этом случае эмиссионные спектры террагерцевого диапазона имеют наибольшие амплитуды, так как локальные коллективные эффекты подкрепляются молекулярными спектрами.

Традиционные решения задач глобальной геодинамики, исходящие из теории конвективных потоков в мантии, основаны на построении структуры вязкопластических течений вещества в недрах Земли в геологическом масштабе времени. Эти построения учитывают, в основном, тепловые эффекты и диффузионно-конвективный способ передачи энергии и не описывают механизмы формирования энергоактивных зон в геологической среде. В задачах локальной геодинамики доминируют процессы кумулятивного характера, в которых проявляется собственная энергия геологической среды в тектонических и геофизических процессах. Для их решения требуются физико-

математические модели нелинейных взаимодействий в системе физических полей, учитывающие накопленную энергию геологической среды.

Молекулярные спектры в 0–1 Гц-диапазоне частот отражают кооперативные флуктуации, длительность которых лежит в макроскопическом диапазоне. Они становятся значимыми для реализации геодинамических процессов, если происходят синхронно в объемах геологических тел. Это возможно при достижении фоновое равновесия среды на основе длинноволнового флуктуационного электромагнитного поля.

Эндогенные энергетические потоки приводят к формированию зон с избыточной энергией. В процессе эволюции происходит структурирование энергетического потенциала Земли, то есть пространственно-временные формы ее энергетики состоят из различных элементарных звеньев: каналов, потоков энергии, очагов и энергоактивных зон. Энергоактивные зоны Земли (ЭАЗ) формируются в результате взаимодействия геологической среды с потоками энергии и физическими полями различной природы [2]. Это обусловлено спецификой локальной неоднородности ее вещественного состава, когда среда состоит из определенных структурных форм, микрорезонаторов, характеристики которых определяют спектр поглощения и излучения энергии этой средой. В этих зонах происходят аномальное поглощение энергии физических полей, диссипация энергии из этих зон в виде различных излучений, эмиссии, а также преобразования энергии внутри зоны, приводящие к автоволновой и автосолитонной динамике, нелинейной флюидодинамике и т.д.

Активность ЭАЗ проявляется в физических полях. В частности, даже при малом (низкочастотном) воздействии различных источников, которые постоянно присутствуют в недрах Земли, эти зоны начинают «светиться» в сейсмических и акустических диапазонах частот, вызывая сейсмоакустическую эмиссию. Природа эмиссии – трансформация собственной энергии среды в различные локально неустойчивые состояния, которые становятся источниками излучения при различных воздействиях. Это может быть реализовано: 1) в заземленных неравновесных состояниях, которые формируются во фрактальных структурах среды и при снятии сдерживающих факторов могут проявиться в динамике геосреды в виде импульсных источников упругих колебаний; 2) в элементах структуры геосреды – резонаторах, аккумулирующих энергию по механизмам, аналогичным микроволновым биллиардам; 3) в автоколебательных структурах, формирующихся в капиллярных каналах, например при несмешивающемся

вытеснении нефти в пористых средах; 4) в структурах химического потенциала, которые представлены в молекулярных спектрах широкого частотного диапазона, включая террагерцы.

Метод эмиссионной сейсмической томографии позволяет наблюдать источники сейсмической эмиссии в объеме геологической среды в режиме реального времени. Он был разработан в ИФЗ РАН для наблюдения за удаленными источниками в низкочастотном диапазоне. Метод усовершенствован в ИПНГ РАН и адаптирован к анализу более высоких частот для исследования энергетического состояния геологической среды и энергетики месторождений нефти и газа. Стационарные ЭАЗ в литосфере проявляются в виде зон сейсмической эмиссии. Их существование обосновано пространственно-временной стабильностью картины распределения энергии микросейсмических колебаний. При этом источники эмиссии локализованы и характеризуются четкими параметрами.

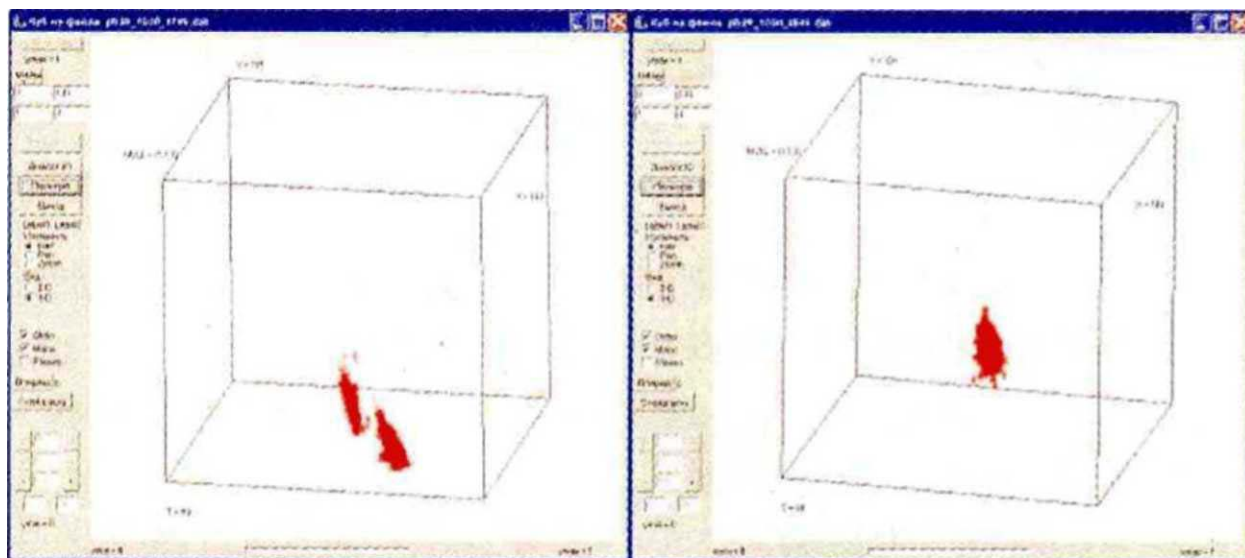
При построении физико-математических моделей нелинейной динамики в ЭАЗ волнового (солитонного) и автоволнового (автосолитонного) типов учитываются связи между электромагнитными и сейсмоакустическими полями, между энергетическими параметрами химического потенциала геологической среды и ее флюидонасыщенностью. Уравнения солитонной динамики для огибающих сейсмического диапазона частот поля деформаций, где энергия движения солитона подпитывается электромагнитным полем, имеют вид двойного нелинейного уравнения Шредингера. Метод эмиссионной сейсмической томографии позволяет фиксировать движения солитона в ЭАЗ (рис. 1). На рисунке виден медленно всплывающий внутри разломной зоны источник сейсмического излучения – солитон, свечение которого временно прекращается после низкочастотного возмущения, а затем снова появляется спустя 20 минут, продолжая движение вверх с тех глубин, где пропало прежнее свечение. Этот эффект объясняется нарушением при низкочастотном воздействии когерентного фона высокочастотных сейсмоакустических колебаний, огибающей которых является солитон, в силу изменения параметров микрорезонаторов в структуре геологической среды. Скорость вертикального движения его около 10 м/с, что на два порядка ниже скорости сейсмической волны и соответствует теоретически определяемой скорости солитона.

