

О пространственных вариациях анизотропии упругих свойств горных пород в верхней части литосферы

В. Л. Ильченко

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

Получено 31 марта 2010; опубликовано 5 июня 2010.

Сопоставлены результаты изучения пространственных вариаций напряженно-деформированного состояния и показатели анизотропии упругих свойств керна Кольской сверхглубокой (СГ-3) и некоторых других скважин с аналогичными вариациями анизотропии упругих свойств образцов горных пород, отобранных по профилям с земной поверхности. Установлено, что пространственное распределение анизотропии упругих свойств керна и образцов с поверхности описывается кривыми, весьма сходными с графиками гармонических колебаний. Натурные наблюдения сопоставлены с результатами экспериментов по изучению воздействия стоячих волн на природные твёрдые среды. Сделаны выводы о наличии волнового контроля над литосферными геодинамическими процессами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: акустополаризационный метод; анизотропия; напряженно-деформированное состояние

Ссылка: Ильченко В. Л. (2010), О пространственных вариациях анизотропии упругих свойств горных пород в верхней части литосферы, *Вестник ОНЗ РАН*, 2, NZ6014, doi:10.2205/2010NZ000032, 2010

Введение

Широкомасштабные исследования анизотропии упругих свойств пород начались в Геологическом институте Кольского НЦ РАН после изобретения методики акустополарископии (аналог поляризационного оптического метода) и проводились они, главным образом, на керне СГ-3 и некоторых других глубоких скважин [Горбацевич, 1995], в результате чего были установлены существенные вариации в значениях упругой анизотропии керна по вертикали. Оказалось, что каротажные графики кавернограмм (вариации диаметра скважины по вертикали, или объём вывалов пород из стенок скважины) повторяют кривые распределения значений показателей анизотропии, а образцы керна из аварийно-опасных участков отличаются максимальными значениями этих показателей [Горбацевич, 1995]. Иначе говоря, распределение показателей упругой анизотропии керна прямо связано с пространственными вариациями напряженно-деформированного состояния горного массива и вызвано разгрузкой от влияния напряжений – тектоно-кессонным эффектом или дилатансией [Горяинов и др., 1992]. Установлено также, что проявление дилатансии как в керне, так и в стенках скважины не имеет прямой зависимости от глубины [Кольская..., 1998], а высота столбиков керна (из архейской части разреза) отличается вариациями с тенденцией к сокращению с глубиной по закону затухающего колебания [Горбацевич, 1997]. Сходные факты о волнообразном характере распределения физических свойств отражены и в других публикациях, например: в вариациях по разрезу поля напряжений, определённых методом гидроразрыва в глубокой Немецкой (КТВ) скважине [Brudy et al., 1997] и в вариациях по разрезу показателей анизотропии упругих свойств керна в Финской (ОДВ) [Горбацевич и др., 2006] скважине.

Обобщенные результаты предыдущих исследований

Более детальное изучение упругой анизотропии керна СГ-3 показало, что глубинные интервалы с максимальными размерам вывалов являются тектоническими зонами. Эти зоны локализованы на глубинах: 1.7-1.9 км (сдвиг с внедрением базитов и медно-никелевым оруденением) [Горбацевич и др., 1997], 4.43-6.84 км – зона Лучломпольского разлома (здесь

породах широко катаклазированы и затем мигматизированы) [Ильченко и др., 2005]. В приграничной зоне между архейским фундаментом и протерозойским комплексом (~6.84 км) размеры вывалов и показатели анизотропии максимальны. Ниже, до глубины ~9.45 км эти показатели монотонно снижаются. Глубже ~9.45 км и до забоя (12.261 км) объёмы вывалов и показатели анизотропии резко возрастают до значений, типичных для интервала 4.43-6.84 км. Породы интервала 9.45-12.26 км обладают пониженной прочностью и аномально высокими скоростями проходки: буровой инструмент оказался здесь в период вяло текущей структурной перестройки пород, вызванной сменой (и суперпозицией) поля напряжений [Ильченко и др., 1999].

