

**О НЕКОТОРЫХ ОБЩИХ СВОЙСТВАХ ФЛЮИДА  
В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ, ЯВЛЕНИЯХ И ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ  
(К ОБОСНОВАНИЮ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО  
ИЗУЧЕНИЯ НЕДР)**

**Часть 2**

А.М. Кузин

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва,

e-mail: amkouzin@yandex.ru

**ФЛЮИДЫ В ПОДГОТОВКЕ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

В одной из работ [Копничев, 1997] была предложена качественная модель подготовки очага корового землетрясения, в которой основную роль играет вертикальная миграция флюида. Суть ее состояла в формировании в нижней части коры и верхней мантии субвертикальных зон, насыщенных флюидами, которые за счет гидроразрыва мигрируют в область будущего очага. В последующем [Копничев и др., 2006] эта модель была детализирована с учетом данных новых наблюдений. В самой верхней части коры ( $H = 0-10$  км) и в верхней мантии находятся зоны аномально высокого поглощения короткопериодных поперечных волн. В средней части коры фиксируется высокоскоростная (жесткая), эллиптическая по форме структура ( $H = 10-35$  км). Внутри нее землетрясения отсутствуют, по-видимому, она служит концентратором напряжений, что согласуется с моделью твердого тела со структурой [Родионов и др., 1986].

Убедительным доводом флюидной составляющей процесса сейсмичности следует назвать явление вертикального расположения очагов землетрясений. В литературе оно получило названия «сейсмофокальные зоны гнездового типа» [Zarifi, Havskov, 2003], «субвертикальное столбообразное скопление» [Шевченко и др., 2011], «сейсмические гвозди» [Вадковский, 2012]. В работе [Шевченко и др., 2011] проведен подробный анализ тектонической позиции субвертикальных скоплений очагов наиболее изученных сейсмоактивных зон.

1. Гармский полигон – в пределах Таджикской депрессии. Столбообразное тело ( $H = 21-40$  км) пронизывает снизу доверху весь комплекс надвиговых пластин, образующих северное крыло Таджикской депрессии. Нижняя часть тела уходит в кристаллический фундамент, что позволяет его интерпретировать как вертикальный канал миграции флюидов. В дополнение нужно заметить, что при изучении природы образования аномально высоких пластовых давлений в Вахшской нефтегазоносной зоне была

зафиксирована повышенная интенсивность землетрясений, которые сопровождались увеличением содержания растворенного газа с глубиной [Александров, 1987].

2. В зоне Алтайского землетрясения 2003 г. ( $M_w = 7.3$ ), в стороне от места разрыва и выхода очага на дневную поверхность, возник компактный, изометричный в плане и вертикальный в разрезе кластер ( $H = 1-12$  км), не связанный ни с одной геологической структурой.

3. При Нефтегорском землетрясении 1995 г. ( $M_w = 7.1$ ) также наблюдался аналогичный кластер в стороне от основной афтершоковой зоны, но более плоский и вытянутый ( $H = 0-15$  км).

4. При Култукском землетрясении ( $M_w = 6.3$ ) 27 августа 2008 г. отмечен отдельно отстоящий кластер ( $H = 8-25$  км).

5. Ташкентская зона землетрясений 26.04.1966 г. характеризуется компактным в плане и несколько удлинённым распределением эпицентров. Скопление субвертикальных очагов находится в интервале  $H = 2-8$  км.

6. Очаги Дагестанского землетрясения (14.05.1970 г) расположены в интервале  $H = 0-20$  км. Гипоцентры трех основных толчков находились на  $H = 9-12$  км. Это землетрясение сопровождалось роем афтершоков глубиной от 0 до 30 км, образующих субвертикальную широтную полосу. На всей территории Известнякового-Третичного Дагестана, в том числе Нараттюбинской моноклинали, вообще отсутствуют крупные субвертикальные или крутонаклонные тектонические разломы, которые можно было бы связать с Дагестанским землетрясением. При этом необходимо отметить, что в последующее время такая «субвертикальная полоса» с использованием данных, полученных по методам разведочной геофизики [Кадурин и др., 2013] была интерпретирована как система разнонаправленных разрывных нарушений. Часть очагов землетрясений в ней находится вблизи наклонного разлома, другая часть – вне разломов.

7. В зоне Вранча облако глубокофокусных очагов представляет собой субвертикальное уплощенное линзообразное тело. Большая его ось ориентирована по касательной к Карпатской дуге. Простираение сейсмогенной зоны изменяется с глубиной (в верхней части ( $H = 110-150$  км) в направлении ЮЗ–СВ, в нижней ( $H = 190-230$  км) – примерно С–Ю). Сейсмогенная зона в области наибольшего сгущения очагов характеризуется повышенными значениями скорости распространения сейсмических волн. Высокоскоростная область мантии облекается материалом, характеризующимся

пониженной скоростью. Согласно другой работе [Винник, 1980], фокальная зона Вранча находится в «высокоскоростном» мантийном теле, но вблизи контакта с низкоскоростным объемом среды. Это «высокоскоростное» тело прослеживается до глубины 350 км.

8. В Памиро–Гиндукушской зоне большинство гипоцентров землетрясений образуют плотное скопление на глубинах между 70 и 350 км. Очаги коровых землетрясений расположены по глубине от 0 до 40 км. Коровая и мантийная области сейсмичности отделены друг от друга почти асейсмичным интервалом глубин 40–70 км. Максимальные глубины очагов под Гиндукушем – 300–350 км. В целом сейсмофокальная зона ориентирована аструктурно по отношению к Памиру.

9. К числу гнездовых зон, по [Zarifi, Havskov, 2003], отнесена зона Букараманга в Южной Америке.

В ходе обобщения данных был сделан вывод [Шевченко и др., 2011], что противоречия между тектоническими схемами и надежными результатами геологических исследований в ряде случаев объяснены локализованными сейсмическими образованиями – глубинными каналами поступления флюидов и дополнительного минерального материала из низов коры и/или верхов мантии.

Поскольку объектами рассмотрения в работе [Шевченко и др., 2011] служили в основном крупные сейсмогенные зоны, нужно признать, что флюид – это составляющая сейсмического процесса. Ранее устойчивым предвестником сейсмического события считалось резкое увеличение газа (перед Салаутаским землетрясением в Дагестане [Осика, 1981] и на Курильских островах [Монахов, Хантаев, 1983]). Также вертикальные области очагов землетрясений с глубиной 0–20 км выделены в зоне трансформного разлома Мертвого моря, при этом привязать их к конкретным разрывным нарушениям не удалось [Омар и др., 2012]. Эти области могут быть определены как «трубы дегазации», по П.Н. Кропоткину.

В работе [Захаров, Карпенко, 2012] проведен анализ возможной связи сейсмических «гвоздей» с разрывными нарушениями и сейсмичностью вулканических дуг. Для наглядности полученные результаты из этой работы были сведены в таблицу (см. таблицу). Из приведенных в ней данных следует, что у землетрясений в изученных районах отсутствует явная связь с разломами. В статье [Федотов, 2006] основными причинами подъема магмы названы следующие: подъем расплавленного слоя по

механизму зонного плавления, вскипания магм (выделение содержащихся в них газов); тектоническое давление; избыточное давление, возникающее из-за увеличения объема при

