РЕЗУЛЬТАТЫ КАРОТАЖНЫХ РАБОТ (ГИС) – КАК ОСНОВА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАССЛОЕНИЯ ВНЕШНЕЙ ОБОЛОЧКИ ЗЕМЛИ

Ильченко В.Л.

Геологический институт КНЦ РАН, Анамуты, vadim@geoksc.apatity.ru

Для изучения глубинного строения Земли используются дорогостоящие и трудоемкие методы: проходка параметрических (в т.ч. глубоких и сверхглубоких) скважин [11], а также сейсмологическое профилирование на суше и морском шельфе (МОГТ, ГСЗ и т.п. [2]). Тем не менее, к настоящему времени в Мире пройдено не так уж много сверхдлинных профилей глубинного сейсмозондирования, не говоря уже о сверхглубоких скважинах. При этом количество рядовых «мелких» скважин вряд ли поддается учету и почти любая из них доступна для проведения комплекса каротажных работ, – геофизического исследования скважин (ГИС), причём во многих скважинах такие работы уже проведены. Большинство методов ГИС, так или иначе, отражает динамические характеристики пород – напряжённо-деформированное их состояние в околоскважинном пространстве, т.е. графики ГИС могут служить индикаторами геодинамических условий во вмещающем скважину фрагменте земной коры. Результаты ранее проведенных в этом направлении исследований позволяют с высокой вероятностью делать прогноз динамических условий в породах земной коры на глубину, многократно превышающую глубину забоя исследуемой скважины.

Модель тектонического расслоения земной коры Печенгского блока

Механизм тектонического расслоения земной коры как твердой колебательной системы, предложен после изучения физических свойств керна Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) и в ходе создания геолого-геофизической модели строения земной коры Печенгского блока (Балтийский щит) [4, 5]. Механизм расслоения основан на предположении, что лунный прилив, на квантовом уровне, регулярно превращает оболочку Земли в колебательную систему, затухающую в динамических условиях стоячей волны. Стоячая волна в натянутой струне затухает (т. е. колебание струны прекращается) в дискретном, пошаговом, ритме с установлением на ней множества неподвижных узловых точек: первый узел (исключая пару неподвижных узлов на концах струны – в точках крепления) появляется в середине струны (длина струны L = длине волны λ), разделяя струну пополам, а волну на две полуволны ($\lambda/2$); затем в середине каждой из этих полуволн возникают новые узлы и т. д. [8]; т.е. все происходит по закону: $\lambda_n = \lambda_0/2^n$ (n – № моды: 0, 1, 2, все целые числа, λ_n – длина n -й моды – расстояние между соседними узлами, λ_0 – длина волны). Затухание звука в натянутой струне, в принципе, аналогично затуханию стоячей волны в породах земной коры, где оно также сопровождается развитием системы неподвижных узлов, к которым «отжимается» часть напряжений из пород в колеблющихся зонах пучностей; в итоге все эти узлы постепенно превращаются в концентраторы избыточно высоких напряжений [3]. По стволу скважины, в районе этих узлов наблю-

Рис. 1. Этапы выбора «конечной моды» (а, б) и измерения (в) ее длины – в идеальном случае.

дается увеличение диаметра ствола – следствие породных вывалов. Так, с развитием системы узлов создаются идеальные условия для тектонических границ.

Глубины модельных границ расслоения земной коры Печенгского блока рассчитаны по формуле: $M_n = M_0 / 2^n$, n – № моды, M_n – длина n -й моды расслоения, $M_0 = 42 \pm 2$ км – мощность земной коры Печенгского блока. Итоги моделирования с большим количеством подробной сопутствующей информации описаны в [4, 5] (и ссылки там).

Механизм тектонического расслоения позволяет рассчитывать мощность земной коры (глубину залегания границы Мохо) и параметров расслоения от длины конечной моды (M_k) – «в обратном порядке», по формуле $M_0 = M_n \cdot 2^n$ ($M_n = M_k$); длину M_k можно получить по кривым ГИС (профилеметрия и др.) измерением расстояния между двумя соседними переломными точками на участке кривой, полученной в интервале однородных по гранулометрическому и минеральному составу пород (рис. 1).

Таблица. Длины мод тектонического расслоения земной коры М5-М14, рассчитанные от целых значений M_0 в интервале 32-44 км – для определения номера (n) конечной моды M_k .

