

УДК 550.834.05

## ГОРИЗОНТЫ ИНВЕРСИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2014 г. А.М. Кузин

*Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия*

Обосновывается широкое распространение в геологической среде горизонтов инверсии упругих свойств, наблюдаемых и в верхней мантии, и в земной коре; отличительная особенность этих горизонтов – их протяженность, достигающая сотен километров.

Рассматриваются возможные причины образования подобных горизонтов, анализируется их роль в процессе преобразования земной коры из океанической в континентальную, в конвекции флюидов и экранировании деформаций.

**Ключевые слова:** горизонты инверсии упругих свойств, интерпретация, сейсмические данные.

### Введение

В современных тектонофизике и геодинамике данные *GPS* наиболее часто упоминаются в качестве источника информации о горизонтальных перемещениях земной поверхности. Горизонтальные напряжения приводят к образованию и активизации горизонтальных зон неупругих деформаций и образованию зон пониженных скоростей сейсмических волн (волноводов). Однако, как это ни парадоксально, эти зоны, за исключением волноводов в нижней и средней частях земной коры, практически не фигурируют в тектонофизических и геодинамических реконструкциях. Ниже приводится описание возможных механизмов образования волноводов.

С учетом разнообразия горизонтальных сейсмических границ, обусловленных уменьшением скорости сейсмических волн, был принят термин – горизонт инверсии упругих свойств. Рассмотрим две причины появления этого термина. В одной из последних работ Ю.Л. Ребецкого [2013] обоснован механизм коромантийного течения, который энергетически обеспечен внутренним состоянием самой среды, деформируемой этим течением. Это явление представляет собой новый вид неустойчивости в гравитационном поле напряжений слоистой упругопластичной среды, имеющей глубинную инверсию упругой объемной жесткости. Инверсия упругой жесткости в тектоносфере приводит к невыполнению принципа минимума потенциальной энергии упругих деформаций. Это означает возможность пластического/вязкого течения, обеспечиваемого уменьшающейся потенциальной энергией упругих деформаций. По характеру своего воздействия на неустойчивость и по последствиям инверсия упругой жесткости очень похожа на инверсию плотности. Показано, что для малых изменений поверхности контакта слоев также происходит уменьшение потенциальной энергии упругих деформаций. Если в геосреде возможно течение, то оно будет осуществляться за счет уменьшающегося потенциала упругих деформаций. С глубиной влияние упругой инверсии жесткости возрастает. При учете уменьшения эффективных значений объемного упругого модуля пород, вызываемого долговременным влиянием флюида, который находится под давлением в трещинно-поровом пространстве, этот эффект возрастает еще более.

Другая причина заключается в том, что сейсмический образ геологической среды в целом или ее элементов не отображает полностью многие ее свойства, например,

“сейсмическая” непрерывность границы еще не означает ее реальную непрерывность. Автор согласен с замечанием Ю.Л. Ребецкого, высказанным им в рецензии на данную работу, что “даже в тех случаях, когда сами изменения свойств вещества связаны с микро- или макроскопическими трещинами, всё равно между двумя крупными структурно различными объектами (с микротрещинами и без них) может не быть разрыва сплошности, характеризующегося скачком смещений”. Действительно, это вполне вероятно, например, при диагенезе осадков.

### **Горизонты инверсии упругих свойств (волноводы) в верхней мантии**

Идея о существовании в литосфере Земли слоев пониженной скорости сейсмических волн (волноводов) впервые была высказана Б. Гутенбергом в середине прошлого века [Гутенберг, 1963]. Волноводы выделены не только в земной коре, но и в верхней мантии, где они отождествляются с астеносферными слоями [Винник, 1992]. Количество волноводов различно в разных регионах, а глубина их залегания меняется в широких пределах – от 60–80 км под Курило-Камчатской островной дугой [Беляевский, 1974] до 120–150 км под континентами [Павленкова, 1995, 1998; Егоркин, 1999]. Астеносферные слои, характеризующиеся повышенной пластичностью, рассматриваются как области поглощения энергии вращения Земли и других глобальных процессов и явлений; с ними связываются вертикальные и горизонтальные движения земной коры. Пониженные скорости сейсмических волн объясняются частичным плавлением и фазовыми переходами [Винник, 1992; Павленкова, 1998]. Предполагается, что астеносферный слой, как и граница Мохоровичича, имеет тонкослоистую структуру. Это предположение подтверждено результатами обработки фрагмента центральной части геотраверса “Уралсейс” с использованием метода параметрической развертки отображений (ПРО) [Кузин, 2001б]. На глубинах порядка 110–130 км прослежен слой пониженной скорости, мощность которого меняется по латерали. Он состоит из отдельных низкоскоростных прослоев разной протяженности. Для разрывных нарушений формирование рассеянной компоненты отраженной волны может быть доминирующим в волновой картине. С ростом глубины рассеяние энергии упругой волны увеличивается. При обработке исходных данных методом ПРО помимо зеркальной компоненты накапливается и рассеянная [Кондрашков, Анискович, Богданов, 1998] – это свойство оператора накопления и позволило выделить аномалию скорости.

### **Горизонты инверсии упругих свойств (волноводы) в земной коре**

Слои с пониженной скоростью в земной коре подробно описаны в двух обзорах, в одном из которых [Краснопевцева, 1978] рассматривается континентальная кора, в другом [Булин, 1982] – океаническая.