Иными свойствами обладают уединенные состояния – автосолитоны – в диссипативных неравновесных системах с динамикой флюидной компоненты, в которых

процесс установления равновесного состояния носит не осциллирующий, а релаксационный характер. Они могут образовываться только при наличии подкачки энергии от внешнего распределенного источника, характеристика которого определяется эндогенными энергетическими потоками.

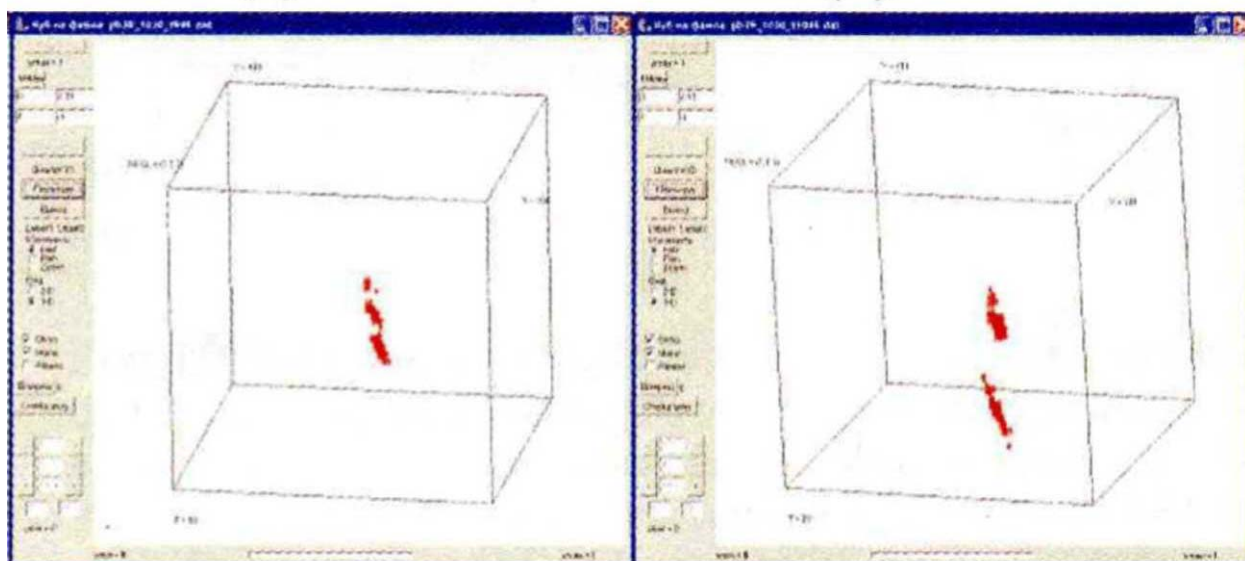
МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ ЗОН ЗЕМЛИ

Геологические объекты – это открытые системы, развитие которых определяется глобальными процессами энергетики, дегазации и динамики Земли. Они представляют собой сложные системы, состоящие из многочисленных подсистем и элементов. Строение геологических систем обусловлено различными природными факторами, что отражается в структуре системы. Подсистемы и элементы единой целостной природной системы по-разному реагируют на одно и то же энергетическое воздействие. Одни из них аккумулируют энергию, другие реагируют изменением структуры и параметров, третьи пропускают энергию, не реагируя на нее. Все эти подсистемы и элементы единой целостной природной системы находятся в постоянном развитии. Под воздействием меняющегося во времени эндогенного энергетического потока формируются пространственно-временные диссипативные структуры. Следовательно, все подсистемы и элементы имеют свои энергетические параметры, меняющиеся во времени. Отсюда следует важный вывод, что геосистема в целом формирует некое обобщенное энергетическое поле, или автоволновое поле, которое самоорганизуется за счет элементарных энергетических полей подсистем и элементов сложно построенного неоднородного, но единого целостного геологического тела. Автоволновое поле отражает состояние системы физических полей данного геологического тела. Оно саморегулируется и саморазвивается под влиянием постоянно меняющегося во времени энергетического потока.



-210 (а)

-110 (б)



-10 (в)

90 (г)

Рис. 1. Пассивный мониторинг нефтяного месторождения (Западная Сибирь) с использованием метода эмиссионной сейсмической томографии
Сейсмоэмиссионные изображения среды для последовательных временных интервалов до (а, б), во время (в) и после (г) низкочастотного сейсмического события. Цифры – начало временного интервала в секундах относительно времени сильной низкочастотной фазы. Длина временного окна при расчете изображения 100 с. Ребро куба 6 км. Использована 60-канальная поверхностная площадная сейсмическая группа

При флюидизации диссипативной гетерогенной геосистемы формируются конкурирующие энергетические и флюидные неравновесные, неустойчивые структуры, активность которых контролируется автоволновым полем.

Энергетическая и флюидная подпитка вызывает увеличение неравновесности и неустойчивости системы. Рост неустойчивости приводит к формированию флуктуаций, которые при увеличении энергетического и флюидного воздействия преобразуются в автосолитоны. «Компромисс» между энергией, флюидом и структурой среды приводит к формированию статических, пульсирующих или бегущих автосолитонов. Последующая энергетическая и флюидная накачка переводит уединенные состояния автосолитонного типа в новое структурное флюидно-энергетическое состояние. Реализация процессов флюидизации имеет свою специфику в каждой из подсистем и в каждом элементе сложной неоднородной геологической системы. Таким образом, автосолитоны – это диссипативные неравновесные структуры, образованные в результате конфликта энергетических и флюидодинамических процессов.

