

УДК 551.2.03
DOI 0.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art42

ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИИ ГЛУБИННЫХ ФЛЮИДОВ В КОНСОЛИДИРОВАННОЙ ЗЕМНОЙ КОРЕ

Павленкова Н.И., Институт физики Земли РАН
E-mail: ninapav@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены результаты геофизических исследований континентальной земной коры по выявлению зон повышенной проницаемости для глубинных флюидов. Приводится обобщенная модель основных каналов флюидной адвекции: глубинных нарушений, объединенных в единую миграционную систему зоной пониженных сейсмических скоростей и повышенной электропроводности в средней части коры.

Ключевые слова: земная кора, флюиды, сейсмические исследования, разломы, волноводы, проницаемость.

DEEP FLUID MIGRATION FEATURES IN CONSOLIDATED EARTH'S CRUST

Pavlenkova N.I., Earth Physics Institute of RAS
E-mail: ninapav@mail.ru

Abstract. The article discusses the results of continental crust geophysical studies on the increased permeability zones identification for deep fluids. A generalized model of the main fluid advection channels is presented: deep disturbances combined into a single migration system by a zone of low seismic velocities and increased electrical conductivity in the middle part of the crust.

Keywords: Earth's crust, fluids, seismic studies, faults, waveguides, permeability.

Геолого-геофизическая и сейсмическая характеристика Охотоморского региона

Изучение особенностей миграции глубинных флюидов в земной коре имеет большое значение для решения многих проблем геодинамики, но особое значение оно приобрело в последнее время в связи с проблемой глубинной нефти. Для этого необходимо знать пути миграции глубинных флюидов, а также возможные условия их концентрации не только в осадочном чехле, но и в консолидированной коре.

Условия миграция глубинных флюидов в консолидированной части земной коры определяются, также как и в осадках, проницаемостью вещества. Но в отличие от осадочных пород, в кристаллических и высоко метаморфизованных породах они мало зависят от состава пород, а определяются, в основном, изменчивостью с глубиной их реологических свойств, пористости и степени разрушенности. Изучение этих особенностей земной коры на больших глубинах возможно на основе детальных геофизических исследований. При этом необходимо определить не только изменчивость проницаемости вещества с глубиной и по горизонтали, но и выделить структурные особенности коры, которые могут контролировать направленность флюидных потоков (каналов миграции). Из геофизических методов, позволяющих изучать соответствующие структурные особенности коры и физические свойства вещества, это, прежде всего, метод глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), метод отраженных волн (ОГТ), а также электромагнитные исследования (МТЗ).

По данным ГСЗ изучается изменчивость скорости сейсмических волн с глубиной и по площади, и выявляются основные структурные особенности земной коры. По особенностям изменения скоростей с глубиной определяются слои не только разного состава и разных реологических свойств вещества (разной его пластичности и пористости), но и разной флюидонасыщенности, так как небольшое содержание флюидов в консолидированных породах существенно понижает их сейсмические скорости [9, 25]. Метод ГСЗ позволяет также по структурным особенностям сейсмических границ выделять глубинные разломы, характеризующиеся повышенной трещиноватостью, то есть высокой проницаемостью. Такие разломы выделяются обычно по круто наклоненным отражающим площадкам или по разрывам и смещениям по глубине сейсмических границ.

Метод ОГТ характеризует структуру земной коры, в основном, по степени ее неоднородности. Повышенная разрушенность и трещиноватость среды отмечается на разрезах ОГТ увеличением числа отражающих элементов («мутности» среды), а ее монолитность и пониженная проницаемость в виде «прозрачных» зон. В этом плане метод ОГТ является наиболее детальным, он позволяет выделить не только крупные разломы и мощные слои разной степени гетерогенности, но и локальные области повышенной пористости, с которыми можно связывать повышенную концентрацию флюидов.

Магнито-теллурическое зондирование (МТЗ) существенно дополняет сейсмические работы при определении природы зон пониженных сейсмических скоростей и

повышенной гетерогенности: являются ли они зонами повышенной флюидонасыщенности или «сухими» зонами.