В первом из названных обзоров собраны данные о волноводах на территории бывшего СССР, Западной Европы и Северной Америки. Практически на всех континентах слои с пониженной скоростью зафиксированы в платформенных и складчатых областях. В Провинции бассейнов и хребтов США, в Карпатах, Узбекистане волноводы выделены в нижней части коры. Мощность волноводов и величина уменьшения скорости в нем увеличивается от древних структур к молодым. В континентальной земной коре волновод чаще всего встречается в “гранитном” слое на глубинах от 8–10 до 15 км; большинство из них находится в верхней и средней частях коры, значительно реже они наблюдаются в ее подошве [Резанов, 2002].

В океанической коре волноводы выделены на всех глубинных уровнях верхней литосферы [Булин, 1982]. Составлено 16 моделей распределения слоев низкой скорости

для глубин 12–14 км и одна (обобщенная) – до глубины 400 км. Мощность волноводов меняется от 0.5 м в верхах коры до 15–30 км на глубинах 25–70 км. Самые неглубоко залегающие волноводы мощностью до первых метров выделены в интервале 160–370 м от океанского дна по результатам каротажа, выполненного в ходе рейса № 46 НИС “Гломар-Челленджер” (США).

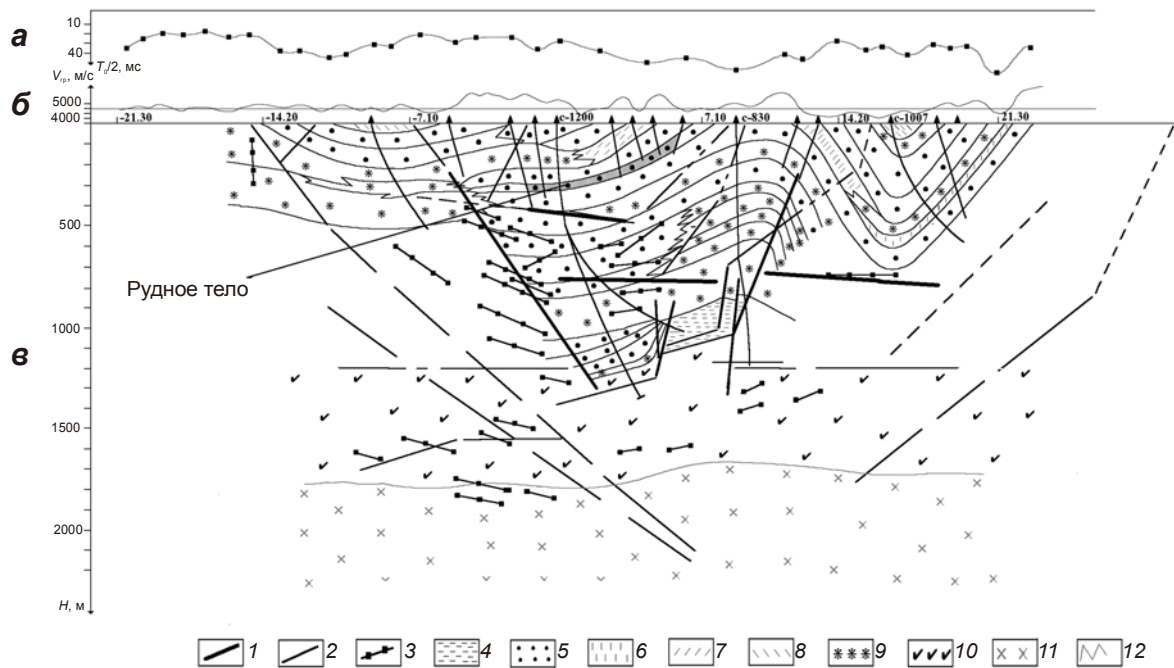
Надо заметить, что в последние два десятилетия разрывные нарушения стали активно изучаться электромагнитными методами в диапазоне от верхних горизонтов осадочного чехла до подошвы консолидированной коры. По последним данным, горизонты инверсии упругих свойств в виде слоев повышенной электропроводимости существуют даже в пределах первой сотни метров [Кожевников, Агафонов, Антонов, 2008]. Пласты с аномально низким электрическим сопротивлением были выделены в средней и нижней частях консолидированной коры районов, имеющих разное геологическое строение [Белявский и др., 2007; Неведрова, Санчаа, Суродина, 2012]; в [Спичак, 2008; Жамалетдинов, 2009] обоснована связь этих пластов с флюидизацией.

В континентальной коре на глубинах менее двух километров горизонты инверсии упругих свойств впервые были выделены В.А. Невским [1979] в виде пластиновидных тел в пределах ограниченного разломами крутопадающего линейного блока. С крутопадающими и горизонтальными пластиновидными блоками, так же как и со структурами типа “конского хвоста”, связаны ураноносные рудные тела и месторождения.

В последние 10–15 лет рассматриваемые горизонты вызывают интерес в нефтяной геологии в связи с поисками месторождений в глубоких горизонтах осадочного разреза и в фундаменте – как складчатом, так и кристаллическом. В частности, горизонты инверсии упругих свойств выявлены на Астраханском газоконденсатном месторождении, на морских месторождениях Сахалина. В Западной Сибири на Новопортовском месторождении по приблизительным оценкам латеральная миграция флюидов, связываемая с их присутствием, достигает 50–60 км [Семашев, Кузьминов, Салина, 2007].