Таблица

### Характеристики сейсмических событий

Район и координаты землетрясения	Магнитуда ( $m_b$ )	Время образования	Глубина (км)	Возможная природа и положение по отношению к тектоническим структурам
1	2	3	4	5
Район вулкана Св. Елены, Каскадия 46,2°с.ш., 122,2°з.д.	$m_b = 5$	03–05.1980	0–15	Вулканическая дуга зоны субдукции. Совпадение по времени с извержением вулкана.
Район вулкана Коло, о. Сулавеси. 0,3°с.ш., 121,8°в.д.	$m_b \geq 5$	06.1983	20–90	Вулканическая дуга зоны субдукции. Совпадение по времени с извержением вулкана.
Район вулкана Карымского Камчатка 53,9°с.ш., 159,4°в.д.	$M_L \geq 5$	1996	0–60	Вулканическая дуга зоны субдукции. Совпадение по времени с Карымским землетрясением 1.01.1996 г.
Район Южной Камчатки 52,3°с.ш., 157,9°в.д.	$M_L = 5.3$	03.1983	0–20	Рядом недействующие вулканы. Во время образования произошло землетрясение, $M_L = 5.3$
Южная Камчатка. Район Олюторского землетрясения	$M_S = 7.7$	04.2006	–	Район Олюторского землетрясения 21.04.2006 г.
О. Кадьяк, Аляска. 57,3°с.ш., 154,3°з.д.	1- $m_b = 6.8$ 2- $m_b = 6.5$ 3- $m_b = 6.3$	12.1996 07.2000	0–70	Аккреционная призма Алеутской зоны субдукции. Три активизации на глубинах: 1 – 66 км; 2 – 40 км; 3 – 43 км
О. Хоккайдо 43,5°с.ш., 143,0°в.д.	$M_{JMA} \leq 5$	03–04.1989	0-40	Вулканическая дуга зоны субдукции. Эпицентры не связаны с разломами.
Южнее о. Хонсю, перед желобом Нанкай 33,2°с.ш., 138,6°в.д.	$M_{JMA} = 6.6$ $M_{JMA} = 6.0$ $M_{JMA} \leq 5.0$	09–10.1990	30-80	Эпицентр подводная гора. Формирование при землетрясениях $M_{JMA} = 6.6$ (H = 60 км); $M_{JMA} = 6.0$ (H = 42 км). Остальные при $M_{JMA} \leq 5.0$
Южнее о. Хонсю, за вулканической дугой Изу-Бонин 33,7°с.ш., 139,4°в.д.	$M_{JMA} \leq 4.2$	10.1990	0-35	Зона субдукции.
Иньо, Калифорния 35,7° – 36,2°с.ш., 117,5° – 118°з.д.	$M_L = 5.0$	09.1984 02.1992 07.2001 07.1995	0–7; 0–9; 0–16; 0–11	Четыре вертикальные области. Приуроченность к разломам не очевидна.
Кальдера Лонг Вели, Калифорния. 37,6° – 37,8°с.ш.,	$M_L = 4.8$	1984 1990 1991	0–10	Четыре вертикальные области находятся в кальдере и возможно связаны с гидротермальным

118,8° – 119°з.д.		1996– 1998		процессом.
-------------------	--	---------------	--	------------

плавлении; плавучесть магм. При анализе этих причин для земной коры предпочтительным названо вскипание магмы. Со ссылкой на работу [Кадик, 1974] в той же статье [Федотов, 2006] приводятся данные о повышении глубины вскипания магмы с увеличением содержания углекислоты (приблизительно с 3 вес. % H<sub>2</sub>O и 5 вес. % CO<sub>2</sub> кипение основных магм должно начаться на глубинах 10–25 км). По мнению Х. Раства (1982), вулканические газы должны рассматриваться в качестве причины, приводящей в движение сам механизм извержения. При этом не существует определенных соотношений между составом газов. Состав газов от одной вулканической области к другой часто меняется и может колебаться даже для отдельного вулкана [Раст, 1982]. Таким образом, критичным является не состав газов, а присутствие самой газовой фазы флюида.

Вулканизм, как и землетрясения наблюдается в земной коре континентального и океанического типов. Различие распределения  $k(h)=V_p/V_s$  в консолидированной коре палеозойских и докембрийских платформ (рис. 1) отражает эволюционное развитие земной коры [Булин, 1982; Егоркин, 1996]. Отрицательный угол наклона графиков  $V_p/V_s$  для фанерозойских структур (уменьшение значений  $V_p/V_s$  с глубиной) может интерпретироваться как увеличение газовой фазы с увеличением глубин, где процесс дегазации непосредственно связан с нижними горизонтами коры. Очевидно, что более высокая газонасыщенность глубинных слоев земной коры должна проявляться в осадочном чехле. На рис. 2 проиллюстрировано изменение газонасыщенности по разрезу осадочного чехла Западно-Сибирской плиты и Восточно-Европейской платформы. Для одних и тех же глубин газонасыщенность в разрезе Западной Сибири существенно больше.

На рис. 3 показано распределение очагов землетрясений в Индо–Памиро–Тянь-Шанском регионе. Картина горизонтального распределения изолиний плотности очагов в интервале глубин приблизительно 20–40 км может служить как подтверждение возможного присутствия флюида. Следует отметить сходство этой картины распределения плотности очагов землетрясений с геологическими разрезами, проходящими через месторождения с многопластовыми залежами углеводородов (например, с залежью газа на месторождении Лак, рис. 4).

При выявлении вероятных факторов землетрясений особое место занимает рассмотрение химического и изотопного составов природных газов землетрясений, происходящих при заполнении водохранилищ [Войтов и др., 1984]. При землетрясениях в период заполнения водохранилища Чиркейской ГЭС (Восточный Кавказ), к примеру, было установлено, что изотопный состав природных газов отвечает глубинам тектонических землетрясений. Это привело к выводу о том, что корни наведенной и тектонической сейсмичности для Восточного Кавказа лежат в одном интервале глубин. Соответственно, обоснована второстепенная роль упругих деформаций вследствие дополнительных нагрузок на грунт из-за наличия инженерных сооружений.

Интересные данные по геохимическим признакам активизации глубинных процессов приведены в работе [Бабешко и др., 2005]. В ходе кластерного анализа содержания химических компонентов в грунтовых водах выявлена близкая связь между магнитудой сейсмических толчков и содержанием кремниевой кислоты, магния, углекислого газа, ртути и углеводородных газов. При этом углеводородные газы по корреляционной матрице очень тесно связаны с тяжелыми металлами – Cu (K=43), Fe (K=67), Mn (K=45), Pb (K=43), а по результатам кластерного анализа – с глубиной и магнитудой подземных толчков. Периоды «ураганного» содержания химических компонентов наблюдаются до и после землетрясений и других катастрофических явлений в Краснодарском крае.

Предвестниками горных ударов и землетрясений являются вариации концентрации газов радиогенной природы: гелия (He), аргона (Ar), торона (Tn) и радона (Rn) [Уломов, Мавашев, 1967]. Результаты расчета пространственно-временных характеристик области разрушения по аномалиям концентрации Rn показали, что значения скорости фильтрации Rn превышают скорости фильтрации для жидких флюидов [Беликов, Шестаков, 2007]. Это объясняется тем, что миграция Rn из области разрушения происходит в газообразной фазе. Дополнительным подтверждением служит близость полученной величины коэффициента диффузии Rn во флюиде  $D \approx 8,5 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  с его значением в воздухе  $D = 1 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ . Другим результатом этой работы было доказательство того, что в результате разрушения последний попадает в проницаемое пространство из изолированных пор с повышенным по сравнению с вмещающей средой содержанием радона. Следовательно, содержание газа в породе больше, чем предполагалось ранее.

Транспорт радона по горной породе осуществляется благодаря механизмам диффузного и конвективного переноса. Конвективному переносу присуща большая скорость, по экспериментальным данным ее максимальное значение в песчано-глинистых средах колеблется в пределах 40–60 см/сут. За три периода полураспада концентрация радона успевает упасть практически на порядок [Баранов, 1956].

Постоянное присутствие радона в почве зон тектонической активности может быть объяснено, исходя из результатов, изложенных в статье [Соболев и др., 2012]. Согласно этим данным, в зеркалах скольжения отсутствует кварц, повсеместно распространенный в окружающей породе. Как известно, атомы урана хорошо переносятся в составе кремнезема. Отсюда, можно предполагать присутствие глубинного источника появления радона в верхних горизонтах земной коры за счет миграции кремнезема. Миграцию радиоактивных элементов в период подготовки землетрясения подтверждают данные мониторинга в Газли (рис. 5).

В свою очередь, перенос радона в приповерхностные слои грунта и приземную атмосферу осуществляется пузырьковыми образованиями только двух летучих газов – водорода и метана. Присутствие повышенных концентраций радона в грунте и атмосфере свидетельствует о наличии зоны дегазации метана или водорода [Шулейкин, 2013].

В условиях высоких давлений и температур кремнезем обладает способностью замещать органическое вещество при гидрофобизации глинистых пород, образуя с ним и металлами устойчивые комплексы и даже минералы [Маевский и др., 1993]. В то же время, наблюдается и обратное явление, когда уже углерод меняет химический состав глинистых минералов (каолина) в водной среде с участием серы и с образованием углеводородов. Это объясняется тем, что у C ( $2p^2$ ) и Si ( $3p^2$ ) одинаковая электронная конфигурация, но энергия связи у C в кислородном тетраэдре (256 ккал/моль) намного больше, чем у Si (190 ккал/моль) [Стенина, 2003]. Каолин образуется в сдвиговых разрывных нарушениях и относится к основным минералам и зонам гидротермального преобразования пород. Таким образом, процесс неупругих деформаций геологической среды непосредственно связан с преобразованием минерального состава горных пород.