По-иному процессы флюидизации происходят в однородной геосистеме. В результате постоянного энергетического воздействия в нелинейных диссипативных однородных по строению геологических системах (подсистемах, элементах) формируются коллективные явления, что способствует их переводу в когерентное состояние. Когерентное состояние формирует энергетическую структуру геосистемы, которая препятствует флюидизации системы. Флюид стремится разрушить энергетическую когерентную структуру и увеличить флюидонасыщенность системы, а энергия, накопленная в геосистеме, препятствует реализации этого процесса. Флюидизация приводит к появлению флюидизированных очагов и росту неоднородности в геосистеме. Формирование неоднородностей в конечном счете разрушает когерентную среду геосистемы, чем обеспечивается полная флюидизация геологического тела.

В результате геофизических работ на глубинах 10–25 км, 55–80 км, 110–120 км выявлены флюидонасыщенные зоны, которые характеризуются инверсиями сейсмических скоростей, изменениями электропроводности и другими аномальными эффектами. В геосферных оболочках Земли на разных глубинах установлены слои пониженной вязкости. По-видимому, подобные «аномалии», или флюидонасыщенные зоны, к которым относятся коровые волноводы, астенолинзы, астенолиты, да и астеносфера в целом, образовались в результате эндогенного энергетического и флюидного воздействия, что

привело к формированию пространственно-временных диссипативных структур, активность флюидизации которых контролируется автоволновыми процессами.

Верхняя кора отличается характерной трещиноватой структурой. Она в наибольшей степени (по сравнению с нижней и средней корой) разбита разломами и трещинами различных размеров. Типичными для нее являются так называемые листрические разломы, которые имеют специфическую форму. Они фиксируются в виде вертикальных разломов в верхних горизонтах земной коры, затем постепенно переходят в горизонтальное положение и часто приобретают трещиноватую структуру. Трещиноватые слои обладают особыми свойствами. К ним относятся пониженные сейсмические скорости и повышенная электропроводимость. Сейсмические волны распространяются в них как в волноводах. Отражаясь от верхней и нижней границ волновода, волна может пройти большое расстояние, не затухая. Трещиноватые слои, расположенные на глубинах от 10 до 25 км и названные коровыми волноводами, условно выделяются как «верхняя астеносфера». Аналогичные горизонтальные слои с аномальными свойствами обнаружены сейсмическими методами в литосфере («нижняя астеносфера»).

Трещиноватая структура верхней коры определяет высокую насыщенность водными и водно-газовыми флюидами, которые содержат растворы минералов и УВ. Вода может находиться как в связанном, так и в свободном состояниях. Высокое насыщение водой и другими флюидами, несомненно, сказывается на всех геологических процессах в верхней коре.

Механизм наполнения флюидами трещиноватых слоев коровых волноводов обеспечивается автоколебательными или автоволновыми процессами. Для их возникновения требуются два условия. Во-первых, необходим источник энергии, а во-вторых, некоторое «устройство», которое преобразует поток энергии в автоколебательный режим. Источник глобальной энергии, питающий все тектонические процессы, известен. Это – конвективные процессы в мантии. Они приводят в движение литосферные плиты, двигают материки, создают горные системы и вызывают разрушительные землетрясения. Тектонические движения коры обладают достаточно большой энергией для того, чтобы создавать трещиноватые слои и разломы и закачивать в них флюиды.

Реализация автоволновых и автоколебательных процессов осуществляется за счет локальной эндогенной энергии. Механизм многих колебательных движений в волноводах связан с взаимодействием энергии и флюидов с трещиноватой средой. При этом объем

трещинно-порового пространства, насыщенного флюидами, возрастает. Данное явление называется дилатансией. Дилатансия приводит к снижению порового давления, что, в свою очередь, влияет на процесс наполнения флюидами коровых волноводов.

Из анализа экспериментальных данных следует, что трещиноватая среда коровых волноводов, содержащая флюид, не может выдерживать достаточно долго вес вышележащих слоев. Поэтому волноводы должны были бы за достаточно короткое геологическое время уменьшить объём пустотного пространства, а флюиды, содержащиеся в коровом волноводе, – отжаться и отфильтроваться в верхние горизонты коры. Сам факт наличия коровых волноводов в течение длительного времени означает, что действует некоторый механизм, периодически возобновляющий их существование. Предложен механизм автоколебаний, который выполняет эту функцию.

Энергетическое воздействие приводит к дилатансионному расширению (т.е. к увеличению объема трещин) в коровом волноводе, что сопровождается нагнетанием флюидов в коровый волновод. При уменьшении степени энергетического воздействия наступает следующая фаза – консолидация волновода с отжатием флюидов наверх. Эта фаза завершает цикл автоколебаний, который затем периодически повторяется.

В этой модели действуют два конкурирующих флюидодинамических процесса – компакция и дилатансионного расширения. Их взаимодействие поддерживает волновод в состоянии динамического равновесия. Это равновесие проявляется в виде некоторого колебательного или волнового движения, в котором чередуются оба процесса.

Периодически двигаясь вверх от волноводов, флюиды как бы промывают насыщенные УВ и минеральными веществами осадочные слои и создают предпосылки для образования месторождений нефти и газа. При движении флюидов в фазе компакция из волноводов вверх они упираются в непроницаемые покрышки, формируют месторождения нефти и газа и часто создают аномально высокие пластовые давления (рис. 2).

Таким образом, возникновение колебательных (автоволновых) процессов в коровых волноводах связано с самим фактом их существования. Главное геологическое следствие этих колебаний заключается в чередовании режимов дилатансии и компакция в волноводах, которые охватывают практически все области континентальной коры. Поскольку все флюиды (в том числе и водные) являются очень активным агентом, то

указанный круговорот качественно влияет на многие геологические процессы, осуществляя транспорт вещества верхней коры, его преобразование и концентрацию.

Аналогичные автоколебания возникают и в разломах [3]. Колебания в них, сопровождаемые движением флюидов, протекают быстрее, чаще и с меньшей амплитудой (рис. 3). Волнообразные движения охватывают области континентальной коры размером порядка тысяч километров, т.е. размером самих волноводов. Причина взаимной связи механических движений по разломам с миграцией флюидов состоит в том, что при сдвиге по разлому трещиноватость (т.е. размер и число трещин), а также объём трещинно-порового пространства, насыщенного флюидами, возрастает.

Данными многоволнового глубинного сейсмического профилирования (МГСП) установлена устойчивая корреляция местоположений глубинных сейсмических аномалий (мантийных и коровых) и зон размещения крупных и гигантских месторождений нефти и газа в осадочном чехле [4].