На образцах из эталонной коллекции СГ-3, отобранных по всему разрезу от устья до забоя скважины, были проведены исследования вариаций их упругих свойств (ультразвуковыми продольными и поперечными волнами) с приложением нагрузок в 3-х направлениях. Этими исследованиями было установлено наличие своеобразной расслоенности (рис.1,а), которая заключается в чередовании в разрезе близких по мощности интервалов с разуплотнением зерна либо в субвертикальном, либо в субгоризонтальном направлении [Ильченко, 2000]. Природа расслоенности такого типа может быть объяснена длительным нахождением горных пород под воздействием силового поля, пространственные вариации значений (главных составляющих) которого контролировались процессом с динамическими особенностями стоячей волны (узлы, пучности). Именно длительное воздействие силового поля на породы необходимо для подготовки горного массив к тектоническому событию, в результате которого происходит расслоение со всеми его иерархическими подразделениями на отдельные толщ (плиты, пластины, чешуи и т.д.). Эти продукты расслоения, в свою очередь, могут также оказаться расслоенными на ещё более мелкие элементы, сохраняющие единство пространственного положения совокупности структурных признаков породы (текстуры, системы микротрещин) и определяющие соотношение сил, составляющих структуру (геометрию) силового поля.

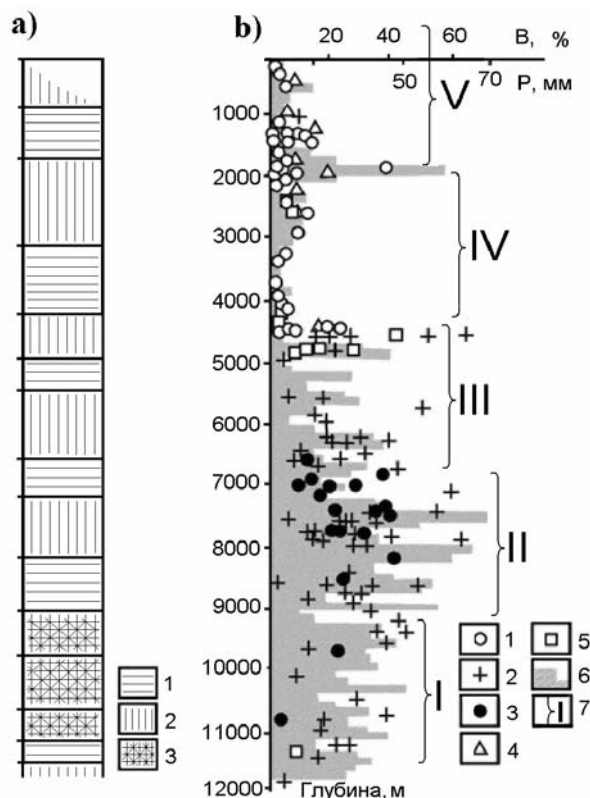


Рис.1. Расчленение разреза СГ-3 на тектонические пластины: а) по преобладающим направлениям разуплотненности образцов зерна: 1 – субгоризонтально, 2 – субвертикально, 3 – зона аномально высоких скоростей проходки, обусловленная суперпозицией полей напряженного состояния (из [Ильченко, 2000] с уточнениями); б) по вариациям показателей упругой анизотропии (V) и объёмов вывалов из стенок скважины - 1 – диабазы, 2 – амфиболиты, 3 – гнейсы, гнейсограниты, 4 – филлиты, туфы, 5 – метасадки, 6 – средний интервальный диаметр скважины, 7 – тектонические пластины (из [Горбацевич, 1995] с дополнениями).

В общем, на основании пространственных вариаций анизотропии упругих свойств, вскрытый СГ-3 разрез, в первом приближении, можно представить в виде пачки из четырёх сходных по мощности (~2.6 км) тектонических пластин, которые также расслоены на более мелкие элементы, перекрытый сверху пластиной мощностью ~1.8 км (рис.1, b). Схожие черты строения этих тектонических пластин дают основание предполагать, что расслоение возникло в результате ряда событий (одного (?) события), подготовленных единым процессом, контролирующим распределение литостатического поля напряжений по разрезу. Судя по консервативности и продолжительности воздействия, в основе этого подготовительного процесса лежат фундаментальные законы Природы.