Возможным процессом накопления упругой энергии, связанным с газообразной фазой флюида, является блокирование дислокаций (протонация геосреды) атомами легких газов водорода и гелия [Гуфельд, 2007; 2013]. В этих работах обосновывается механизм сейсмичности, обусловленный взаимодействием газов с горными породами, приводящий

к периодической блокировке движений тектонических блоков. Три основных процесса, предопределяют неустойчивость литосферы при прохождении через нее легких газов: формирование пористости с высоким внутренним давлением газов; междузельная диффузия, фазовые переходы по высокотемпературному типу в присутствии гелия.

Захват гелия и водорода дефектами структуры существенно ограничивает их подвижность. При миграции по вакансионному механизму коэффициенты диффузии составляют  $10^{-13}$ – $10^{-15}$  см<sup>2</sup>/сек и меньше в широком диапазоне температур. Восходящая диффузия водорода и гелия реализуется по схеме «твердое тело – флюид – твердое тело», сопровождаясь термическими процессами блокировки зон миграции. Постепенно дефектные места (дислокации, вакансии, дефекты упаковки и др.) занимаются водородом, и его миграция будет осуществляться только между узлами кристаллической решетки. Поэтому основным препятствием для движения потока будут уже занятые водородом дефектные структуры и элементы текстурной деформации. Эффект блокирования атомами водорода дислокаций в породе служит возможным фактором ее упрочнения. Водород начнет накапливаться в междоузлиях и свободных дефектах структуры, вызывая структурные напряжения, что может обеспечивать латеральное распространение флюида, например, в зоне волновода и способствовать образованию пластов, линз, блоков с повышенным газосодержанием и, соответственно, с низкими значениями  $V_p/V_s$ . Эта модель объясняет горизонтальное распределение очагов в интервале глубин 8–14 км.

Наиболее значительные аномалии гелия выделены в океане. Они имеют размеры в сотни и тысячи квадратных километров. Интенсивные экранированные аномалии гелия зафиксированы на многих месторождения углеводородов, часть из них являются крупными месторождениями гелия (Хьюгтон-Пенхэндл – в США, Гронинген – в Нидерландах, Оренбургское, ряд месторождений нефти и гелия в Западной Сибири).

Еще одной причиной горизонтального расположения очагов землетрясений следует назвать заполнение газообразным флюидом деформационно ослабленных горизонтов земной коры. На рис. 6 показан разрез МОВЗ Аксай–Дургели [Кадурин и др., 2013], на котором видно, что достаточно значительное число очагов расположено вдоль горизонтальной плоскости. Этими авторами было отмечено, что имеет место тесная связь очагов землетрясений с наклонными плоскостями смещения, когда в контакте с ними или под ними выделяются локальные изометричные блоки или куполовидные структуры с аномальными свойствами. В данном случае под областью очагов находится сейсмически



прозрачный блок. В экспериментальных исследованиях [Ставрогин, Тарасов, 2001] показано, что различие акустической прозрачности между разрушающимся объемом и нагружающей системой существенно влияет на перераспределение упругой энергии. Уменьшение акустической прозрачности границ создает препятствие для оттока энергии из зоны разрушения. Сейсмические области прозрачности, как правило, соответствуют интрузивным массивам, зонам гидротермально-метасоматически измененных пород, залежам углеводородов [Кузин, 1999; 2012], т.е. геологическим телам и процессам, прямо или косвенно связанным с газообразной фазой флюида.

О масштабах дегазации свидетельствуют результаты сейсмологического мониторинга  $V_p/V_s$  в акватории Тихого океана около Камчатского полуострова (Л.Б. Славина, 2011 г.). На площади в сотни квадратных километров наблюдается рост аномалии пониженных значений  $V_p/V_s$ .

В тектонике региональные вихревые структуры стали известны с середины прошлого века. Кольцевые и вихревые структуры генетически связываются с восходящей миграцией флюидных потоков. Они были выделены в различных тектонических провинциях. Наряду с вертикальной траекторией очагов землетрясений, наблюдается ее вихревой характер при современных крупнейших сейсмических событиях. Вращательные движения очагов отмечались для Крымского (1927), Ашхабадского (1948), Спитакского (1988) землетрясений. Анализ пространственного расположения максимумов плотности очагов землетрясений в Ашхабадском сейсмоопасном районе [Полетаев, 2009] показал миграцию максимумов по горизонтали и вертикали (рис. 7): от Бахарденского максимума – на юго-запад, далее – на широте Боржнурда – резкий поворот на восток, а по вертикали – от глубин очагов 41–70 км (в районе Бахардена) до 21–40 км (западнее Боржнурда) и 0–10 км (восточнее Боржнурда). В Гиндукушской части фокальной зоны с субширотным простиранием индивидуальные оси укорочения в очагах (в интервале глубин 0–200 км) ориентированы по диагонали (СЗ–ЮВ) относительно простирания зоны, а оси удлинения субвертикальны, что отвечает надвиговому типу деформирования. По мере перехода от поверхности к более глубоким горизонтам происходит плавный разворот субгоризонтальной оси укорочения (сжатия), от  $114^\circ$  до  $182^\circ$ . Для самого глубокого интервала глубин (200–350 км) субгоризонтальная ось сжатия тензора сеймотектонической деформации оказывается ориентированной субмеридионально [Шевченко и др., 2011].

В зонах вертикальных разрывных нарушений осадочного комплекса пород в последние годы были установлены вихревые структуры. В работе [Гринь Н., Гринь Д., 2008] приведен пример такой вихревой структуры на Черноморском шельфе, выделенной по данным МОГТ (рис. 8).

Фактические данные охватывают подавляющую часть сейсмоактивных районов мира. Это позволяет утверждать, что флюидный фактор в сейсмичности не менее значим, чем тектонический (геодинамический), и это согласуется с результатами изучения изотопного состава природных газов сейсмических событий [Войтов и др., 1984].

#### О РОЛИ ВОДЫ В СПУСКОВОМ МЕХАНИЗМЕ ДИССИПАЦИИ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ

По данным исследований [Гречухин и др., 1995], влажность выбросоопасных песчаников в два раза меньше, чем невыбросоопасных. Вода характеризуется двумя фундаментальными свойствами, позволяющими ей играть главную роль в коровой сейсмичности, это – сочетание большой по величине диэлектрической проницаемости и на порядок большей сжимаемости по отношению к горным породам. В отличие от газа вода обладает в десятки раз большей диэлектрической постоянной, за счет этого она проникает в кристаллическую решетку минералов и способствует разрушению горной породы без приложения внешнего напряжения. Эффект уменьшения прочности твердого тела в результате адсорбции, хемосорбции, смачивания и других физико-химических взаимодействий (эффект П.А. Ребиндера) установлен для твердых тел разного состава. Этот эффект вызван уменьшением свободной поверхностной энергии на границе жидкости и твердого тела. В механизмах понижения прочности могут реализоваться два типа влияния влаги [Траскин, Скворцова, 2006]. Первый связан с трещинно-пористым пространством, в котором внедрение жидкости создает концентраторы напряжений. Второй является универсальным, всегда присутствующим в горных породах, это – межзеренные границы. Как показали экспериментальные исследования, инъекция малого по сравнению с объемом модели количества воды в область активных трещин приводит к резкой активизации акустической эмиссии. Форма сейсмограмм и графики повторяемости акустических сигналов, зарегистрированных до и после инъекции воды, почти не различаются, что свидетельствует о триггерной природе эффекта [Соболев и др., 2006]. Исследование возбужденной сейсмичности в районе плотины Нурекской ГЭС показывает, что проникновение воды в земную кору увеличивает как количество слабых, так и относительно сильных землетрясений [Мирзоев и др., 2010].

В работе [Барабанов, 2014] приведены результаты оригинальных лабораторных экспериментов с кернами различных осадочных пород, различающимися по проницаемости приблизительно на два порядка. Особенность экспериментов – существенно более значительная длительность по сравнению с всеми ранее проведенными опытами. В результате было обнаружено, что после стадии резкого снижения скорости пропитки и кажущегося выхода кривой насыщенности на асимптоту наступает стадия резкого возрастания скорости пропитки до достижения нового максимума. Причина такого эффекта пока не совсем понятна, возможно, определенную роль здесь играют совместное воздействие высокой диэлектрической проницаемости воды и горных пород осадочного происхождения, задействованных в эксперименте.

В работах Ф.А. Летникова главная роль миграции мантийных флюидов отводится зонам милонитизации. Вдоль плоскостей расщепления обеспечивается универсальный и интенсивный массоперенос флюидных, петрогенных, рудных компонентов и углеводородов [Летников, 1986; 2000]. Считается, что в мантии может находиться до пяти объемов воды мирового океана. Высокие концентрации воды сосредоточены в интервале глубин 410–660 км [Артюшков, 2012]. Для давлений порядка 22 кбар ( $H \approx 50\text{--}70$  км) энергетически выгодным становится вхождение воды в кристаллическую решетку минералов [Адушкин, Родионов, 2005]. Возможно, перенасыщение среды ионами OH в зонах (узлах) напряжений может приводить к возникновению сейсмичности.