Были изучены особенности строения земной коры и верхней мантии в зонах размещения 30 газовых, газоконденсатных и нефтяных месторождений в 8 нефтегазоносных провинциях. Наиболее представительный материал получен для районов размещения газовых и газоконденсатных скоплений. Среди них – уникальные месторождения Прикаспийской впадины (Астраханское, Карачаганакское, Оренбургское) и Западной Сибири (Медвежье, Заполярное, Уренгойское, Ямбургское).

Под этими месторождениями на глубинах 110 – 120 км и 50 – 85 км установлены сейсмические аномалии, которые характеризуются пониженными скоростями, антиклинальной формой верхнемантийных сейсмических границ. Под некоторыми месторождениями (например, Ямбургским газоконденсатным месторождением) установлено наличие трех волноводов. Отмечена разница в скорости V_p^M (кровля мантии) между зонами размещения газовых и нефтяных месторождений. Фиксируя общее понижение скоростей под месторождениями углеводородного сырья, авторы [4] отмечают, что по газоносным объектам (20 месторождений) в 95% случаев V_p^M скорость равна 7,90 – 8,20 км/с, тогда как по нефтеносным объектам (25 месторождений) в 65% определений скорость V_p^M равна 8,30 – 8,70 км/с. При этом толщина верхнемантийного слоя составляет 15–20 км, а толщина астенолинз – 40–70 км.

Установлены сейсмические аномалии, связанные с так называемыми доменами, которые имеют горизонтальную протяженность $n \times 10$ км. Они размещаются в пределах условно выделяемой кристаллической земной коры между сейсмическими границами Ф и М. Также отмечается сквозной характер сейсмических аномалий. Это – средне-нижнекоровые домены толщиной 4–10 км и коровые сейсмические волноводы. При этом подчеркивается, что наибольшее значение имеют нижнекоровые, в том числе базальные сейсмические волноводы, которые характеризуются высокими скоростными контрастами, достигающими на уровне границы М значений 10–18%.