M_0 , км	М5, м	М6, м	М7, м	М8, м	М9, м	М10, м	М11, м	М12, м	М13, м	М14, м
32	1000	500	250	125	60.25	30.12	15.06	7.8	3.9	1.95
33	1030	515	257	128.5	64.2	32.19	16.1	8.04	4.02	2.01
34	1060	530	265	132.5	66.25	33.12	16.56	8.28	4.14	2.07
35	1093	546	273	136.6	68.3	34.15	17.08	8.54	4.27	2.13
36	1125	562	281	140.5	70.25	35.12	17.58	8.79	4.39	2.20
37	1156	578	289	144.5	72.25	36.12	18.06	9.03	4.51	2.26
38	1185	592	296	148	74.06	37.03	18.52	9.26	4.63	2.31
39	1219	609	305	152.5	76.19	38.09	19.05	9.52	4.76	2.38
40	1250	625	312	156	78.12	39.06	19.53	9.76	4.88	2.44
41	1281	640	320	160	80.06	40.03	20.01	10.01	5.00	2.50
42	1312	656	328	164	82	41	20.5	10.25	5.125	2.562
43	1344	672	336	168	84	42	21	10.5	5.25	2.62
44	1375	687.5	343.7	171.9	85.9	43	21.5	10.7	5.37	2.69

Идеальные условия (как на рис. 1) для измерения M_k встречаются довольно редко, что обусловлено неизбежными искажениями во время рисовки графиков и непредсказуемостью пространственных вариаций физических свойств горных пород в земной оболочке. Поэтому гораздо проще считать вывалы в относительно однородном породном интервале стандартной длины (например, 100 м) и делить эту длину на количество вывалов. Номер измеренной по результатам ГИС моды M_k определяют сравнением ее длины с модельными значениями в столбцах таблицы, которые вычислены из возможных целочисленных значений мощности земной коры M_0 в интервале 32-42 км. Возможность расчёта в обратном порядке доказывает анализ данных профилеметрии СГ-3 из [6] (рис. 2).

Прямым подсчётом на рисунке 2 установлено: интервал а) содержит 12, а интервал б) – 24 породных вывала. Размер M_k получен делением мощности интервала (1 км) на количество вывалов: для интервала а) $M_k = 83.33(3)$ м, что, согласно таблице, соответствует моде М9, для интервала б) $M_k = 41.66(6)$ м, т. е. это мода М10 (табл.); при подстановке этих значений в формулу $M = M_n \cdot 2^n$ получаем мощность $M_0 \approx 42.67$ км (глубина границы Мохо в устье СГ-3). Сравнение динамического разреза СГ-3 с моделью расслоения, рассчитанной от $M_0 \approx 42.67$ км, показало увеличение точности попадания границ модели в интервалы с динамическими проявлениями (вывалами пород) до 96.4 %.

Проверка этого способа на материалах ГИС Уральской сверхглубокой скважины СГ-4 с вычислением мощности земной коры в её устье дала: $M_0 = 46.7$ км, что мало отличается от глубины залегания границы Мохо в устье СГ-4, полученной сейсмологами: $M_0 \approx 47$ км [12]. Проверка этого же способа расчета глубин залегания границы Мохо, проведенная на трех нефтегазоносных площадях Калининградской области (даже по сводным разрезам) дала вполне удовлетворительные результаты [4].

Рис. 2. Анализ фрагментов разреза СГ-3.

- а) актинолитизированные диабазы, интервал глубин 3-4 км;
б) биотит-плагиоклазовые гнейсы, интервал глубин 8-9 км (из [6]).

Мощность земной коры Баренцево-Карского региона

Современная изученность глубинного строения земной коры Баренцево-Карского региона (потенциально крупной нефтегазоносной провинции) основана, главным образом, на результатах сейсмологических исследований по профилям ГСЗ-82 и МОВ-ОГТ: 1-АР и 2-АР [2, 7, 9 и др.]. Профили 1-АР и 2-АР пройдены по периферии Южно-Баренцевской впадины, которую трассирует лишь профиль ГСЗ-82. Эти исследования принесли много новых данных о строении земной коры и об истории формирования региона. В частности установлено, что глубина границы Мохо здесь варьирует от 30 до 45 км, мощность земной коры сокращается в северном направлении (по профилю 1-АР) [2]. В грабенообразных структурах эта граница поднимается (до 30-37 км), а наименьшие ее глубины зафиксированы в Северо-Баренцевской впадине и наиболее погруженной части Южно-Карской синеклизы [2].

Как уже было сказано, строение земной коры в пределах Южно-Баренцевской впадины характеризует, главным образом, профиль ГСЗ-82. В этой впадине пробурено много скважин с проведением ГИС, что можно проанализировать упомянутым выше способом. На траверзе профиля ГСЗ-82 расположена Арктическая структура, где пройдена разведочная скважина Арктическая-1. По результатам ГИС из этой скважины, в четырех глубинных интервалах измерена длина M_k с вычислением глубины границы Мохо (M_0); результат вычислений (средняя глубина $M_0 \approx 36.02$ км) совпал с сейсмологическими данными ($M_0 = 35-38$ км) из [7].