Накопилось значительное число фактов о взаимосвязи между сейсмическими событиями и изменением уровня воды в мировом океане, в закрытых, континентальных бассейнах, уровня грунтовых вод [Добровольский, 2009; Уломов, 2007]. Наиболее вероятными процессами, способствующими инфильтрации, считаются метаморфическая дегидратация и тектоническая деформация [Киссин, 2009]. При этом предпочтение отдается дегидратации, так как при дегидратации уменьшается объем скелета породы [Маракушев, 1968]. При глубинах очагов приблизительно 10–14 км, возможно, вода поступает за счет дегидратации при выделении тепла в процессе неупругого деформирования водосодержащих пород [Йодер, 1979].

Наиболее полная классификация моделей нисходящей миграции и характеристика механизмов ее возникновения приведены в работе [Абукова, 2007]: 1 – вакуум в момент трещинообразования; 2 – дефицит давления при изменении геодинамической обстановки; 3 – дефицит давления за счет определенного изменения температуры; 4 – дефицит

давления при восходящих движениях тектонических блоков; 5 – дефицит давления при изменении структуры порового пространства; 6 – дефицит давления при газлифте; 7 – гидратация базитов; 8 – плотностная конвекция.

Однако более общим механизмом, обеспечивающим инфильтрацию, могут являться тектонические волны напряжений. В.В. Богацким еще в 70–е годы прошлого века был разработан и успешно использован для прогноза месторождений полезных ископаемых подход, основанный на выявлении зон интерференции падающих и отраженных от поверхности земли тектонических волн [Богацкий, 1986]. Действительно, трудно каким-либо другим явлением объяснить образование многокилометровых горизонтальных зон трещиноватости, секущих различные по литологии комплексы пород и залегающих на различных глубинных уровнях.

В работе [Аптикаева, 2012] высказано предположение о связи скорости вращения Земли с заглубленными очагами на Гармском полигоне. Было обращено внимание на неравномерность распределения землетрясений, локализованных на разных глубинах как в ослабленных зонах, так и в консолидированных блоках. Уменьшение скорости вращения Земли совпадает с ростом относительного числа землетрясений с глубинами гипоцентров 14 км, при увеличении скорости вращения их число уменьшается. Процесс разрушения перемычек идет сверху вниз. В эту схему укладывается Хаитское землетрясение 1949 г. Возможно, это еще один механизм, обеспечивающий инфильтрацию воды.

Подобие функционирования различных по масштабу и специализации геологических процессов ярко проявляется в общих элементах тектонического строения, таких, как разрывные нарушения. В ходе комплексных геотермических исследований разрывных нарушений в нефтегазоносных районах Прикаспийской впадины, Дагестана и южного склона вала Карпинского было установлено [Сардаров, 1989] следующее. Существование конвективных ячеек, охватывающих весь разлом, невозможно. Интенсивная конвекция может иметь место преимущественно в зонах разрывных нарушений глубокого заложения. Необходимо отметить, что неравномерностью распределения конвекционных ячеек по площади во многом можно объяснить различный характер графиков вариаций дебита подземных вод как предвестников землетрясений. Следовательно, система мониторинга дебита воды должна опираться на схему глубинного строения разрывной тектоники.

Помимо этого в работе [Сардаров, 1989] было выявлено отличие в тепловом поле тектонических блоков, содержащих нефть. Сравнение геотермических данных по нефтеносным блокам и блокам, не содержащим залежи, показало, что первые представляют собой сочетание изометричных областей повышенных и пониженных значений теплового потока, вторым свойственна однородность геотемператур и геотермических потоков. Это указывает на присутствие конвекции в нефтеносных районах.

Конвекция воды отмечена перед Ашхабадским землетрясением (1948 г.). В радиусе до 90 км от эпицентра наблюдалось понижение уровня грунтовых вод. Установлен факт миграции «волны» аномального снижения уровня грунтовых вод со скоростью 5 км/с в сторону эпицентра землетрясения. Снижение уровня грунтовых вод сопровождалось аномальным понижением температуры (на 2,5–2,8 °С) [Милькис, 1984].

Одним из необходимых условий образования вулканизма является наличие в областях тектонической активизации зон пониженных литостатических давлений, в которые поступает вода, что может рассматриваться как проявление конвекции. По данным, приведенным в работе [Федотов, 2006], конвективный тепловой поток вулканов Камчатки, отнесенный к площади кальдеры, составляет  $(100 \pm 50) \times 10^{-6}$  кал/см в сек. При среднем диаметре верхней части питающих каналов (300 м) соотношение площадей верхних и нижних сечений будет равным 1:4500. Это соотношение, помимо концентрации теплового потока, возрастания скорости магмы, концентрации летучих, также косвенно характеризует размеры области относительно пониженных литостатических давлений. Следует отметить, что область относительно пониженных литостатических давлений была выделена на нефтяном месторождении Тенгиз, она прослеживается до глубин 15–18 км [Гарагаш и др., 1992].

На примере вулканических островов Атлантического и Тихого океанов при изучении современных проявлений конвекции водных растворов было показано, что низкие значения ( $O^{18}$ ) могут быть объяснены высокотемпературным ( $> 400$  °С) обменом при очень высоких соотношениях в системе океаническая вода–порода в процессе взаимодействия расплава с водой [Виноградов, 2002]. В качестве примера в этой работе приводится вулкан Аскья (Исландия), где в кислых ксенолитах были получены низкие значения  $O^{18}$  (до  $-7 \div -10$  ‰). Опускание этого острова со скоростью около 1 км/млн лет позволяет предположить, что, измененные породы могут опускаться до глубины

приблизительно 25 км, что, в свою очередь, объясняет образование кислых пород вулкана Крабла (Исландия). По данным той же работы, интервал внедрения морской воды в глубину островов может достигать 150 км, вертикальное проникновение атмосферных и морских вод оценивается величиной 5–10 км.

Высокие значения отношения вода/порода, значительные расстояния проникновения океанской и поверхностных вод предполагают присутствие горизонтальных и субгоризонтальных каналов фильтрации. Для вулканических островов такими каналами, в первую очередь, могут быть разрывные нарушения, в общем случае определяемые как зоны инверсии упругих свойств. В работах [Гуфельд, 2007; Киссин, 2009] существенное значение придается именно этому виду разрывных нарушений. Считается, что в них накапливается основной объем флюидов перед сейсмическим событием.

Гидрофильность и гидрофобность поровых каналов может приводить к тому, что течение газовой и жидкой фаз осуществляется по разным системам пор и трещин. Жидкая фаза фильтруется по тонким трещинам, газовая – по более крупным [Эфрос, 1963]. По тонким трещинам происходит инфильтрация воды, по относительно более крупным – подъем газовой фазы. Следовательно, модель сейсмического процесса в земной коре должна включать раздельное и общее влияние на среду флюидных фаз, газообразная фаза отвечает за накопление упругой энергии, жидкая – за ее диссипацию. Следует отметить, что это предопределяет необходимость проведения многоволновых сейсмических наблюдений. Фактические данные подтверждают различные функции жидкой и газообразной фаз флюида в организации сейсмического процесса. Можно представить следующий сценарий участия флюида в сейсмическом процессе. Газообразная фаза, заполняя поры и трещины, обеспечивает накопление упругой энергии и импульсный характер ее выделения. Именно газовая составляющая дегазации Земли формирует энергетический «заряд» и пространственное «постоянство» сейсмичности. Возможен также сценарий, когда в области будущего очага помимо газа начнет накапливаться вода, тогда возникновение сейсмического события будет определяться внутренними факторами.

Жидкая фаза создает гидравлическую связь между целиками массива пород, передает аномально высокое давление в вышележающие горизонты и в то же время уменьшает сцепление на контакте отдельных зерен, увеличивая вероятность проскальзывания. В общем случае тектоническая активизация меняет баланс между

газообразной и жидкой фазами флюида на определенных глубинных уровнях земной коры и может привести к сейсмическому событию.