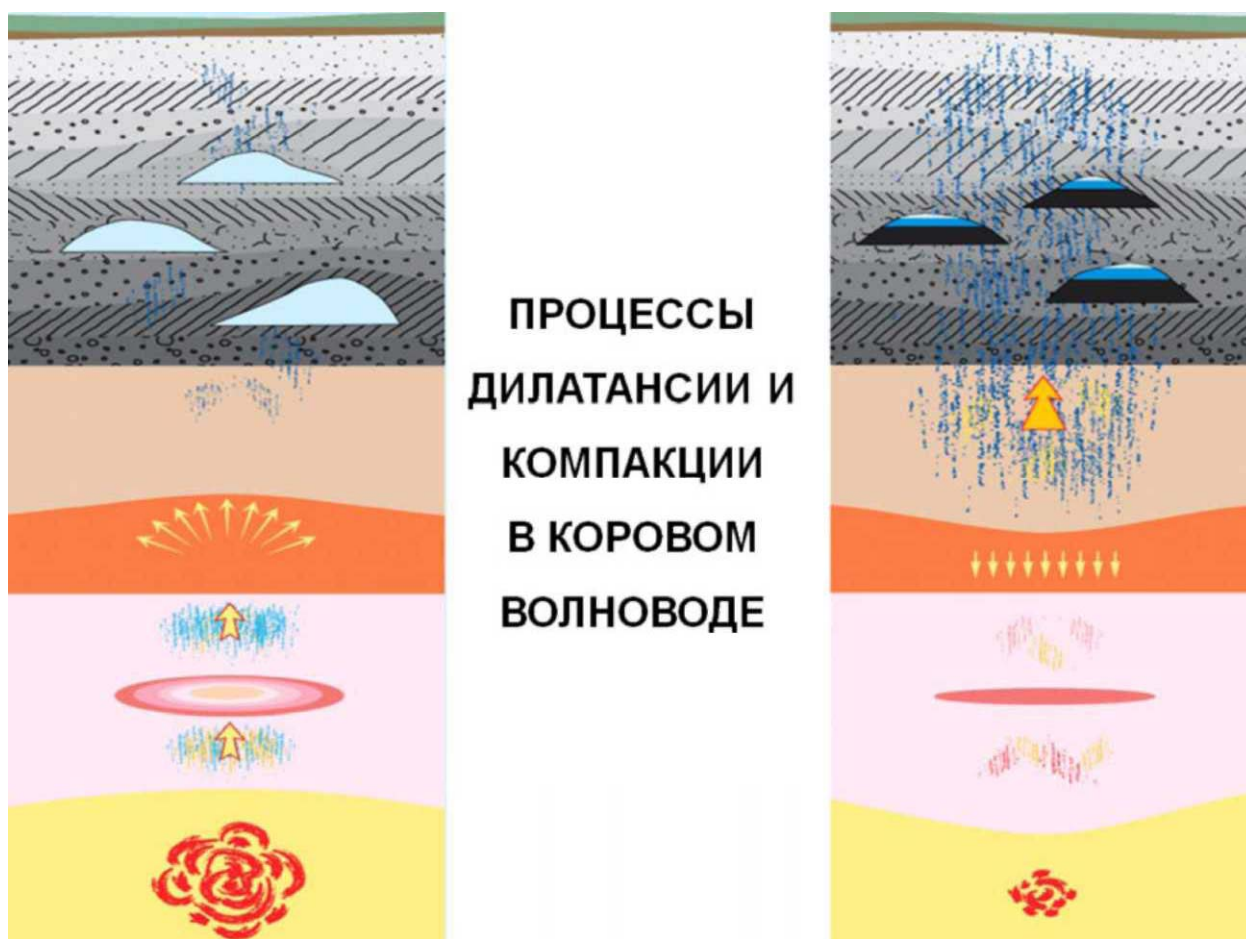


Рис. 2. Процессы дилатансии и компактии в коровом волноводе

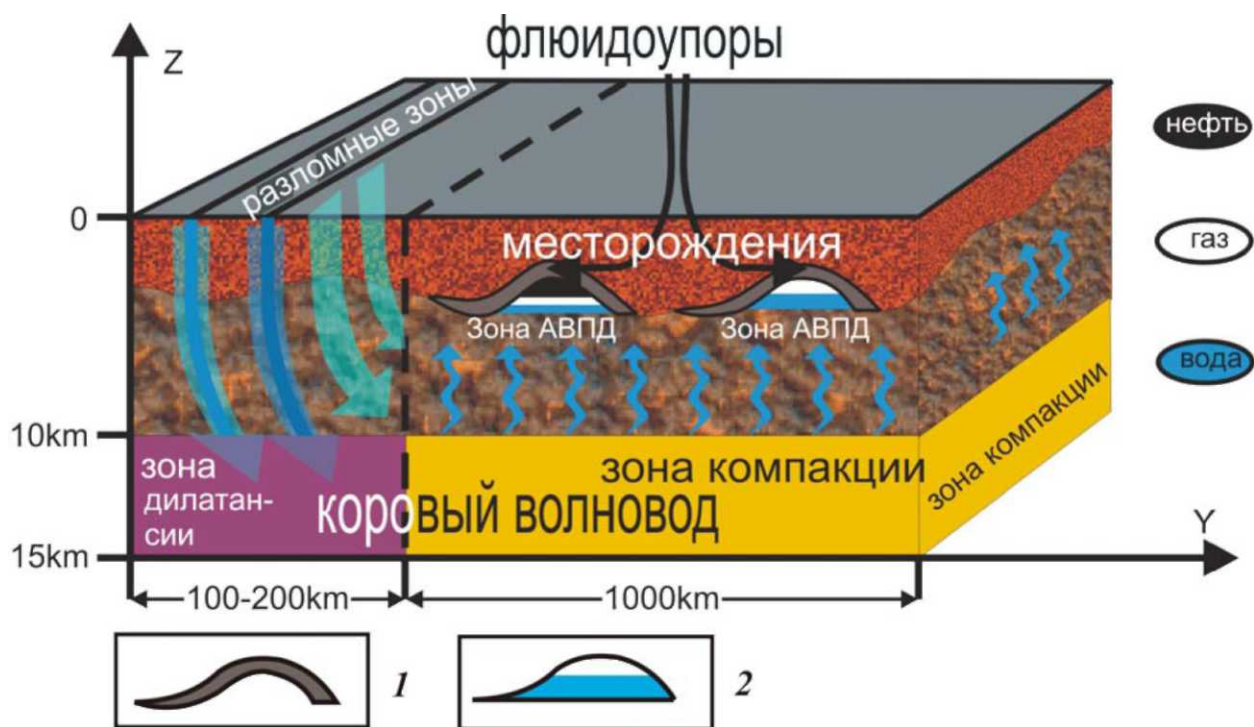


Рис. 3. Автоколебания в коровом волноводе, рассекаемом разломом
Стрелками показаны направления движения флюидов во время фазы компакци над волноводом

В пределах Уренгойского месторождения отмечена контрастная неоднородность верхней мантии. Здесь установлен «раздув» верхнего мантийного волновода, что привело к тому, что он непосредственно соприкасается с подошвой базального корового слоя (рис. 4). Отмечается наличие субвертикальных скоростных контактов, которые иногда имеют трансоровый характер. Средние количественные показатели мантийных и коровых аномальных сейсмических зон и районов размещения крупных скоплений УВ представляют собой бесспорно установленный факт. Авторы [4] делают вывод о существовании генетической, а возможно, и временной связи процессов формирования (и последующей консервации) наблюдаемых ныне упругих свойств кристаллической коры и верхней части мантии с процессами углеводородонакопления в перисфере Земли.

Именно вертикальная миграция УВ из глубинных зон литосферы, по мнению авторов, дает наиболее логичное объяснение описанным выше данным о взаимосвязи местоположений глубинных сейсмических аномальных зон и крупных углеводородных (рис. 4)

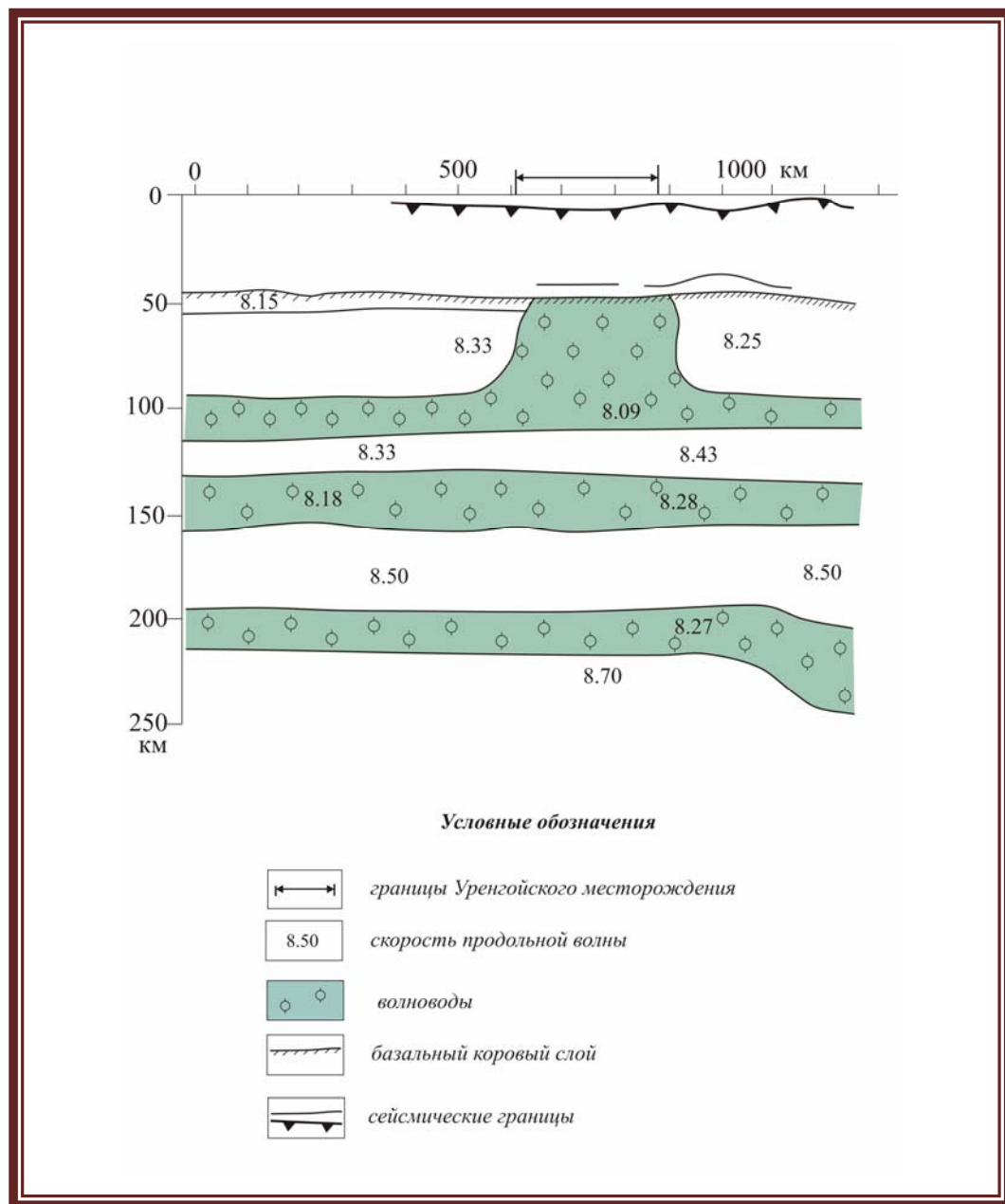


Рис. 4. Строение верхней мантии под районом размещения Уренгойского газоконденсатного месторождения

скоплений. Образование крупных углеводородных скоплений вряд ли можно объяснить в свете новых материалов МГСП без признания большой роли привноса эндогенных энергии и вещества.