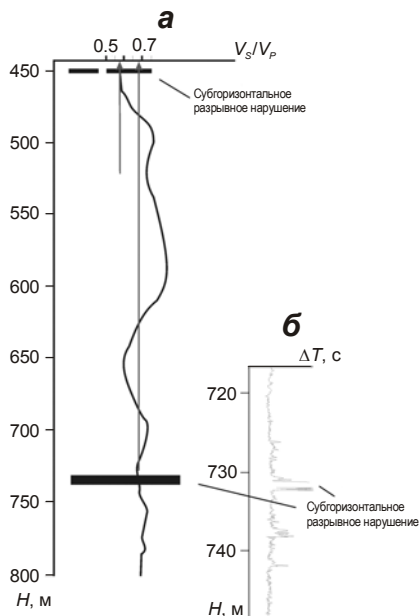
Первые данные о регистрации в кристаллическом фундаменте отражающих субгоризонтальных границ, предположительно совпадающих с зонами аномально высокой проводимости, содержатся в [Кравченко и др., 1975], где описаны результаты сейморазведочных работ, проведенных в начале 1970-х годов на западном склоне Украинского кристаллического щита. В последующие годы такие границы были выявлены на Кольском полуострове, на Урале, в Северном и Центральном Казахстане.

На рис. 1 представлен сейсмогеологический разрез по профилю, проходящему через Абайское стратиформное урановое месторождение в Северном Казахстане. По данным проведенной высокочастотной сейморазведки МОВ на этом месторождении была выделена горизонтальная отражающая граница на глубине около 730 м, пропущенная при документировании данных бурения и подтвержденная повторным анализом керна, а также результатами ГИС и ВСП. Комплекс ГИС и ВСП, выполненный в нескольких глубоких (более 1000 м) разведочных скважинах, позволил однозначно определить природу этой и других отражающих границ, а также упруго-деформационные свойства вмещающих залежь пород. На глубинах 450 и 730 м по данным сейморазведки были выделены горизонты инверсии упругих свойств, залегающие дискордантно по отношению к складчатости и границам осадконакопления. Результаты акустического каротажа по глубокой скважине № 1200 (рис. 2) свидетельствуют, что выделенные горизонты характеризуются разными значениями отношения скоростей поперечных и продольных волн: на глубине 450 м  $V_s/V_p \approx 0.575$ , на глубине 730 м –  $\approx 0.675$ . Разрывное нарушение на отметке 450 м подстилает рудную залежь, и пониженное значение  $V_s/V_p$  вызвано относительным увеличением  $V_p$  вследствие уменьшения трещиноватости разрывного нарушения, вызванного залеченностью его минеральными растворами [Кузин, 1999].



**Рис. 1.** Абайское урановое стратиформное месторождение, Северный Казахстан. Результаты наблюдений по данным высокочастотной сейсморазведки МОВ

*a* – график  $T_0/2$ ; *б* – график граничной скорости  $V_g$ ; *в* – сейсмический разрез по данным МОВ [Кузин, 2001а]; 1 – разрывные нарушения; 2 – отражающие границы по МОВ; 3 – то же по ВСП; 4–9 – фациально-генетические комплексы: вершинной (4) и веерно-потоковой (5) зон пролювия; авандельтовые (6), озерные (7), руслового аллювия (8), дельтовые (9); 10 – диабазы; 11 – гравелиты, алевролиты; 12 – зоны фациальных замещений

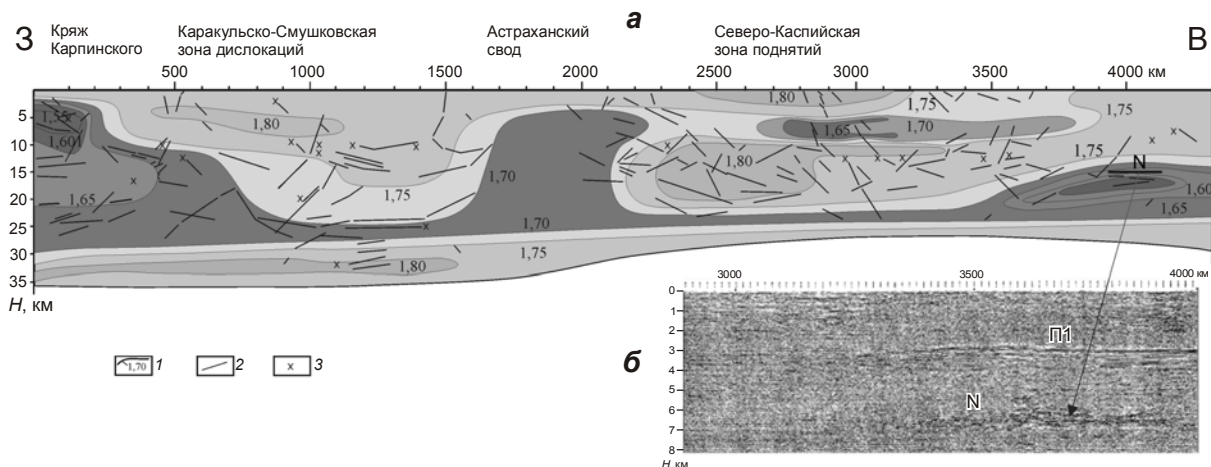


**Рис. 2.** Абайское урановое стратиформное месторождение, Северный Казахстан. Скв. № 1200

*a* – график отношения  $V_s/V_p$ , рассчитанный по данным акустического каротажа с осреднением по глубине на базе 40 м; *б* – график интервального времени ( $\Delta T$ , с) в зоне горизонтального разрывного нарушения

Более высокие значения  $V_s/V_p$  на глубине 730 м могут характеризовать выделенное здесь горизонтальное разрывное нарушение как более жесткое относительно вмещающей среды (но хрупкое) тело, что обеспечивает повышение устойчивости рудоносного блока к волнам напряжений и деформаций. Разное распределение скорости и соответственно упругих свойств в горизонтах инверсии упругих свойств может отображать их различную роль в геологических процессах.