Противоположная картина наклона графиков  $V_p/V_s$  для докембрийских платформ (см. рис. 1б) дает основание для их интерпретации как завершения процесса смены состава флюидной фазы с газообразной на преимущественно жидкую в нижней части коры. Это находит подтверждение в результатах лабораторных измерений  $V_p$  на образцах под давлением [Минц и др., 1987]. Приращение  $V_p$  при водонасыщении образцов не фиксируется до глубины 4.5 км (в скважине СГ-3), а затем возрастает до 33% для амфиболитов и до 57% – для гнейсовидных плагигранитов в фундаменте Печенгской депрессии. Максимальный эффект наблюдается в породах, обогащенных кварцем. В нижней части коры докембрийских платформ увеличение  $V_p/V_s$  с глубиной должно быть связано с водонасыщением, при котором происходит переход свободной воды в физически и химически связанную (например, процесс серпентинизации).

Увеличение сейсмичности и параметра  $V_p/V_s$  (относительное увеличение  $V_p$ ) отмечено в сезон дождей [Rodkin, Mandal, 2012]. По данным анализа сейсмотомографических разрезов в очаговых зонах сильных землетрясений вблизи разломов были выделены «карманы» пониженных значений  $V_p$ , достигающие глубин порядка 15 км [Арефьев и др., 2006]. Эти аномалии  $V_p$ , вероятно, могут являться зонами инфильтрации воды и ее растворов. В инженерной сейсморазведке используется  $V_p/V_s$  для оценки прочностных свойств грунтов, особенно, водонасыщенных.  $V_p/V_s$  однозначно определяет динамический коэффициент Пуассона.

В водонасыщенных грунтах происходит резкое уменьшение значения угла внутреннего трения  $f$ , для сухих песков  $V_p/V_s = 1.5–2.0$  и  $f = 20–25$  Гц, в водонасыщенных –  $V_p/V_s = 10–15$  и  $f = 10–15$  [Миндель, Трифионов, 1993]. Это может означать, что сейсмический процесс начинается на границе относительно пониженных значений скорости, другими словами, на границе разнотупругих сред. Ранее вывод о протекании сейсмического процесса на границе разнотупругих сред, с позиции флюидодинамики и геомеханики, был обоснован в работах [Ребецкий, 2006; Родкин, 2006].

В описываемую модель взаимодействия жидкой и газообразной фаз флюида вписывается процесс образования алмазов. Формирование алмазов определяется высоким уровнем восстановленности и минимальным соотношением водорода к углероду. Вода является единственным возможным растворителем для алмаза. Поэтому для их

сохранности необходим быстрый, со скоростью более 1 м/сек, подъем магмы. В работе [Малов, 2003] предложена модель образования алмазов – месторождение им. Ломоносова в Архангельской области. В этой модели сохранение алмазов обеспечивается за счет испарения подземных вод инфильтрационного происхождения в вендском базальном горизонте осадочного чехла. Образование трубки взрыва обеспечивается за счет испарения воды, при котором ее объем увеличивается в 7 раз. Эта модель согласуется с гипотезой гидровулканического образования алмазов [Lorenz, 1984] за счет быстрого подъема «сухого» магматического расплава через породы консолидированной коры и быстрого прорыва им осадочного чехла с достаточным для сохранения алмазов охлаждением расплава подземными водами.

Однако не находит объяснение отсутствие следов термального воздействия на контактах трубок взрыва с вмещающей средой, а также полная серпентинизация кимберлита. В работе [Малов, 2003] отсутствие зоны измененных пород на контакте объясняется большим количеством воды, охлаждающей расплав, что выглядит не совсем убедительным. Трудно представить, что при снижении температуры на 700–900 °С, давлении 22,5 МПа и при огромной агрессивности воды не образуется, пусть даже незначительная, зона измененных пород.

Если исходить из общей модели взаимодействия различных фаз флюида, механизм образования алмазоносной трубки взрыва можно представить следующим образом. Процесс внедрения магмы начинается с восходящей миграции легких газов, водорода и гелия. Они деформируют и разрушают кристаллическую решетку минералов вмещающих горных пород, создавая благоприятную обстановку для инфильтрации воды. Диэлектрическая проницаемость воды при 20 °С – 80,1; при 100 °С – 56. Поэтому дальнейшая деформация идет за счет воды, область разрушения пород растет сверху вниз. При достижении критического давления в магматической камере происходит прорыв, по сути, по сформированной уже траектории за счет протонации и большой диэлектрической проницаемости воды.

#### ОБ ОБЩЕМ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

В общем виде модель, основанная на различии воздействия флюида в газообразной и жидкой фазах, была предложена в работах [Кузин, 2013; 2014]. Жидкая фаза флюида (вода) обеспечивает снижение порогового значения для сейсмического события. Чем



интенсивнее газонасыщение среды при тектонической активизации, тем реальнее сейсмическое событие. Насыщение геологических структур газом ведет к потенциальной сейсмоопасности территорий. В качестве таких примеров можно назвать Кольский п-ов, Кандалакшский грабен, северное и северо-восточное Приазовье. Изучение областей газовыделения, глубинной инфильтрации воды совместно с применением активных и пассивных сейсмических методов может позволить разработать надежные, основанные на физике процесса, прогнозные признаки, а также уменьшить статистическую составляющую в основе оценки прогноза.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

I. Проявления сейсмичности и месторождения флюидного генезиса имеют следующие общие черты. Процессы происходят на границе разнотвердых сред, в более твердой или упругой среде. Газообразный «сухой» флюид определяет накопление избыточной упругой энергии, «водный» флюид – порог ее диссипации. Процессы образования месторождений и сейсмичности являются импульсным откликом на тектоническую активизацию геологической среды.

II. Тектоническая активизация, дегазация, конвекция определяют возникновение сейсмического процесса; образование месторождений полезных ископаемых флюидного генезиса; вулканизм (магматизм).

III. Общие черты в сейсмичности, вулканизме, локализации месторождений полезных ископаемых являются методологической основой для разработки физически обоснованной единой иерархической системы геолого-геофизических исследований (включая полевые наблюдения).

Автор приносит свою признательность Владимиру Александровичу Ракитову за помощь при подготовке данной статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

*Абукова Л.А.* Модели и механизмы нисходящей миграции УВ из осадочного чехла в приподнятые блоки фундамента // Нефтегазовая гидрогеология на современном этапе (теоретические проблемы, региональные модели, практические вопросы). М.: ГЕОС, 2007. С. 191–209.

*Адушкин В.В., Родионов В.Н.* О природе механического движения в недрах Земли // Физика Земли. 2005. № 2. С. 88–91.

*Александров Б.Л.* Аномально-высокие пластовые давления в нефтегазоносных бассейнах. М.: Недра, 1987. 216 с.

*Антикаева О.И.* Особенности миграции очагов слабых землетрясений Гармского района на фоне вариаций скорости вращения Земли // Геологическая среда, минерагенические и сеймотектонические процессы: Материалы XVIII междунар. науч.-практ. конф. 24–29 сентября 2012 г. Воронеж: Научная книга, 2012. С. 21–25.

*Арефьев С.С., Рогожин Е.А., Анкерман Ж.Я., Быкова В.В., Дорбат К.* Глубинная структура и томографическое изображение очаговых зон сильных землетрясений // Физика Земли. 2006. № 6. С. 65–80.

*Артюшков Е.В.* Неотектонические поднятия земной коры на континентах как результат инфильтрации в литосферу большого объема мантийного флюида. // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы Третьей тектонофиз. конф. ИФЗ РАН. М., 2012. Т. 1. С. 30–35.

*Бабешко В.А., Бяков А.Ю., Шереметьев В.М., Круглякова Р.П., Шестопалов В.Л.* Перспективы прогноза землетрясений по комплексу геофизических, геохимических и астрономо-геодезических методов // Геофизика. 2005. № 5. С. 65–68.

*Барabanов В.Л.* Параметры модели противоточной капиллярной пропитки горных пород // Геофизические исследования. 2014. Т. 15, № 1. С. 27–52.

*Баранов В.И.* Радиометрия. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 343 с.

*Беликов В.Т., Шестаков А.Ф.* Определение пространственно-временных характеристик области разрушения с использованием долговременных аномалий концентрации радона // Физика Земли. 2007. № 5. С. 80–87.

*Богацкий В.В.* Механизм формирования структур рудных полей. М.: Недра, 1986. 88 с.

*Булин Н.К.* Слои пониженной скорости сейсмических волн в литосфере океанов // Морская геология и геофизика: Обзор / ВИЭМС. М.: Недра, 1982. 47 с.

*Вадковский В.Н.* Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений – сейсмические «гвозди» // Вестник ОНЗ РАН NZ1001. 2012. // <http://www.onznews.wdcb.ru>

*Винник Л.П.* Неоднородности верхней мантии в районе Вранчской зоны промежуточных землетрясений // Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия. М.: Наука, 1980. С. 41–45.