В последние годы сейсмические исследования, выполненные в акватории Каспийского моря, позволили выявить субвертикальные геологические тела (СГТ), которые пронизывают осадочный чехол от фундамента до поверхности [5]. Как правило, СГТ не имеют видимых «корней» и обычно приурочены к зонам глубинных разломов, рассекающих Южно-Каспийскую впадину на крупные блоки. Наиболее крупные субвертикальные тела имеют диаметр от 3–4 до 10 км и высоту от 8–10 до 20 км. Субвертикальные тела отражаются в гравитационных и электромагнитных полях отрицательными аномалиями и характеризуются повышенной радиоактивностью.

СГТ представляют собой сложные геологические образования и являются зонами выхода на поверхность флюидов и разуплотненного осадочного материала. Наиболее масштабное проявление этого процесса – грязевой вулканизм. Авторы делают вывод о связи генерации и накопления углеводородов с динамикой процессов формирования субвертикальных геологических тел. Свыше 70% всех месторождений нефти и газа Южно-Каспийской впадины, в том числе все гигантские месторождения, связаны с СГТ, и почти всегда в зонах развития субвертикальных геологических тел происходит выделение огромных количеств газа. СГТ, по мнению авторов, это участки повышенной геодинамической активности и проницаемости земной коры, отражающиеся в нестационарности физических и геохимических полей. Такие участки являются зонами аккумуляции энергии различных источников. Это предполагает максимальную интенсивность протекания физико-химических процессов в этих зонах по сравнению с окружающими породами.

Формирование СГТ авторы объясняют спонтанным возбуждением геологической среды, ее разуплотнением и перемещением осадочных пород под действием сил всплывания. Это быстротекущие процессы, связанные с интенсивными выделениями флюидов и формированием полей высокого давления. Сочетание газонасыщения с избыточным давлением предопределяет высокую склонность среды к реологическим превращениям.

В период 1981–1986 гг. подземными ядерными взрывами в пределах южной части Прикаспийской впадины были созданы хранилища углеводородов. 15-летние наблюдения

за изменением устьевых давлений и капежа технологических скважин, обеспечивающих мониторинг за подземными емкостями, позволили установить субвертикальную фильтрацию жидкостей и газов [Манукьян В.А., 2002 г.]. Отмечены выбросы гелия, водорода и метана, связанные с землетрясениями, удаленными часто на сотни и тысячи километров. Субвертикальная фильтрация флюидов обеспечивается раскрытием тектонических нарушений в результате землетрясений и других сеймотектонических событий.

Как показано в работе [6], радон является предвестником таких геодинамических явлений, как горные удары в глубоких шахтах и тектонические землетрясения. Интенсивность выхода радона из массива горных пород отражает его сжатие и растяжение. При растяжении массива происходит раскрытие пор и трещин, что сопровождается увеличением интенсивности эманации радона. Активное трещинообразование приводит к разрушению породы и максимальным значениям показателей, характеризующих интенсивность выхода радона из массива.

Как показало моделирование, уединенные тектонические волны увеличивают проницаемость ослабленных зон и нарушений на 2 порядка, при этом пористость возрастает в 5 раз [Гарагаш И.А., 2001 г.].

Таким образом, в периоды тектонической активности (землетрясения, переход корового волновода в режим компакции и т. п.) происходит раскрытие тектонических нарушений, увеличение проницаемости ослабленных зон, активизация процессов фильтрации флюидов, что приводит к растворению аутигенных минералов и увеличению матричной пористости пород.

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ГИГАНТСКИХ СКОПЛЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

Изменение взглядов на понимание процессов нефтегазообразования произошло на рубеже 80-х годов, когда появились принципиально новые материалы о строении земной коры, верхней и нижней мантии, полученные в результате исследований Мирового океана, сверхглубокого бурения и глубинного сейсмического зондирования. Эти представления легли в основу учения о тектонике литосферных плит и динамике Земли.

Сегодня уже детально обосновано и доказано существование процесса поддвига плит, при котором океанское дно продвигается под островные дуги и активные окраины континентов, что дает возможность понять механизм возникновения предгорных

прогибов, региональных надвигов (обдукции) и геосинклинальной складчатости; все эти связанные между собой процессы вызываются единой причиной – коллизией литосферных плит, надвиганием островных дуг на пассивные окраины континентов. Следует также отметить, что под островные дуги затягиваются значительные массы осадков с большим содержанием органического вещества.

Изложенные данные позволяют сделать важный вывод о том, что в зонах конвергенции литосферных плит под островными дугами и активными окраинами континентов могут генерироваться УВ. Надежным подтверждением этой теории является обнаружение в 80-х годах залежей углеводородов под надвигами Скалистых гор, Аппалачей, в осадочных бассейнах Персидского залива, Венесуэлы, Алжира, Канады и Аляски.

Еще один из важнейших выводов теории тектоники литосферных плит заключается в тектонической расслоенности земной коры. Результаты сейсмических, магнитотеллурических исследований глубинного строения земной коры, а также данные сверхглубокого бурения показывают, что кора обладает сложной слоистой структурой и представляет собой «слоеный пирог», составленный из чередующихся жестких сейсмически прозрачных и непрозрачных податливых слоев. По комплексу геофизических данных податливые слои (волноводы) отождествляются с трещиновато-пористыми слоями, насыщенными флюидами. Объем этих флюидов достаточно велик и по некоторым данным соизмерим с объемом вод Мирового океана. Такое количество воды оказывает значительное влияние на все геологические процессы в земной коре.