В целом, проведенный с настоящее время большой объем комплексных исследований земной коры методами ГСЗ, ОГТ и МГЗ в разных тектонических регионах позволяет уже достаточно детально изучить общую изменчивость проницаемости в консолидированной части земной коры и выявить основные каналы миграции глубинных флюидов.

Важным результатом работ ГСЗ в этом плане явилось выделение в земной коре слоев с пониженными скоростями (волноводов), которые можно связывать с повышенной пористостью и флюидонасыщенностью вещества. Сейсмические волноводы были обнаружены в земной коре сначала в тектонически активных регионах, и они объяснялись высоким температурным режимом таких регионов. Но затем такие слои были выявлены в пределах холодных кристаллических щитов [14, 27]. В настоящее время получен достаточно надежный материал об этих слоях в самых разных регионах мира. Показано, что они встречаются регулярно и на древних, и на молодых платформах, а также в орогенных областях и в рифтовых зонах. При этом чаще всего примерно на одних и тех же глубинах: 10 – 20 км. Объяснить природу таких слоев влиянием температуры невозможно. На основании лабораторных исследований пород при высоком давлении и температуре в присутствии флюидов было высказано предположение о повышенной пористости вещества этих слоев и их насыщенности флюидами [4, 9, 25]

Такая природа волноводов была подтверждена и данными бурения Кольской сверхглубокой скважины [7, 8, 15], которая выявила уменьшение скоростей на глубине 9-12 км с резким увеличением объема скважины и пористости пород, свидетельствующих о повышенной их трещиноватости. Здесь же был отмечен и большой приток воды. Такая природа этого слоя была доказана и лабораторными исследованиями керна скважины [22].

Связь слоев с пониженными скоростями с трещиноватыми и флюидонасыщенными зонами подтвердилась и электромагнитными исследованиями. Они показали приуроченность к волноводам зон повышенной электропроводности с повышенным содержанием флюидов [2, 20, 23, 24].

На разрезах ОГТ наличие волноводов в земной коры выражено в виде повышенной ее расслоенности с чередованием «мутных» и «прозрачных» зон [17, 18, 19]. При этом на уровне волновода часто наблюдается смена структурного плана коры: для верхней ее

части характерно большое число глубинных разломов листрической формы, которые выполаживаются к волноводам и усиливают их субгоризонтальную расслоенность [26, 28], низы коры более однородны (рис. 1).

Эти структурные особенности земной коры и природа разломов листрической формы нашли обоснование с точки зрения механики в работах [6, 12]. В них показано, что нарушения такой формы возникают как при сжатии, так и при растяжении реологически расслоенной среды, и они должны выполаживаться к ослабленным зонам. В результате, подобные системы нарушений листрической формы и смена структурного плана коры на субгоризонтальную расслоенность, часто наблюдаемые на разрезах ОГТ, является по существу основными критериями для выделения зон пониженных скоростей и повышенной пористости в консолидированной земной коре. По густоте и структурной неоднородности отражающих элементов разломных («мутных») зон можно оценить степень разрушенности и трещиноватости слагающих их вещества, выделить систему дополнительных мелких нарушений и определить их форму.