Рис. 3 иллюстрирует взаимосвязь упруго-деформационных параметров консолидированной коры и осадочного чехла. Профиль многоволнового ГСЗ Элиста–Астрахань–Гурьев и совпадающий с ним профиль МОГТ “Батолит-2” были первыми профилями комплексных сейсмических исследований земной коры. На разрез, построенный по данным ГСЗ в изолиниях  $V_P/V_S$  (рис. 3, а), нанесены отражающие границы, прослеженные по данным МОГТ. На рис. 3, б помещен фрагмент профиля МОГТ, на котором четко прослеживается изменение вдоль профиля корреляции первого подсолевого горизонта П1. Если в западной части корреляция не совсем уверенная, то в восточной отражение от П1 интенсивное, хорошо прослеживаемое до конца профиля. Ниже этого горизонта в консолидированной коре наблюдается горизонтальная граница N, на первый взгляд похожая на кратную волну от П1. На разрезе ГСЗ (см. рис. 3, а) отражающая граница N совпадает с линзовидной аномалией низких значений  $V_P/V_S$ . Возможно, граница N – разрывное нарушение, по которому происходит “проскальзывание” залегающего выше по разрезу блока пород. Можно предположить, что присутствие в нижней части коры линзовидного тела обеспечивает совместно с границей N демпфирование волн напряжений и деформаций для подсолевых горизонтов осадочного комплекса пород.



**Рис. 3.** Разрез в изолиниях отношения  $V_P/V_S$  по профилю многоволнового ГСЗ Элиста–Астрахань–Гурьев с нанесенными отражающими площадками, построенными по профилю МОГТ “Батолит-2” (а) и фрагмент временного разреза по профилю МОГТ “Батолит-2” (б) [Кузин, 1994]

1 – изолинии  $V_P/V_S$ ; 2 – отражающие площадки; 3 – точки дифракции по данным МОГТ

Раньше в качестве характеристики поля отраженных волн МОГТ часто использовалась оценка плотности распределения и протяженности отражений на разных глубинных уровнях. Такая оценка применялась, в частности, при сопоставлении особенностей глубинной расслоенности древних щитов, платформ и более молодых структур земной коры. По данным, приводимым в [Кузин, Шейх-Заде, 1993], на щитах в верхней части коры находится максимум отражающих элементов протяженностью 1–2 км; протяженность аналогичных отражающих элементов для каледонид и герценид – 5–7 км, для зон современного вулканизма – 10–20 км. В нижней части коры каледонид и герценид размер отражающих площадок может достигать 20 км, под щитами – около 10 км. Анализ, выполненный автором настоящей статьи для докембрийских платформ, показал, что для них свойственны наиболее протяженные горизонтальные разрывные нарушения в интервале глубин 1–10 км. Горизонты инверсии упругих свойств с протяженностью до 400 км и более были зафиксированы на юго-западном склоне Украинского кристаллического щита на глубинах ~1 км. На геотраверсе МОГТ Татсейс подобные

горизонты протяженностью до нескольких сотен километров прослежены на глубинах 1.8–2.3 км в виде спорадических пачек отражений переменной интенсивности.

Разные оценки протяженности горизонтов инверсии упругих свойств во многом могут быть связаны с особенностями используемых систем полевых наблюдений МОГТ и последующего графа обработки данных. “Шероховатость” разрывных нарушений, рассматриваемых как сейсмические границы, приводит к тому, что на незначительных удалениях они прослеживаются хуже, чем на больших. Кроме того, расширение с глубиной зоны Френеля ведет к объединению отражений от отдельных площадок в одно. При обработке данных нередко для подавления высокочастотного шума на больших временах регистрации выполняется полосовая частотная фильтрация. В общем случае, особенности модели среды, получаемой тем или иным сейсмическим методом, определяются налагаемыми на модель ограничениями алгоритма метода.

В настоящее время преимущественное распространение получила обработка данных МОГТ с “подчеркиванием” динамической выразительности сейсмической записи [Модели..., 2007], которое, однако, влечет значительное сокращение информации о тонкой структуре отражающих границ, например, существенно ухудшается прослеживание протяженных, но не очень интенсивных отражений. Стандартная методика полевых наблюдений МОГТ из-за сравнительно небольших расстояний между источником и приемником не позволяет по значениям скорости сейсмических волн судить об упругих параметрах неоднородностей среды и, следовательно, прогнозировать вещественный состав пород консолидированной коры и глубоко залегающих осадочных горизонтов.

С учетом сказанного отметим несколько основных особенностей горизонтов инверсии упругих свойств среды, которые

- присутствуют в районах с различным геологическим строением и разной историей развития;
- секут различные литологические комплексы пород и складчатость;
- встречаются в интервале глубин от первых метров до нескольких сотен метров;
- не имеют различий в распространении и глубинах залегания в континентальной и океанической коре;
- не отличаются по сейсмическим (упругим) свойствам от разрывных нарушений других типов [Кузин, 1999].

### **О генезисе горизонтов инверсии упругих свойств в земной коре**

В свое время на существование в земной коре сложно ориентированной системы узлов пересечения плоскостей разрывных нарушений обратил внимание Ф.Я. Корытов [1974]. Зоны пересечения плоскостей разрывных нарушений могут быть и горизонтальными.