На первом этапе образования осадочных бассейнов в пассивных окраинах континентов во флюидодинамическом режиме этих бассейнов доминирующую роль играют два явления: консолидация осадочного бассейна и автоколебания коровых волноводов. Консолидация охватывает зону до глубин в 10–12 км. В процессе ее флюиды устремляются вверх, частично унося с собой растворенные в них УВ. В нижней части осадочного бассейна на глубинах от 10 до 25 км возникают коровые волноводы, которые могут охватывать не только осадочные породы, но и породы фундамента. Феномен коровых волноводов приводит к некоторым геологическим следствиям. Сам факт существования волноводов обуславливает периодические вертикальные движения флюидов в вышележащие слои. Эти флюиды как бы «промывают» весь осадочный

покров, увлекая за собой углеводороды. В итоге УВ, рассеянные первоначально по всей толще осадочных пород, концентрируются в ограниченных зонах, образуя скопления.

Второй важный фактор состоит в том, что волноводы обладают особыми реологическими свойствами. Вязкость их много меньше вязкости окружающих их пород. Когда в процессе субдукциидвигающаяся плита «наезжает» на зону волновода, то условия субдуцирования резко улучшаются. Волновод играет роль «смазки» длядвигающихся плит. Это обстоятельство чрезвычайно важно как с точки зрения геодинамики зон субдукции, так и с точки зрения флюидного режима и миграции УВ.

На третьем этапе наибольший интерес вызывает движение флюидов из зон субдукции. В режиме компакций многофазный флюид отжимается вверх. Режим компакций развивается на фоне медленных процессов, длящихся миллионы лет, и характеризуется вязкими деформациями скелета волновода. Как известно, в зоне субдукции имеют место интенсивные сейсмические процессы. При сейсмическом сотрясении на короткое время открываются трещины, что приводит к перераспределению порового давления и вызывает интенсивный переток флюидов. Эти быстрые процессы сопровождаются упругими деформациями скелета. Они резко ускоряют процесс концентрации и сегрегации флюидов и их подъем. Образование и наполнение месторождений углеводородов в значительной степени связано с быстрыми процессами.

На заключительном этапе развития бывшего осадочного бассейна, ставшего элементом зоны субдукции, начинается миграция флюидов из этой зоны вверх. Эта миграция длится многие миллионы лет и состоит из нескольких взаимосвязанных процессов. Затянутые в зону субдукции осадки содержат значительное количество свободной и связанной воды, а также УВ. Количество свободной воды пополняется за счет дегидратации океанической коры и осадочных пород. Эти флюиды движутся в основном вдоль зоны субдукции по сообщающимся трещинам и разломам. Легкие фазы УВ в виде газа обладают высокой проникающей способностью и идут не по наклонной плоскости субдукции, а непосредственно вверх, образуя газоносные скопления в тыловой части островной дуги.

При изучении Прикаспийского бассейна использованы флюидодинамические модели, описывающие консолидацию осадочных бассейнов, автоколебательные процессы в коровых волноводах и флюидодинамические процессы эволюции осадочных бассейнов в различных геодинамических зонах [7]. Модель быстрых пороупругих процессов

позволяет объяснить, каким образом рассеянные углеводороды концентрируются в месторождениях, занимающих относительно небольшие объемы. Впервые осуществлено прямое численное моделирование продвижения газofлюидодинамических фронтов на примере нефтегазоносных бассейнов Каракульско-Смушковской зоны и Астраханского свода. Анализ расчетных баз данных позволил выделить основные гидродинамические механизмы формирования залежей УВ в осадочных бассейнах (без гидроразрывов): первичный пробой, реверсивный (колебательный) и диссипативный (диффузионный) механизмы.

В реверсивном режиме УВ-залежь развивается в слоистом флюидоупоре, как это наблюдается в Астраханском своде, в цикле собственных колебаний, связанных с разномасштабной динамической инерцией флюидов в процессе их гравитационного взаимозамещения. Период таких колебаний соизмерим с временем эксплуатации месторождения. Классификационная картина позволяет установить общее качественное понимание гидродинамического поведения флюидов в осадочных бассейнах.

Предложенные численные модели служат эффективным средством интеграции геологических и геофизических данных и позволяют прояснить наиболее слабое звено в существующих на сегодняшний день различных представлениях о механизмах миграции и концентрации углеводородных флюидов [8].

Для гидродинамического численного анализа (программа «ТЕКОН») использован разрез (протяженностью примерно 1000 км) от юго-западной надвиговой зоны кряжа Карпинского на северо-восток через Каракульско-Смушковскую надвиговую зону и Астраханский массив.

Цель такого анализа заключалась в использовании программы «ТЕКОН» для иллюстрации динамики продвижения флюидов по разломной зоне и зоне дислокации, а также заполнения и формирования гигантского Астраханского месторождения и выделения прогнозных зон (рис. 5).

Образование и развитие гигантского Астраханского месторождения связано с движением флюидов по разломам, трассирующим надвиги кряжа Карпинского. Источником всех движений является горизонтальное напряжение в коре и литосфере, которое создается в результате глобальных геодинамических процессов, определяемых конвективными движениями в мантии.