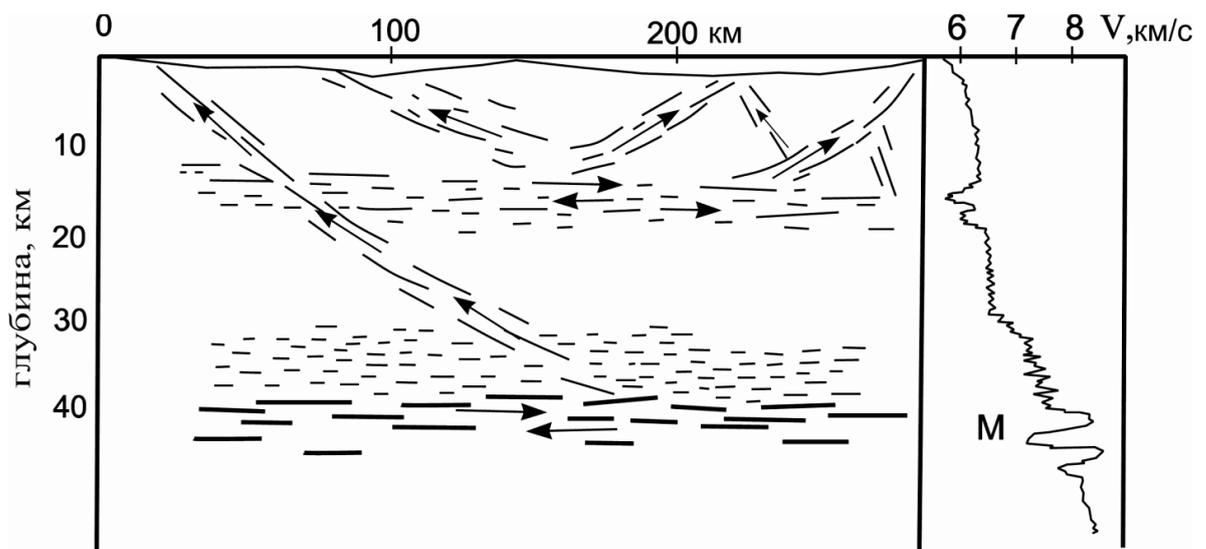


Рис. 1. Обобщенная модель земной коры [16]. V – скорость продольных волн, M – подошва земной коры, стрелками отмечены каналы флюидной адвекции.

В обобщенной модели земной коры (рис.1) кроме описанной структуры верхней и средней ее части показана расслоенная зона в низах коры, на уровне границы M. Такое строение зоны перехода кора-мантия доказано многочисленными исследованиями в разных регионах мира. При ГСЗ по закрытическим отражениям эта граница рисуется как расслоенная пачка с чередованием слоев пониженной и повышенной скорости. На разрезах ОГТ основным критерием выделения границы M является резкая смена

неоднородной части нижней коры на практически «прозрачную» верхнюю мантию. Природа такой неоднородности и расслоенности может быть связана с чередованием прослоев вещества разного состава (корового и мантийного), образовавшегося в процессе формирования земной коры. Но не исключено, что такое строение, также как и в средней коре, связано со сменой реологических свойств вещества на большой глубине [12]. Не исключено, что низкоскоростные прослои этой зоны являются, возможно, областями повышенного содержания флюидов. Это предположение согласуется с наблюдаемой иногда высокой электропроводностью низов коры [1].

В целом, наблюдаемая смена структурного плана земной коры на уровне волноводов отмечается не только по данным ОГТ, но и другими геофизическими методами. Так, на этих же глубинах часто наблюдается уменьшение локальной плотностной неоднородности. Это показано на многочисленных плотностных моделях платформенных регионов и в пределах орогенных областей. Такое же соотношение типично и для разрезов, построенных по магнитным аномалиям. Это означает увеличение пластичности корового материала в области волновода с соответствующим выравниванием его неоднородностей. К такому же выводу приводят данные о распределении очагов землетрясений в земной коре. В самых разных регионах мира отмечается, что число землетрясений резко уменьшается в средней коре. То есть эта ослабленная зона является характерной особенностью континентальной земной коры, определяющей и основные особенности флюидной адвекции в ее пределах.

На рис.1 кроме разломов листрической формы в верхней коре показан разлом, секущий всю кору и выходящий к границе М. Такие разломы выделяются обычно по данным ГСЗ в виде четких отражающих границ. Очень часто они пересекают границу М и уходят глубоко в верхнюю мантию, являясь, очевидно, основными каналами поступления в кору мантийных флюидов. Такие каналы, пересекающие всю земную кору, часто выделяются и в виде вертикальных нарушений. На разрезах ОГТ они могут быть представлены не только в виде неоднородных пачек, а напротив, как «прозрачные» зоны. Чаще всего такие разломы разделяют крупные блоки земной коры с разной структурой и разной историей развития. Представлены они, очевидно, зонами высоких напряжений и этим объясняется их монолитность («прозрачность»).