Узлы пересечения плоскостей разрывных нарушений могут рассматриваться как наиболее проницаемые каналы миграции флюидных потоков. Очевидно, что в них должны существовать большие локальные напряжения, ведущие к более сильному дроблению пород, чем в каждой из отражающих зон разрывных нарушений в отдельности; размеры зерен пород могут быть значительно меньше; увеличивается диспергация среды. Смачиваемость в таких зонах будет выше, в связи с чем должна увеличиться глубина проникновения флюида. В целом, вне зависимости от концентрации флюида это ведет к образованию пространственно связанной флюидной системы. Относительно более высокие локальные напряжения в зонах пересечения разрывных нарушений могут приводить к компакциям, образованию уплотненных зон с слоистостью, ориентированной перпендикулярно максимальным напряжениям. По границе этих зон также будут локализоваться флюидные потоки. Здесь важно подчеркнуть, что пространственно такие каналы направлены не по падению, а по простиранию пересекающихся зон разрывных нарушений.

В настоящее время роль и значение горизонтов инверсии упругих свойств только начинают проявляться в полной мере. В современных представлениях о формировании континентальной коры большая роль отводится процессу горизонтальной аккреции океанической как подготовительному периоду гранитизации [Виноградов, 2002]. Для современных проявлений инфильтрации и конвекции водных растворов на примере вулканических островов Атлантического и Тихого океанов было показано, что низкие значения ( $O^{18}$ ) в базальтовых лавах Исландии могут быть объяснены высокотемпературным ( $>400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) обменом при очень высоких соотношениях в системе “океаническая вода–порода” в процессе взаимодействия расплава с водой. Глубинный интервал внедрения морской воды на островах может достигать 150 км, тогда как вертикальное проникновение атмосферных и морских вод оценивается в 5–10 км [Виноградов, 2002].

Одним из спорных вопросов в изучении горизонтов инверсии упругих свойств является их происхождение. В.В. Эз [1986] дает следующую трактовку широкого развития горизонтальных разрывных нарушений для метаморфических комплексов: “Особенно обильны разрывы, образовавшиеся в тесной связи со складчатостью. При широком развитии лежащих складок большое значение имеют разрывы с субгоризонтальными поверхностями. Тесная сжатость складок приводит к тому, что разрывы часто оказываются почти параллельными крыльям складок и развивающимся в них плоскостным текстурам, чем затрудняется выявление природы разрывных контактов. В то же время разрывные контакты являются наиболее легко прослеживаемыми геологическими границами и часто изображаются на геологических картах как границы выделяемых подразделений”.

С позиций геомеханики в разрывных нарушениях могут реализовываться такие механизмы неупругого деформирования как образование и рост трещин, переупаковка зерен среды при действии сил сухого трения, необратимое затекание пор, скольжение блоков вдоль поверхности разрушения [Николаевский, 1984]. При небольших давлениях бокового обжатия возникающие трещины отрыва параллельны направлению главной сжимающей нагрузки. Проявляется эффект раскалывания, который объясняется тем, что между бортами трещин не действует сила трения, и даже незначительные сдвиговые усилия приводят к прорастанию трещин к свободной поверхности. Такая ситуация характерна для глубин примерно до 2–3 км. С ростом давления обжатия трещины смыкаются. Теперь трещины могут возникнуть там, где касательные напряжения достигнут предела прочности породы. Согласно теории Мора, угол наклона сдвиговых трещин будет определяться ориентацией главных напряжений и углом внутреннего трения. В случае макротрещин на их вершинах формируется рой микротрещин. При росте макротрещины этот рой образует облако микротрещин, пор и других деформационных дефектов структуры породы. Дальнейший рост давлений и температур (более 2 кбар и  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) приводит к локализации мелких трещин в виде полос деформаций, развитие которых завершается образованием полосы скольжения. Диапазон образования магистральных трещин ограничен по давлению и температуре значениями 5 кбар и  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  (граница Байерли–Орована–Моги). Граница такого состояния коррелируется с региональной границей Конрада [Николаевский, 1984]. В реологической зональности смены вида разрушения пород волноводы определяются как границы перехода от одного типа разрушения к другому [Николаевский, 1984, 1996].

Существует еще одно представление о природе горизонтальных сейсмических границ в консолидированной коре – они рассматриваются как границы изменения напряженного состояния среды [Ляховский, Мясников, 1984; Минц и др., 1987]. В работе [Ляховский, Мясников, 1984] дано описание поведения среды с упругими модулями, зависящими от напряжений. Кроме учета изменений модулей упругости для модели упругой среды с микронарушениями (расстояния между включениями много больше

размеров включений) необходимо дополнительно учитывать влияние включений и микротрещин. В этом случае величина коэффициента Пуассона будет зависеть как от параметров включений, так и от действующих в среде напряжений. Отсюда появилась возможность объяснить появление “мерцающих” сейсмических границ в консолидированной коре, в частности, нерегулярность регистрации границы Конрада и др.

В работе [Минц и др., 1987] на основании лабораторных измерений скорости продольных волн на водонасыщенном и сухом образцах керна сверхглубокой скважины СГ-3 в различных диапазонах давлений, соответствующих глубинам отбора керна, был сделан вывод о связи отражающих горизонтальных границ в разрезе СГ-3 с резким изменением напряженного состояния.