*Виноградов В.И.* Вертикальная аккреция в свете данных изотопной геохимии // Вертикальная аккреция земной коры: факторы и механизмы: Труды ГИН РАН. М.: Наука, 2002. Вып. 542. С. 356–387.

*Войтов Г.И.* Геодинамические процессы и нестабильности подземных водно-газовых систем // Роль подземной гидросферы в истории Земли. М.: Наука, 1990. С. 91–103.

*Войтов Г.И., Абдувалиев А.К., Абдуллаев А.У., Газалиев И.М., Денисов С.А., Орлова Т.Г., Осика Д.Г.* О некоторых особенностях газового режима подземных вод сейсмически активных областей // Гидродинамические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1984. С. 129–155.

*Воронов А.Н.* Газовые поля подземной гидросферы и их роль в развитии литосферы // Роль подземной гидросферы в истории Земли. М.: Наука, 1990. С. 81–90.

*Гарагаш И.А., Николаевский В.Н., Степанова Г.С.* Миграция и критерии аккумуляции углеводородов в системе тектонических разломов // Доклады РАН. 1992. Т. 324, № 6. С. 1169–1174.

*Грассо Ж.Р., Волан Ф., Фурментро Д., Мори В.* Связь между извлечением углеводородов, локальными техногенными землетрясениями и крупными региональными землетрясениями, на примере Пиренейского района // Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти / Под ред. В. Мори и Д. Фурментро. М.: Мир, 1994. 416 с.

*Гречухин В.В., Бродский П.А., Климов А.А., Козельский И.Т., Козельская В.Т., Воевода Б.И.* Геофизические методы изучения геологии угольных месторождений. М.: Недра, 1995. 477 с.

*Гринь Н.Е., Гринь Д.Н.* Затухание сейсмических волн и прогнозирование путей движения флюидов // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы: Материалы Всерос. конф. М.: ГЕОС, 2008. С. 134–237.

*Гуфельд И.Л.* Возможен ли прогноз сильных коровых землетрясений // Вестник РАН. 2013. Т. 83, № 3. С. 236–245.

*Гуфельд И.Л.* Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: ЦНИИМАШ, 2007. 160 с.

*Добровольский И.П.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с.

*Егоркин А.В.* Многоволновые глубинные сейсмические исследования // Геофизика. 1996. № 4. С. 25–30.

*Захаров В.С., Карпенко А.И.* Сейсмические «гвозди» в различных геодинамических обстановках // Геологическая среда, минерагенические и сеймотектонические процессы: Материалы XVIII междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: Научная книга, 2012. С. 130–135.

*Йодер Х.* Образование базальтовой магмы. М.: Мир, 1979. 237 с.

*Кадик А.А.* Роль воды и углекислоты в образовании и дегазации основных магм // Геодинамика, магмообразование и вулканизм. Петропавловск-Камчатский, 1974. С. 9–16.

*Кадурын И.Н., Коновалов Ю.Ф., Маухин А.В., Недядько В.В., Ракитов В.А.* Развитие идей М.К. Полшкова по изучению строения земной коры сейсмоопасных регионов России методами разведочной геофизики // Геофизика. 2013. № 6. С. 59–64.

*Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2009. 328 с.

*Копничев Ю.Ф.* Вариации поля поглощения поперечных волн перед сильными землетрясениями Северного Тянь-Шаня // Доклады РАН. 1997. Т. 356, № 4. С. 528–532.

*Копничев Ю.Ф., Михайлова Н.Н., Соколова И.Н., Аристова И.Л.* Новые данные о геодинамических процессах в аномальной зоне Северного Тянь-Шаня: возможная подготовка сильного землетрясения // Вестник НЯЦ РК. 2006. Вып. 2. С. 60–69.

*Кузин А.М.* Некоторые особенности интерпретации волновых полей в зонах разрывных нарушений // Геофизика. 1999. № 5. С. 3–15.

*Кузин А.М.* О возможной природе относительно низких значений параметра  $V_p/V_s$  в рудных залежах флюидного генезиса // Геофизика. 2012. № 2. С. 11–17.

*Кузин А.М.* Общие черты – месторождения полезных ископаемых флюидного генезиса, землетрясения // Активные разломы и их значение для оценки сейсмической опасности: современное состояние проблемы: Материалы XIX науч.-практ. конф. с междунар. уч. М., 2014. С. 143–148.

*Кузин А.М.* Сейсмичность – закономерное явление для месторождений полезных ископаемых флюидного генезиса // Материалы Второго Всерос. симпозиума с междунар. уч. и молод. науч. школы, посвящ. памяти академиков Н.А. Логачева и Е.Е. Милановского. Иркутск, 2013. Т. I. С. 186–192.

*Летников Ф.А.* Флюидный режим эндогенных процессов в континентальной литосфере и проблемы металлогении // Проблемы глобальной геодинамики: Материалы теоретического семинара ОГГГТН РАН, 1998–1999 гг. М.: ГЕОС, 2000. 246 с.

*Летников Ф.А., Савельева В.Б., Бальшиев С.О.* Петрология, геохимия и флюидный режим тектонитов. Новосибирск: Наука, 1986. 223 с.

*Маевский Б.И., Левковец В.П., Иванов Ю.П.* Тектоно-флюидодинамический аспект формирования и разрушения залежей углеводородов в Припятско-Днепровском авлакогене // Рифтогенез и нефтегазоносность. М.: Наука, 1993. С. 135–141.

*Малов А.И.* К вопросу о механизме формирования месторождения алмазов им. Ломоносова // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2003. С. 90–95.

*Маракушев А.А.* Термодинамика метаморфической дегидратации минералов. М.: Наука, 1968. 200 с.

*Милькис М.Р.* Гидрогеологические предвестники Ашхабадского землетрясения 1948 года // Гидродинамические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1984. С. 76–95.

*Миндель И.Г., Трифонов Б.А.* Оценка прочности водонасыщенных грунтов по величине отношения скоростей продольных и поперечных волн // Геофизика и современный мир: Тезисы междунар. науч. конф. М., 1993. С. 334.

*Миц М.В., Колпаков Н.И., Ланев В.С., Русанов М.С.* О природе субгоризонтальных сейсмических границ в верхней части земной коры (по данным Кольской сверхглубокой скважины) // Геотектоника. 1987. № 5. С. 62–72.

*Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л.* Способ снятия энергии для предотвращения землетрясений // Триггерные эффекты в геосистемах: Тез. докл. семинара-совещания. М.: ИДГ РАН, 2010. С. 61–62.

*Монахов Ф.И., Хантаев А.М.* Сравнительная характеристика реакции уровня и дебита подземных вод на подготовку землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1983. № 5. С. 100–103.

*Омар Х.М., Татевосян Р.Э., Ребецкий Ю.Л.* Сейсмический режим и механизмы очагов землетрясений Сирии // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докл. третьей Всерос. конф. М.: ИФЗ РАН. 2012. Т. 1. С. 211–117.

*Осика Д.Г.* Флюидный режим сейсмически активных областей. М.: Наука, 1981. 204 с.

*Полетаев А.И.* Некоторые закономерности и особенности планетарной, региональной и локальной сейсмотектоники // Актуальные проблемы региональной геологии и геодинамики: XI Горшковские чтения: Материалы конф., посвящ. 100-летию со дня рождения Г.П. Горшкова (1909–1984) / Под ред. Н.В. Короновского. М., 2009. С. 19–37.

*Раст Х.* Вулканы и вулканизм. М.: Мир, 1982. 344 с.

*Ребецкий Ю.Л.* Дилатансия, поровое давление флюида и новые данные о прочности горных массивов в естественном залегании // Флюиды и геодинамика. М.: Наука, 2006. С. 120–146.

*Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М.* Основы геомеханики. М.: Недра, 1986. 301 с.

*Родкин М.В.* Флюидоморфогенная модель сейсмотектоногенеза // Флюиды и геодинамика. М.: Наука, 2006. С. 181–201.

*Сардаров С.С.* Структуры в гидротермальных системах. М.: Наука, 1989. 151 с.

*Соболев Г.А. (мл.), Пономарев А.В., Кольцов А.В., Круглов А.А., Луцкий В.А., Цывинская Ю.В.* Влияние инъекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 5. С. 608–621.

*Соболев Г.А., Киреевкова С.М., Морозов Ю.А., Смутьская А.И., Веттегрень В.И., Кулик В.Б., Мамалимов Р.И.* Исследование нанокристаллов в зоне динамической подвижки // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы третьей тектонофиз. конф. М.: ИФЗ РАН, 2012. Т. 2. С. 258–260.

*Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г.* Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб.: Наука, 2001. 343 с.