Крупные, практически вертикальные разломы приурочены обычно к бортам глубоких впадин. Вдоль этих разломов происходило формирование впадин, и они,

являются, по всей видимости, основными каналами поступления глубинных флюидов в осадочную толщу. Это – долго живущие и все время обновляемые разломы, то есть постоянно действующие каналы флюидной адвекции. Важным источником глубинных флюидов для глубоких впадин являются, очевидно, и коровые волноводы. Многие впадины имеют глубину более 10-15 км, и флюидонасыщенные слои с пониженными скоростями в окружающей впадину консолидированной коре могут быть непосредственно связаны с осадочной толщей, и постоянно насыщать ее флюидами.

Таким образом, основными путями миграции глубинных флюидов в земной коре являются системы соединяющихся между собой зон повышенной трещиноватости и флюидонасыщенности. Главными компонентами этой системы являются глубинные нарушения и объединяющие их субгоризонтальные слои с пониженными скоростями (волноводы). Они обеспечивают постоянный приток флюидов к поверхности, их непрерывность и относительное постоянство при переменной тектонической обстановке. Особенности этой системы обуславливают также условия протекания различных тектонических процессов, поскольку глубинные флюиды являются важным источником энергии для этих процессов и поскольку по такой системе ослабленных (разрушенных) зон происходят основные подвижки блоков земной коры.

Описанная система каналов имеет также большое значение для формирования различных видов полезных ископаемых. Многочисленные геологические исследования показали, что глубинные разломы играют первоочередную роль при образовании рудных месторождений [10,11]. Для формирования нефтяных месторождений большое значение имеет именно система сообщающихся каналов, обеспечивающая вынос основных компонент глубинных флюидов со всей толщи земной коры [3, 5]. Классическим примером в этом плане могут быть глубинные разломы Татарского свода [18]. Именно с этими разломами связаны в этом регионе крупнейшие нефтяные месторождения. Они доказывают глубинное происхождение нефти и большую роль флюидной адвекции в процессе формирования нефтяных месторождений.

Но слабо изученной остается проблема формирования в консолидированной коре нефтяных залежей. Сложное, неоднородное строение земной коры с чередованием блоков и слоев разной проницаемости формирует, конечно, не только каналы для миграции глубинных флюидов, но и закрытые области их концентрации и скопления нефтяной компоненты. Но как выделить эти области? Данные ОГТ в этом плане не являются

однозначными. Подобную разломам структуру в виде наклонных слоев имеют и тектонические формирования, слоистость которых связана со сменой состава вещества, а не его трещиноватости. Неизвестно, какие особенности сейсмических волновых полей отражают ее насыщенность флюидами, а не просто структурную неоднородность. Сейчас можно только предполагать, что области возможного скопления флюидов (и нефти) могут формироваться при резкой смене проницаемости среды, ее пористости (на сейсмических разрезах при смене «мутности» среды). Это могут быть глубинные нарушения, перекрытые на некоторой глубине непроницаемыми покрывками, или прослой с пониженными скоростями с непроницаемыми кровлями. Научится выделять такие области является важнейшей задачей дальнейших детальных геофизических исследований, которые должны сопровождаться с глубоким бурением. Только тогда можно будет определить природу наблюдаемой различными методами неоднородности консолидированной земной коры и выработать критерии по выделению нефтеперспективных областей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Лебедева И.А., Барашков И.С. Магнитотеллурическое зондирование коровых проводящих зон // Физика Земли, 1984, № 9. С.50-56.
2. Ваньян Л.Л., Павленкова Н.И. Слой пониженной скорости и повышенной электропроводности в основании верхней части земной коры Балтийского щита // Физика Земли, 2002, № 1. С.1-9.
3. Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы // Материалы Всероссийской конференции, Москва, 22-25 апреля 2008 г. (Отв. ред. А.Н.Дмитриевский, Б.М.Валяев). М: ГЕОС. 2008. 624 с.
4. Жариков А.В., Мальковский В.И., Шмонов В.М. Новый метод для исследования проницаемости образцов анизотропных пород при изменении температуры // Фундаментальные проблемы нефтегазовой геологии. М: ГЕОС. 2005. С. 500-504.
5. Генезис углеводородных флюидов и месторождений (Отв. ред. А.Н.Дмитриевский, Б.М. Валяев). М: ГЕОС. 2006. 315 с.
6. Каракин А.В., Курьянов Ю.А., Павленкова Н.И. Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. МПР, РАЕН, ВНИИгеосистем, «Дубна». М., 2003. 221 с.