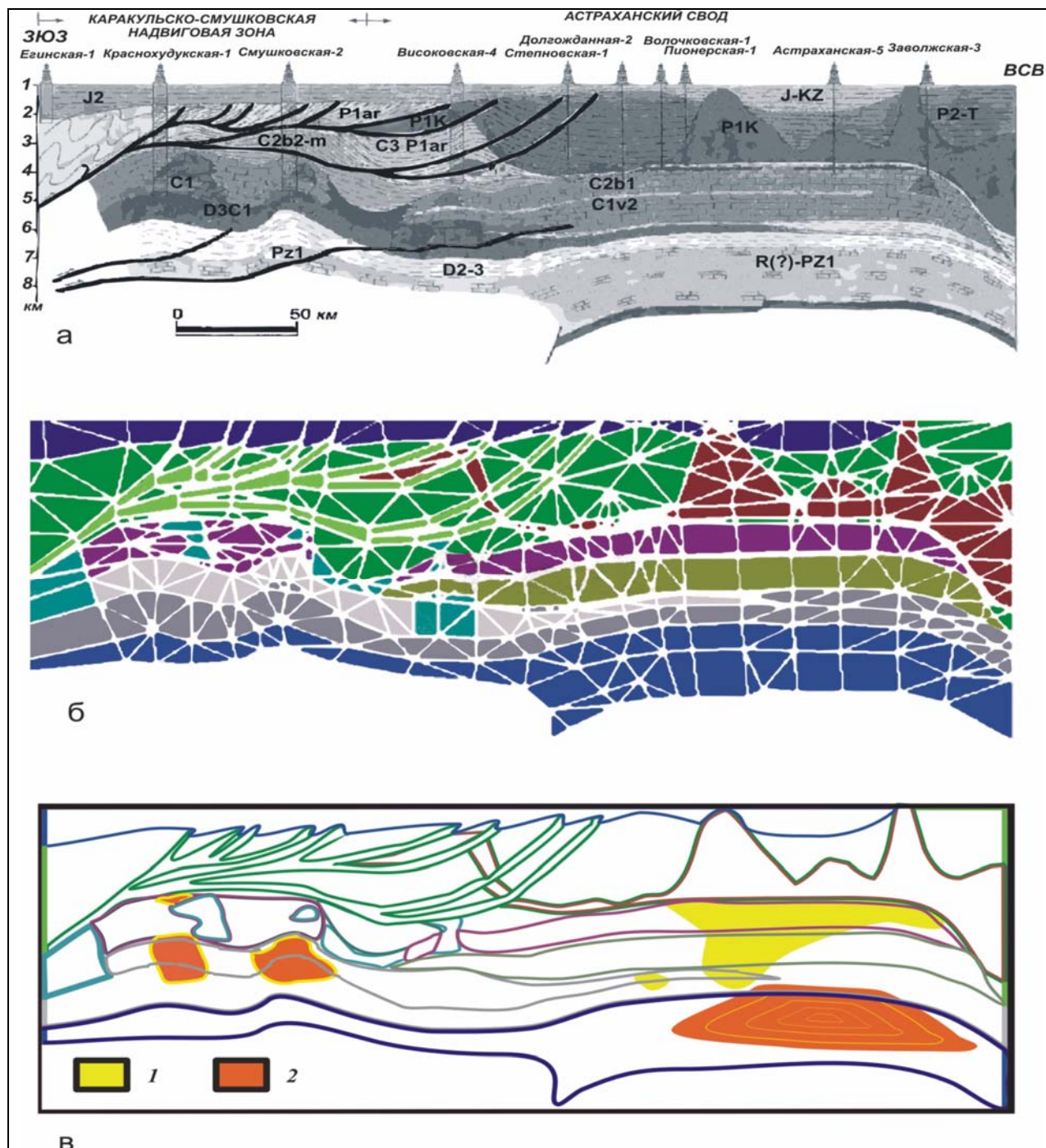


Рис. 5. Модель движения газообразных УВ-флюидов по зонам повышенной проницаемости через Каракульско-Смушковскую надвиговую зону и Астраханский свод:
 А – геологический профиль; Б – сетка аппроксимации по геологическому профилю;
 В – рассчитанные программой «ТЕКОН» скопления УВ: 1 – промышленные; 2 – перспективные

Характер флюидодинамики в глубоких разломах зависит от последовательно чередующихся процессов дилатансии и компакции в них. Расчеты показали, что при сдвиге в режиме дилатансии возникают такие отрицательные давления, которые создают мощный эффект нагнетания флюидов.

В результате автоколебательных процессов в этих разломных зонах флюиды из разломов устремляются в окружающий массив пород. Сами массивы горных пород, образующие тела надвигов, являются малопроницаемыми. Однако в них есть проводящие ослабленные зоны, по которым происходит движение флюидов. В случае многофазного флюида эти движения являются достаточно сложными и претерпевают несколько стадий развития.

Первая стадия соответствует обычной фильтрации многофазного флюида, которая во многом аналогична движению однофазного флюида. Затем происходит пробой газовой фазой и наступает стадия реверсионных автоколебаний, обусловленных метастабильным состоянием слоистых пачек. Именно накопление газа в неустойчивых слоистых флюидоупорах и создает условия для образования месторождений-гигантов.

Среднедевонский комплекс Астраханского свода находится на глубине примерно 6,5 км, в то время как метастабильные слои располагаются несколько глубже (примерно на глубине 7,5–8,0 км). Они играют роль накопителя газа, который поступает в Астраханский массив. Термодинамические условия на этих глубинах соответствуют неустойчивому состоянию газоконденсатной системы.

В результате тектонических подвижек и изменения термобарических условий при миграции газоконденсатная система испытывает различные фазовые переходы с выделением легкоподвижной фазы и легких углеводородов.

Предложенная концепция движения флюидов и образования углеводородных месторождений основана на автоколебательных процессах в коровых волноводах и объясняет механизм образования гигантских скоплений УВ на примере Астраханского газоконденсатного месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриевский А.Н. Фундаментальные проблемы геологии нефти и газа: Акад. чтения на учен. совете Академии, 19 апреля 1994 г. М.: ГАНГ им. И.М. Губкина,

1995. 15 с.
2. Дмитриевский А.Н., Володин И.А. Формирование и динамика энергоактивных зон в геологической среде // Докл. РАН. 2006. Т. 411, № 3. С. 395-400.
 3. Дмитриевский А.Н., Баланюк И.Е., Донгарян Л.Ш., Каракин А.В., Повещенко Ю.А. современные представления о формировании скоплений углеводородов в зонах разуплотнения верхней части коры // Геология нефти и газа. 2003. № 1. С. 2-8.
 4. Букин Н.К., Щеглов А.Д., Егоркин А.В., Солодилов Л.Н. Новые сейсмические метки литосферы районов размещения крупных углеводородных скоплений // Докл. РАН. 1999. Т. 364, № 6. С. 792-795.
 5. Мамедов П.З., Гулиев И.С. Субвертикальные геологические тела в осадочном чехле Южно-Каспийской впадины // Изв. АзАН. Науки о Земле. 2003. № 3. С. 139-146.
 6. Уткин В.И., Юрков А.И. Радон как «детерминированный» индикатор природных и техногенных геодинамических процессов // Докл. РАН. 2009. Т. 426, № 6. С. 816-820.
 7. Дмитриевский А.Н., Баланюк И.Е., Каракин А.В., Повещенко Ю.А. Новые идеи формирования Астраханского газоконденсатного месторождения // Газовая пром-сть. 2002. № 3. С. 48-52.
 8. Дмитриевский А.Н., Повещенко Ю.А., Баланюк И.Е., Абля Э.А., Донгарян Л.Ш. Численная гидродинамическая модель формирования месторождений-гигантов // К созданию общей теории нефтегазоносности недр. Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа: Материалы 6-й междунар. конф. М., 2002. Кн. 1. С. 157-161.