*Стенина Н.Г.* Redox как главный фактор углеводородного потенциала самоорганизующейся минеральной материи // Генезис нефти и газа. М.: ГЕОС, 2003. С. 327–329.

*Траскин В.Ю., Скворцова З.Н.* Эффект Ребиндера в геодинамических процессах // Флюиды и геодинамика. М.: Наука, 2006. 283 с.

*Уломов В.И.* О глобальных изменениях сейсмического режима и уровня водной поверхности Земли // Физика Земли. 2007. № 9. С. 3–17 с.

*Уломов В.М., Мавашев Б.З.* О предвестнике сильного тектонического землетрясения // ДАН СССР. 1967. Т. 176, № 2. С. 319–329.

*Федотов С.А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 455 с.

*Шевченко В.И., Арефьев С.С., Лукк А.А.* Близвертикальные скопления очагов землетрясений, не связанные с тектонической структурой земной коры // Физика Земли. 2011. № 4. С. 16–38.

*Шулейкин В.Н.* Перенос радона в приповерхностные слои грунта и приземную атмосферу // Геофизические процессы и биосфера. 2013. Т. 12, № 2. С. 57–66.

*Щукин Ю.К., Люстих Т.Е.* Геодинамика и сейсмичность // Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР. Сер «Общая геология». 1981. Т. 14. 88 с.

*Эфрос Д.А.* Исследование фильтрации неоднородных систем. Л.: ОНТИЗ, 1963. 351 с.

*Lorenz V.* Explosive volcanism of West Sifel volcanic field, Gemany // Proceeding 3 the Intern. Kimberl. Conf. Elvisier. 1984. P. 299–307.

*Rodkin Mikhail V., Mandal Prantik.* A possible physical mechanism for the unusually long sequence of seismic activity following the 2001 Bhuj Mw7.7 earthquake, Gujarat, India. Tectonophysics. 2012, P. 1–9.

*Zarifi Z., Havskov J.* Characteristics of dense nests of deep and intermediate-depth seismicity // Advances in geophysics. 2003. Vol. 46. P. 237–276.

ПРИЛОЖЕНИЕ

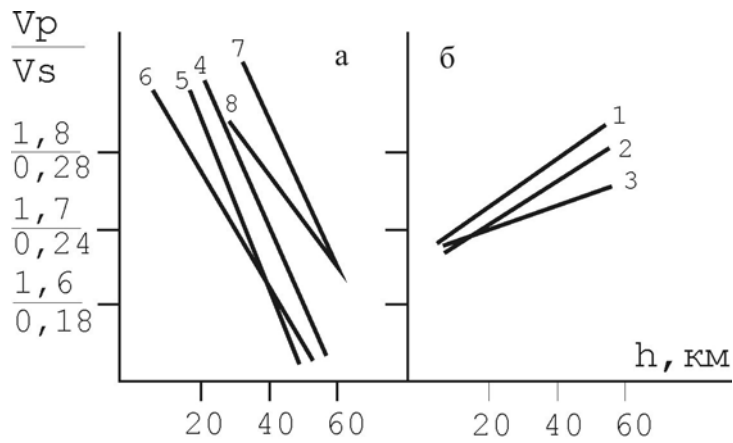


Рис. 1. Графики зависимости отношения средних скоростей продольных и поперечных волн ( $V_{cp}/V_{cs}$ ) от мощности консолидированной коры,  $K(h) = V_{cp}/V_{cs}$  [Егоркин, 1996]: а – для палеозойских платформ; б – для докембрийских платформ

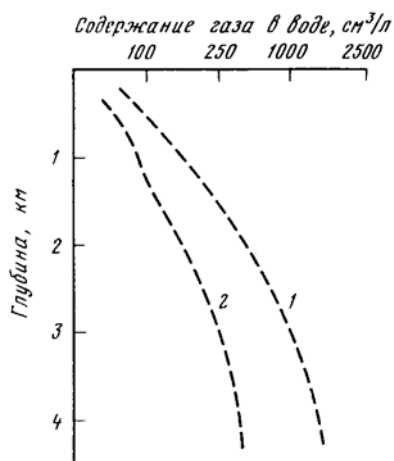


Рис. 2. Характер изменения фоновой газонасыщенности подземных артезианских бассейнов Западной Сибири (1) и Восточно-Европейской платформы (2) [Воронов, 1990]



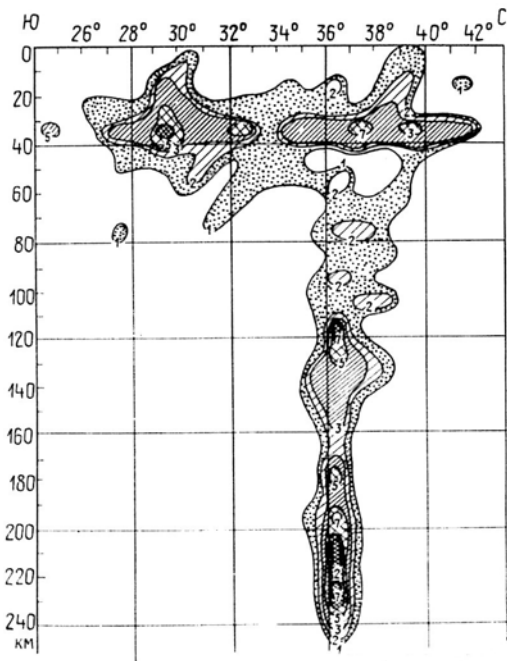


Рис. 3. Распределение плотности очагов землетрясений в литосфере Индо-Памиро-Гималайского региона, согласно [Шукин, Люстих; 1981], с сокращениями



Рис. 4. Вертикальный разрез через залежь газового месторождения Лак. Черными кружками обозначены гипоцентры сейсмических событий, которые ниже залежи, белыми кружками – гипоцентры выше залежи [Грассо и др., 1994]

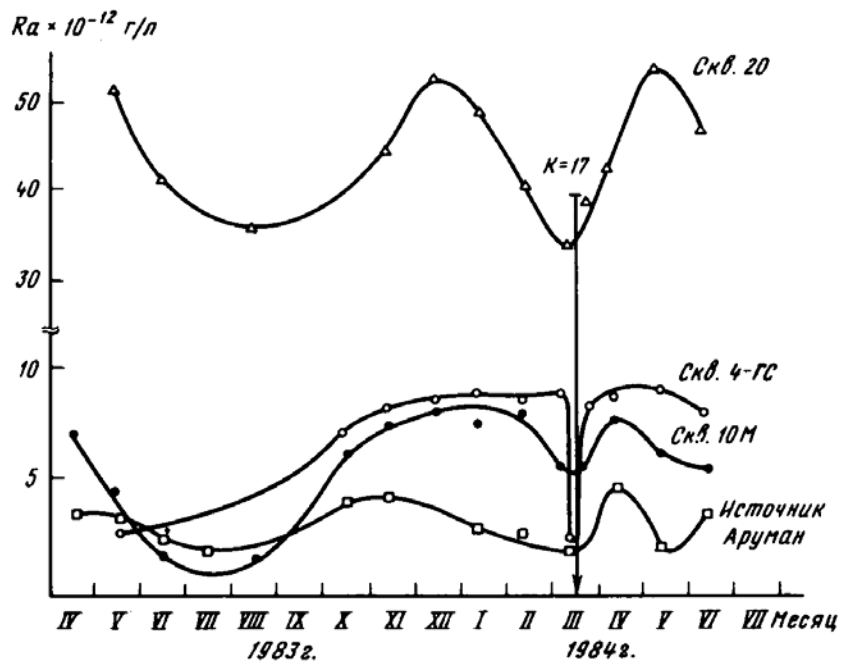


Рис. 5. Особенности хода содержания радия в минеральных водах Предкопетдагского прогиба в период подготовки Газлийского землетрясения 19 марта 1984 года [Войтов, 1990]