Как отмечалось выше, горизонты инверсии упругих свойств могут прослеживаться на десятки и сотни километров, пересекать породы различного состава, залегающие в разных условиях. Поэтому более предпочтительным выглядит механизм их образования, независимый от внутреннего строения среды и охватывающий значительное по протяженности пространство. Одним из возможных источников возникновения горизонтов инверсии упругих свойств могут быть волны тектонических напряжений [Николаевский, 1991], образование которых предположительно связывается с существованием общего ритма Солнечной системы. Как отмечает В.Н. Николаевский [1991], “только существованием неизвестных пока подземных резервуаров земной коры, меняющих объемы с солнечным ритмом, можно просто объяснить такое необычайное явление, как периодические изменения уровня воды во многих водоемах (например, оз. Чаны в Новосибирской области)”. Это предположение впоследствии получило подтверждение в результатах независимых исследований. Анализ возможных причин, обуславливающих меньшую глубину зоны дилатансии по сравнению с теоретическими оценками, привел к заключению, что положение слоя дилатансии хорошо согласуется с глубиной развития максимальных вариаций электропроводности земной коры под действием лунно-солнечных приливных напряжений [Жамалетдинов, 2009]. Нужно заметить, что ранее была установлена тесная корреляция между солнечной активностью и интенсивностью извержений грязевых вулканов [Валяев и др., 1980].

Наиболее вероятным механизмом, охватывающим большой диапазон масштабов среды, по-видимому, является интерференция тектонических волн. Еще в 70-е годы прошлого века В.В. Богацким [1986] был разработан подход, основанный на выявлении зон интерференции падающих и отраженных от поверхности Земли тектонических волн, который был успешно использован для прогноза месторождений полезных ископаемых. Действительно, трудно каким-либо другим явлением объяснить образование многокилометровых горизонтальных зон трещиноватости, секущих различные по литологии комплексы пород. При всём этом нельзя не учитывать такое фундаментальное свойство геологической среды, как конвергентность. Очень возможно, что в зависимости от масштаба явления преимущественно будет реализоваться какой-то один из механизмов разрушения и образования горизонтов инверсии упругих свойств.

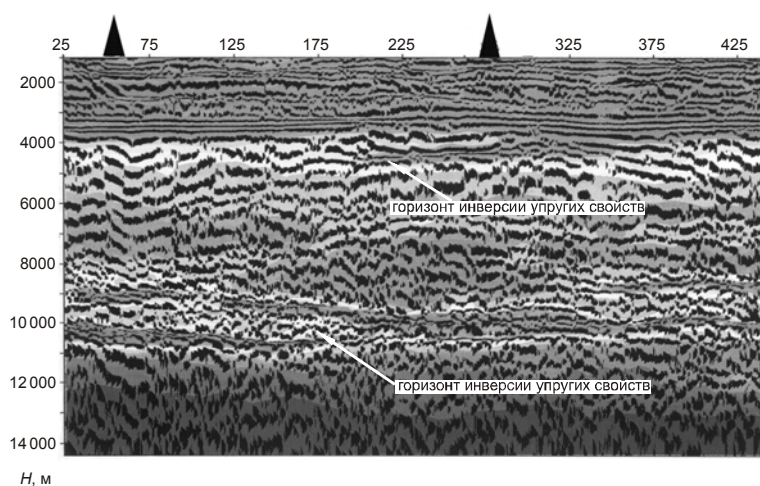
То, что в геологической среде независимо от ее состава, возраста и истории тектонического развития существуют горизонтальные зоны деструкции, предопределяет процессы компрессии и декомпрессии, латеральную миграцию флюидных потоков. Различная инерционность отклика твердой и жидкой фаз, структурная, литологическая неоднородность и расслоенность геологической среды приводят к формированию сложной системы “клапанов”, обеспечивающей периодические и/или аperiodические, но постоянные в геологическом времени процессы импульсной нисходящей и восходящей фильтрации. Ранее модель механизма, отвечающего за фильтрацию и инфильтрацию в породах консолидированной коры, была описана в [Дмитриевский, Баланюк,



[Каракин, 2004], где предполагается, что осцилляции разуплотненного слоя (волновода) приводят к нагнетанию в среду флюидов и эндогенного, и экзогенного генезиса.

Возможную реализацию такого сценария иллюстрирует приведенный на рис. 4 глубинный разрез распределения интервальной скорости по профилю МОГТ на Ханты-Мансийской площади [Кузин, Еришов, 1999]. Разрез проходит через два месторождения нефти – Рогожниковское (в начале профиля) и Горелое (в середине).

Как уже отмечалось выше, для разрывных нарушений формирование рассеянной компоненты отраженной волны может быть доминирующим в волновой картине. При рассеянии на шероховатой границе происходит кажущаяся задержка импульса падающей волны, которая добавляется к реальному понижению скорости. В результате, происходит увеличение контрастности таких границ на разрезе. К сожалению, из-за перевода цветной палитры в черно-белую рисунок стал менее выразителен, но, несмотря на это в интервале глубин 8000–11000 м четко видна горизонтальная граница с пониженной интервальной скоростью – волновод, проходящий через весь разрез. Этот рисунок подтверждает возможность конвекции в верхней части консолидированной коры. Пример конвекции в районе нефтяного месторождения по данным магнитотеллурических зондирований приведен также в [Спичак, Захарова, 2011], где описаны исследования, целью которых была оптимизация места заложения гидротермальной скважины на водоносный горизонт в кровле кристаллического фундамента ( $H \approx 8200$  м).