7. *Кольская сверхглубокая* (Ред. Козловский Е.А.) Недра. 1984. 440 с
8. *Кременецкий А.А., Овчинников Л.Н., Боровский Л.В.* Геолого-геофизические критерии глубинного прогнозирования по данным изучения свсрх-глубоких скважин // *Методы и практика исследований глубинного строения недр.* Л.: Наука, 1987. С. 97-114.
9. *Лебедев Е.Б., Кадик А.А. Зебарин А.М., Дорман А.М.* Экспериментальное изучение влияния воды на скорости упругих волн глубинных пород // *Докл. АН СССР,* 1989, том 309, № 5. С.1090-1093.
10. *Летников Ф.А.* Флюидные фации континентальной литосферы и проблемы рудообразования // *Смирновский сборник – 99* (научно-литературный альманах). Москва, 1999. С. 63-98.
11. *Летников Ф.А.* Флюидный режим эндогенных процессов и проблемы рудогенеза // *Геология и геофизика,* 2006, том 47, № 12. С.1296-1307.
12. *Николаевский В.Н.* Граница Мохоровичича как предельная глубина хрупко-дилатансионного состояния горных пород // *ДАН СССР,* 1978, том 249, №4. С.817-821.
13. *Николаевский В.Н.* Трещиноватость и пластичность земной коры. В сб.: *Вопросы нелинейной геофизики,* ВНИИЯГГ, 1981. С. 15-22.
14. *Павленкова Н.И.* О слоях пониженных скоростей в земной коре Украинского щита // *Геофизический сборник,* 1967, № 25. С. 25-33.
15. *Павленкова Н.И.* Кольская скважина и ее значение для глубинных сейсмических зондирований // *Советская геология,* 1989, № 6. С. 17-23.
16. *Павленкова Н.И.* Роль флюидов в формировании сейсмической расслоенности земной коры // *Физика Земли,* 1996, №4. С.51-61.
17. *Структура и строение земной коры Магаданского сектора России по геолого-геофизическим данным.* Сборник научных трудов (Отв.ред. А.С.Сальников). Новосибирск. «Наука». 2007. 172с.
18. *Трофимов В.А.* Глубинные региональные сейсморазведочные исследования МОГТ нефтеносных территорий. Москва ГЕОС, 2014. 202 с.
19. *BABEL Working Group.* *Deep Seismic Reflection/Refraction Interpretation of Crustal Structure along BABEL Profiles A and B in the Southern Baltic Sea.* // *Geophys. J. Int.,* 1993, 112. P.325-343.
20. *Bailey R.C., Craven J.A., Macnae J.C. and Polzer B.D.* Imaging of deep fluids in Archean crust // *Nature (London),* 1989, 340. P.136-138.

21. *Brace W.F., Walsh J.B., Frangos W.T.* Permability of the granites under high pressure // *J.Geophys.Res.*, 1968, 73. P. 2225-2236.
22. *Ganchin Y.V., Smithson S.B., Morozov I.B., Smyth D.K., Garipov V.Z., Karaev N.A., Kristofferson Y.* Seismic studies around the Kola Superdeep Borehole, Russia // *Tectonophysics*, 1998, 288. P.1-16.