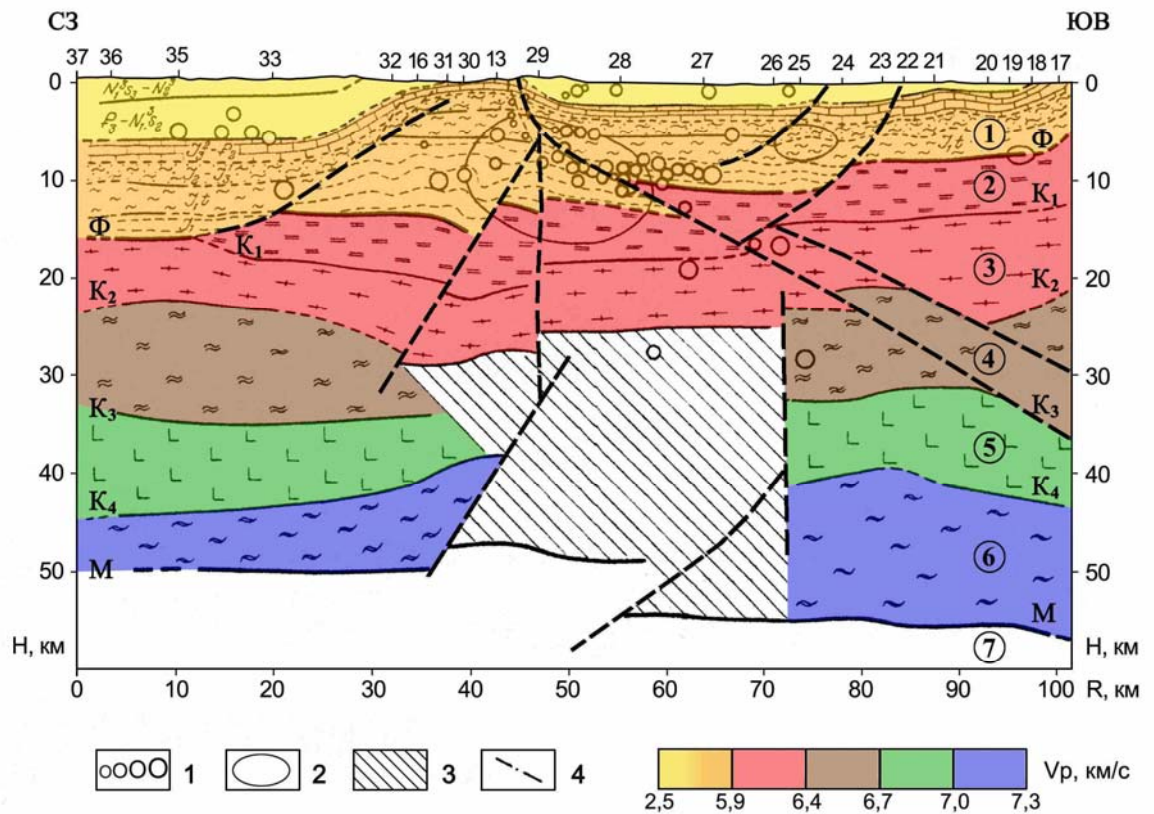


Рис. 6. Глубинный сейсмический разрез земной коры (в очаговой зоне Дагестанского землетрясения 1970 г. с магнитудой  $M=6,6$ ) по профилю Аксай-Дургели по данным МОВЗ  
Условные обозначения:

1 – гипоцентры землетрясений разной магнитуды, 2 – очаговая зона землетрясения 1970 г. по изосейсте 8 баллов, 3 – сейсмически прозрачный блок, 4 – разрывные нарушения.

Цифры в кружках: 1 – осадочный чехол, 2 – метаморфический фундамент, 3 – гранито-гнейсовый слой, 4 – амфиболит-гранулит-диоритовый слой, 5 – гранулит-базитовый слой, 6 – эклогит-серпентинитовый слой (корово-мантийная смесь), 7 – перidotитовый слой [Кадурин, Коновалов, Маухин, Неядько, Ракитов; 2013]

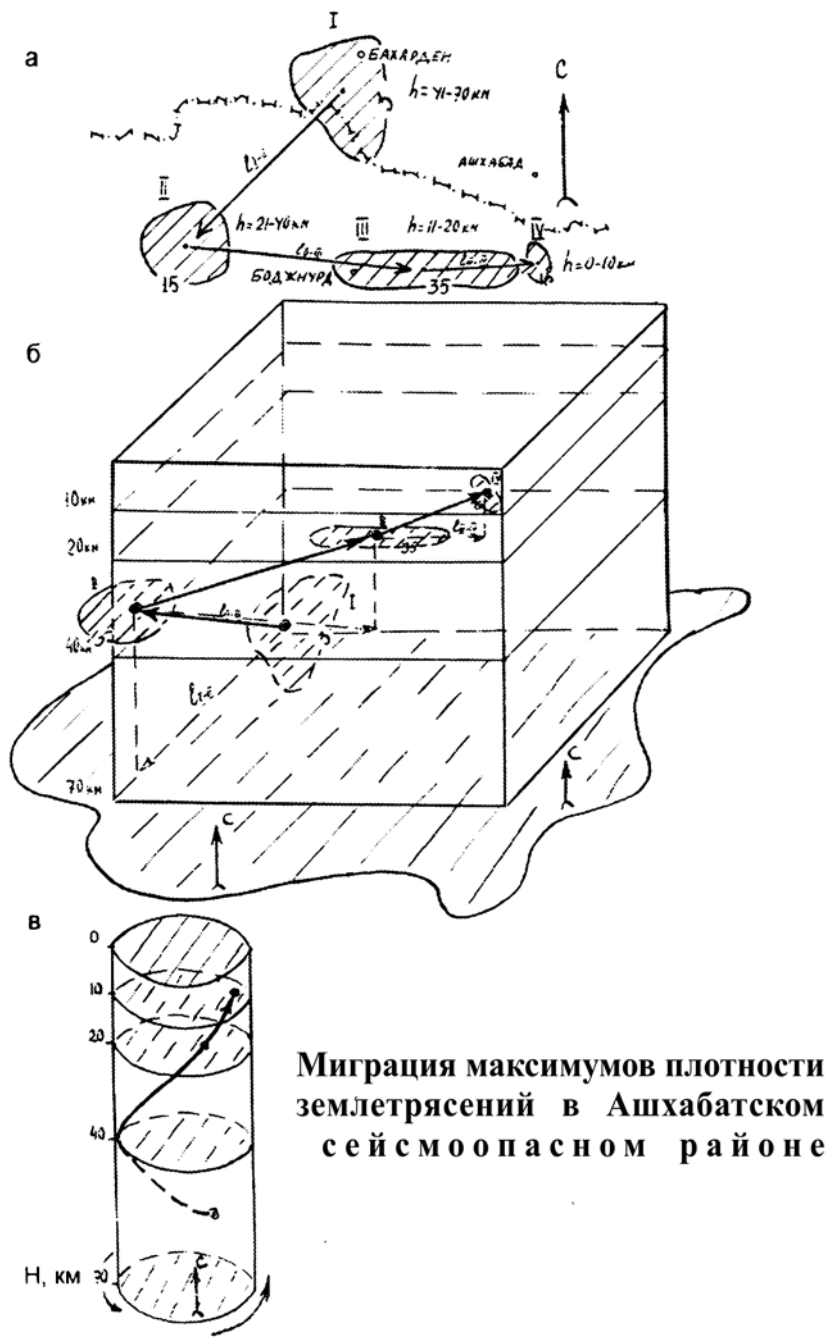


Рис. 7. Схема миграции максимумов плотности очагов землетрясений в Ашхабатском сейсмоопасном районе [Полетаев, 2009]

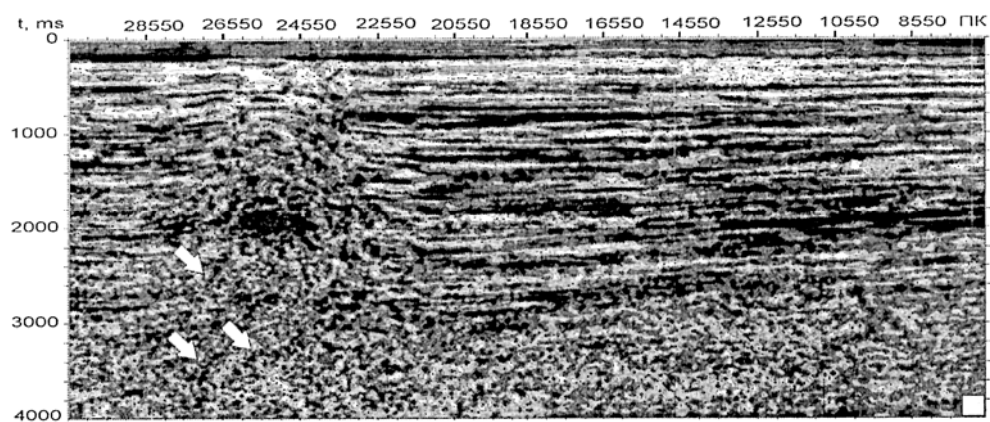


Рис. 8. Временной разрез логарифмических декрементов затухания по профилю 17. Структура Голицына, Черноморский шельф [Гринь Н., Гринь Д., 2008]