**Рис. 4.** Ханты-Мансийская площадь. Разрез интервальной скорости, полученный после полосовой фильтрации (3–5–7–10 Гц) [Кузин, Еришов, 1999]. Обработка по методу ПРО. На горизонтальной оси – номера точек ОГТ; треугольники – скважины

В то же время данные по Кольской скважине и *КТВ* в Верхнем Пфальце свидетельствуют, что далеко не все волноводы могут участвовать в конвекции флюидов. В названных сверхглубоких скважинах на глубинах 8–9 км, где пластовое давление значительно выше гидростатического, обнаружены гидродинамически изолированные водонасыщенные горизонты [Гаврилов, Поспелов, Шнип, 2005]. Вполне возможно, что именно различия между гидродинамически изолированными и открытыми волноводами определяют особенности волноводов в нефтегазоносных и рудоносных блоках земной коры.

Еще один возможный механизм образования горизонтов инверсии упругих свойств непосредственно связан с водонасыщением – гидрогенно-химическим разуплотнением пород [Боревский, Кременецкий, 1985]. Суть этого механизма состоит в том, что при метаморфизме водосодержащих пород и экранировании их вышележащей толщей повышение температуры приводит к увеличению флюидного давления по принципу автоклавно-го эффекта и обуславливает реакцию дегидратации. Если давление флюида превышает

прочность пород, происходит их разрушение и удаление части флюида. На глубинах в несколько километров в тектонически активных районах горизонтальные напряжения преобладают над вертикальными, и поэтому возникающие трещины отрыва ориентированы в направлении максимальных напряжений, т.е. горизонтально. Низкая сжимаемость воды определяет ее исключительное значение в образовании гидроразрыва, явления, широко используемого в практике промысловых работ: в пластах создаются многие десятки тысяч искусственных гидроразрывов за счет 0.5–0.75 величины горного давления [Еременко, Чилингар, 1996]. Явление гидроразрыва зафиксировано в глубоких скважинах Прикаспийской впадины (Аралсорская и др.). По данным З.А. Кривошеевой, приводимых в [Боревский, Кременецкий, 1985], в зонах гидрогенно-разуплотненных глинистых пород скорость продольной волны понижается на 0.5–1.0 км/с.

### Выводы

1. Горизонты инверсии упругих свойств существуют на всех глубинных уровнях континентальной и океанической коры в районах, имеющих разные геологическое строение и историю развития. Они могут отличаться характером распределения сейсмических свойств и соответственно упруго-деформационными свойствами.

2. Помимо горизонтов инверсии упругих свойств, на пересечениях разломов могут возникать горизонтальные или субгоризонтальные зоны, служащие каналами интенсивного перемещения флюидов.

3. Вероятно, что в нефтегазоносных и рудных районах горизонты инверсии упругих свойств выполняют разные функции: в нефтегазоносных они служат каналами конвекции флюидов; в рудных являются экранами для волн деформаций и напряжений.

### Благодарности

Автор выражает свою признательность Ю.Л. Ребецкому за замечания, позволившие улучшить структуру работы, и за предложение более корректного определения для горизонтальных границ, связанных инверсией скорости.

### Литература

- Белявский В.В., Егоркин, А.В., Солодилов Л.Н., Ракитов В.А., Яковлев А.Г. Некоторые результаты применения методов естественных электромагнитных и сейсмических поле на Северном Кавказе // Физика Земли. 2007. № 4. С.4–14.
- Белявский Н.А. Земная кора в пределах территории СССР. М.: Недра, 1974. 280 с.
- Богацкий В.В. Механизм формирования структур рудных полей. М.: Недра, 1986. 88 с.
- Боревский Л.В., Кременецкий А.А. Рудообразующая роль морфогенных гидротерм // Подземные воды и эволюция литосферы: Материалы Всесоюзной конференции. Т. 2. М.: Наука, 1985. С.179–182.
- Булин Н.К. Слои пониженной скорости сейсмических волн в литосфере океанов. Обзор. ВИЭМС Морская геология и геофизика. М.: Недра, 1982. 47 с.
- Валяев Б.М., Телетин М.А., Бережная Е.А., Вахтангшвили В.Х., Миндорашивили Г.К., Титков Г.А. Корреляция грязевулканической деятельности с солнечной активностью (на примере вулкана Ахтала, Грузия) // Докл. АН СССР. 1980. Т. 255, № 5. С.1204–1207.
- Виноградов В.И. Вертикальная аккреция в свете данных изотопной геохимии // Вертикальная аккреция земной коры: факторы и механизмы. М.: Наука, 2002. С.356–387. (Труды ГИН РАН; Вып. 542).
- Винник Л.П. Сейсмические границы в мантии // Геодинамические исследования. 1992. № 14. С.5–11.