Помимо скважины Арктическая-1, аналогичные измерения проведены по данным ГИС из еще семискважин: Крестовая-1 ($M_0 = 35.31$ км), Лудловская-2 ($M_0 = 34.87$ км), Мурманская-24 ($M_0 = 35.62$ км), Приразломная-1 ($M_0 = 34.12$ км), Северо-Кильдинская-80 ($M_0 = 34.12$ км), Северо-Мурманская-1 ($M_0 = 37.94$ км), Штокмановская-1 ($M_0 = 35.82$ км).

По мере проведения эксперимента, в половине скважин возникла проблема, связанная с вариациями длин конечных мод (M_k) из разных глубинных интервалов в пределах одной скважины. В первую очередь эти вариации связаны с отклонением скважин от вертикали во время их проходки, что случается довольно часто. Отклонение от вертикали «удлиняет» измеряемую моду: вместо $|M_k|$ получаем $|M_k''| > |M_k|$. Если в скважине велась инклинометрия, проблему можно решать «геометрически»: $|M_k| = |M_k''| \cdot \cos \alpha$, α – угол отклонения скважины от вертикали; но, проще – выбрать минимальное значение M_k из нескольких интервальных.

По итогам этой работы, подошва земной коры Южно-Баренцевской впадины (граница Мохо) имеет волнообразную форму с вариациями глубин 34-38 км, что не противоречит результатам сейсмологических исследований по профилям АР-1 и АР-2 [2]. Таким образом, способ вычисления мощности земной коры по длине конечной моды M_k , определенной по каротажным кривым, дает вполне достоверные результаты и его можно уверенно применять на практике, поскольку модельные сред-

ние значения мощности земной коры пригодны для построения моделей тектонического расслоения как вполне реальные.

Заключение

Тест механизма тектонического расслоения земной коры как колебательной системы на материалах ГИС из 8 скважин, пройденных в осадках на шельфе Южно-Баренцевской впадины, завершён успешно. Полученные результаты подтверждают универсальность предложенного механизма тектонического расслоения и открывают новые возможности для построения соответствующих моделей внешней оболочки Земли по результатам каротажных данных как из «сухопутных», так и из морских скважин.

Работа выполнена в рамках темы НИР ГИ КНЦ РАН № 0231-2015-0006.

Литература

1. Богданова В.В., Рахимов И.Р. Применение генетического алгоритма для поиска похожих участков на каротажных кривых // Российский геофизический журнал. 2006. № 43, 44. С. 124-128.
2. Верб М.Л., Иванова Н.М., Кацев В.А., Рослов Ю.В., Сакулина Т.С., Телегин А.Н. Результаты сейсмических исследований по опорным профилям АР-1 и АР-2 в Баренцевом и Карском морях // Разведка и охрана недр. 2001. № 10. С. 3-7.
3. Ильченко В.Л. Физическое моделирование напряженного состояния и деформаций в нагружаемой твердой среде, находящейся под воздействием ультразвуковых стоячих волн // Тр. Всероссийского совещания «Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы». Новосибирск. Изд-во СО РАН, Филиал «Гео». 2003. С. 49-53.
4. Ильченко В.Л. Космические факторы (влияние Луны и Солнца) в геодинамике и возможность их применения в нефтегазовой отрасли (для некоторых видов прогноза) / Новые идеи в геологии нефти и газа – 2015. Сб. трудов (матер. междунаучно-практ. конф.) на CD. Электронное издание // Отв. ред. А.В. Ступакова. Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова. 2015. С. 33-36.
5. Ильченко В.Л. Квантование лунной гравитации (энергии приливной волны) в земной оболочке и «квантовая» основа силы упругости // Вестник КНЦ РАН. 2017. № 1 (9). С. 34-42.
6. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. М.: МФ «Технонефтегаз». 1998. 260 с.
7. Морозова Е.А., Павленкова Н.И., Хербст Р. Сейсмическая модель земной коры юго-восточной части Баренцева моря и проблемы неоднозначности её построения // Физика Земли. 1995. № 2. С. 73-83.
8. Пономарев Л.И. Под знаком кванта. 2-е изд., испр. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1989. 368 с.: ил.
9. Сакулина Т.С., Рослов Ю.В., Иванова Н.М. Глубинные сейсмические исследования в Баренцевом и Карском морях // Физика Земли. 2003. № 6. С. 5-20.
10. Сальников А.С. Сейсмогеологическое строение земной коры платформенных и складчатых областей Сибири по данным региональных сейсмических исследований преломлёнными волнами / Автореф. на соиск. уч. ст. дгмн. Новосибирск. 2008. 32 с.
11. Сверхглубокие скважины России и сопредельных регионов. Роскомнедра, РАН, ВСЕГЕИ, ГНПП «Недра». СПб. 1995. 247 с.
12. Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE. М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС. 2006. 736 с. (РОСНЕДРА, РАН, ГЕОКАРТ).