- Гаврилов В.П., Поспелов В.В., Шнип О.А. Происхождение и способы изучения вторичной пустотности гранитоидных пород. Нетрадиционные коллекторы нефти, газа и природных битумов. Проблемы их освоения // Материалы научной конференции. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2005. С.206–211.
- Гутенберг Б. Физика земных недр. М.: Изд-во ИЛ, 1963. 263 с.
- Дмитриевский А.Н., Баланюк И.Е., Каракин А.В. Механизм формирования гигантских скоплений нефти и газа // Приоритетные направления поисков крупных и уникальных месторождений нефти и газа. М.: ООО “Геоинформмарк”, 2004. 224 с.
- Егоркин А.В. Изучение мантии на сверхдлинных геотраверсах // Физика Земли. 1999. № 7/8. С.114–130.
- Еременко Н.А., Чилингар Г.В. Геология нефти и газа на рубеже веков. М.: Наука, 1996. 176 с.
- Жамалетдинов А.А. О дилатантно-диффузионной природе промежуточных проводящих слоев в земной коре по данным каротажа Кольской сверхглубокой скважины и результатам электромагнитных зондирований // Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов: Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции. Апатиты: Геологический институт КНЦ РАН, 2009. С.27–33.
- Кожевников Н.О., Агафонов Ю.А., Антонов Е.Ю. Структура Приольхонья и Приморского разлома по геофизическим данным // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: Тезисы докладов Всероссийской конференции. Т. 2. М.: ИФЗ, 2008. 408 с.
- Кондрашков В.В., Анискович Е.М., Богданов А.Н. Метод параметрической развертки отображений: от концепции до обрабатывающей системы // Геофизика. 1998. № 4. С.21–29.
- Корытов Ф.Я. О критических уровнях механических напряжений в литосфере // Механика литосферы. М.: Наука, 1974. 230 с.
- Кравченко Ю.Б., Смирнов В.Г., Байсарович М.Н., Панасюк Н.И., Шимкив Л.М. Состояние и перспективы сейсморазведки на твердые полезные ископаемые и подземные воды на Украине // Разведочная геофизика. М.: Недра, 1975. Вып. 66. С.6–13.
- Краснопевцева Г.В. Геолого-геофизические особенности слоев с пониженными скоростями в земной коре. Обзор ВИЭМС. Региональная, разведочная и промысловая геофизика. М.: Недра, 1978. 49 с.
- Кузин А.М. Разработка методики прогноза залежей флюидального генезиса по данным сейсмических методов // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1994. Вып. 131. С.396–406.
- Кузин А.М. Некоторые особенности интерпретации волновых полей в зонах разрывных нарушений // Геофизика. 1999. № 5. С.3–15.
- Кузин А.М. Реальная среда и интерпретация сейсмических данных // Геофизика. 2001а. № 2. С.19–28.
- Кузин А.М. Результаты скоростного анализа земной коры и верхней мантии по методу ПРО // Глубинное строение и геодинамика Южного Урала. Проект Уралсейс. Тверь, 2001б. С.106–114.
- Кузин А.М., Ершов П.Н. Новые возможности метода ПРО в изучении палеозойского фундамента Западной Сибири // Геофизика. 1999. № 1. С.24–27.
- Кунин Н.Я., Шейх-Заде Э.Р. Исследование литосферы докритическими отраженными волнами. М.: Наука, 1993. 224 с.
- Ляховский В.А., Мясников В.П. О поведении упругой среды с микронарушениями // Физика Земли. 1984. № 10. С.71–75.
- 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.
- Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования. Материалы Международного научно-практического семинара. Роснедра, ВСЕГЕИ. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. 245 с.
- Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Суродина И.В. Характеристики разломных структур по данным электромагнитных зондирований. Моделирование разломов // Третья тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле”: Тезисы докладов Всероссийской конференции в 2-х томах. Т. 2. М.: ИФЗ РАН, 2012. С.453–456.

- Невский В.А.* Трещинная тектоника рудных полей и месторождений. М.: Недра, 1979. 224 с.
- Николаевский В.Н.* Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984. 232 с.
- Николаевский В.Н.* Тектонические волны Земли // *Природа*. 1991. № 8. С.17–23.
- Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.
- Павленкова Н.И.* О региональной сейсмической границе в самых верхах мантии // *Изв. РАН. Физика Земли*. 1995. № 12. С.1–14.
- Павленкова Н.И.* Сейсмические границы земной коры и верхней мантии и их геологическая интерпретация // *Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты*. Т. II. М.: Изд-во Межведомственного тектонического комитета РАН (ГИН) и МГУ (Геолфак), 1998. С.25–32.
- Ребецкий Ю.Л.* Об одном новом источнике энергии тектонических процессов // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2013. № 1. Вып. 21. С.132–137.
- Резанов И.А.* Эволюция представлений о земной коре. М.: Наука, 2002. 299 с.
- Семашев Р.Г., Кузьминов В.А., Салина Л.С.* О гидродинамических особенностях формирования палеозойских залежей Новопортовского ГКНМ // *Нефтегазовая гидрогеология на современном этапе (теоретические проблемы, региональные модели, практические вопросы)*. М.: ГЕОС, 2007. С.241–257.
- Спичак В.В.* Электромагнитное зондирование геотермальных зон: новые горизонты // *Геофизика*. 2008. № 1. С.50–67.
- Спичак В.В., Захарова О.К.* Оценка глубинных температур в геотермальной области Сульц-су-Форе, Франция, по данным магнитотеллурических зондирований // *Геофизика*. 2011. № 1. С.54–60.
- Эз В.В.* Образование и уничтожение неоднородностей в ходе развития метаморфических комплексов // *Неоднородность тектоносферы и развитие земной коры* / Под ред. В.В. Белоусова, В.Н. Шолпо, В.Н. Рейснер. М.: Недра, 1986. 231 с.

*Сведения об авторе*

**КУЗИН Алексей Михайлович** – ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН. 119991, Москва, ул. Губкина, д. 3. Тел.: (499)-943-35-62. E-mail: amkouzin@yandex.ru

## HORIZONS OF INVERSION OF ELASTIC CHARACTERISTICS OF THE GEOLOGICAL MEDIUM REVEALED BY SEISMIC DATA

А.М. Kouzin

*Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**Abstract.** This paper discusses the wide-spread occurrence of horizons of inversion of elastic characteristics in the geological medium. They are observed in the upper mantle and the Earth's crust. One of their distinctive features is their extension that can reach hundreds of kilometers.

We discuss the possible nature of such horizons, and their role in transformation of the oceanic Earth's crust into continental, fluid convection, and deformation shielding.

**Keywords:** horizons of inversion of elastic characteristics in the geological medium, interpretation, seismic data.