Затем было проведено сравнение физических свойств керна СГ-3 [Ильченко, 2007] и его пород-аналогов из обнажений с поверхности в районе заложения скважины (для протерозойского печенгского вулканогенно-осадочного комплекса) и из обрамляющих печенгскую структуру породных комплексов архейского кристаллического фундамента (площадь, значительно превосходящая по размерам печенгский комплекс).

Для керна СГ-3 из зоны Лучломпольского разлома и пород-аналогов с поверхности (отобранных по пройденному поперёк зоны разлома профилю) [Ильченко, 2009], в проявлении напряженно-деформированного состояния (объёмы вывалов, анизотропия керна) в скважине и по профилю (анизотропия) общим признаком также является волнообразность в вариациях показателей анизотропии упругих свойств. Различие состоит лишь в том, что на поверхности волна вариаций анизотропии «затухает» по мере сокращения мощности надвинутого тектонического клина (рис.2).

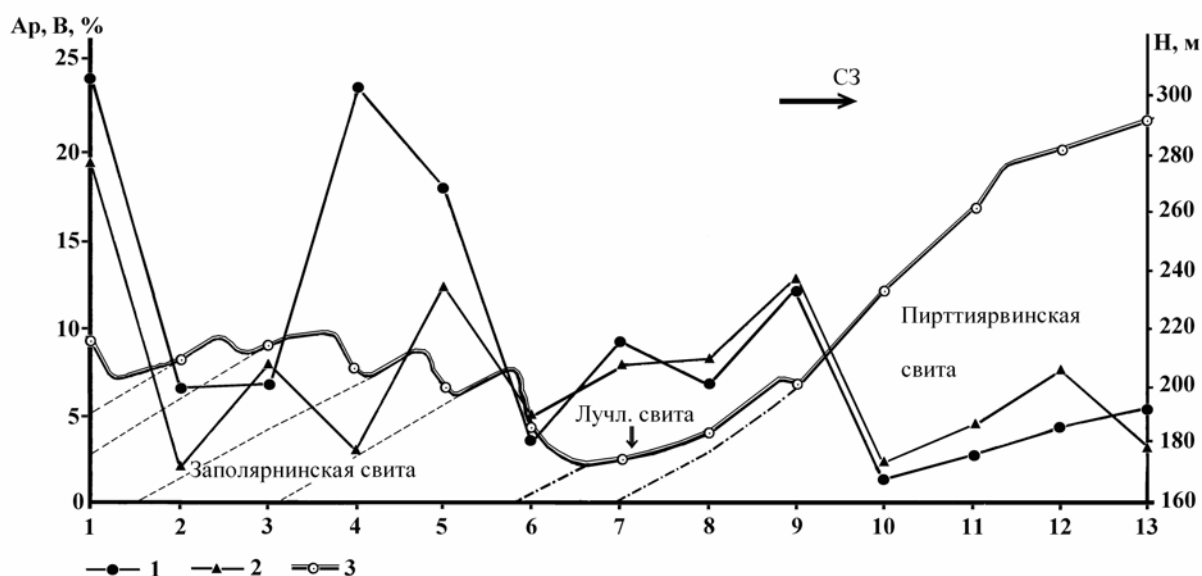


Рис.2. Вариации показателей анизотропии (1-А, 2-В) образцов (3 рельеф вдоль профиля и точки отбора образцов) вдоль профиля поперёк Лучломпольского разлома на поверхности. Штрихпунктирными линиями на рисунке показаны границы свит.

Проведено исследование анизотропии упругих свойств образцов, собранных с 200-метровым интервалом по пройденному субширотно 22-километровому профилю через два (Лиинахамарский и Суормусский) смежных геоблока архейского возраста из обрамления Печенгской структуры (рис.3) [Ильченко, 2010].

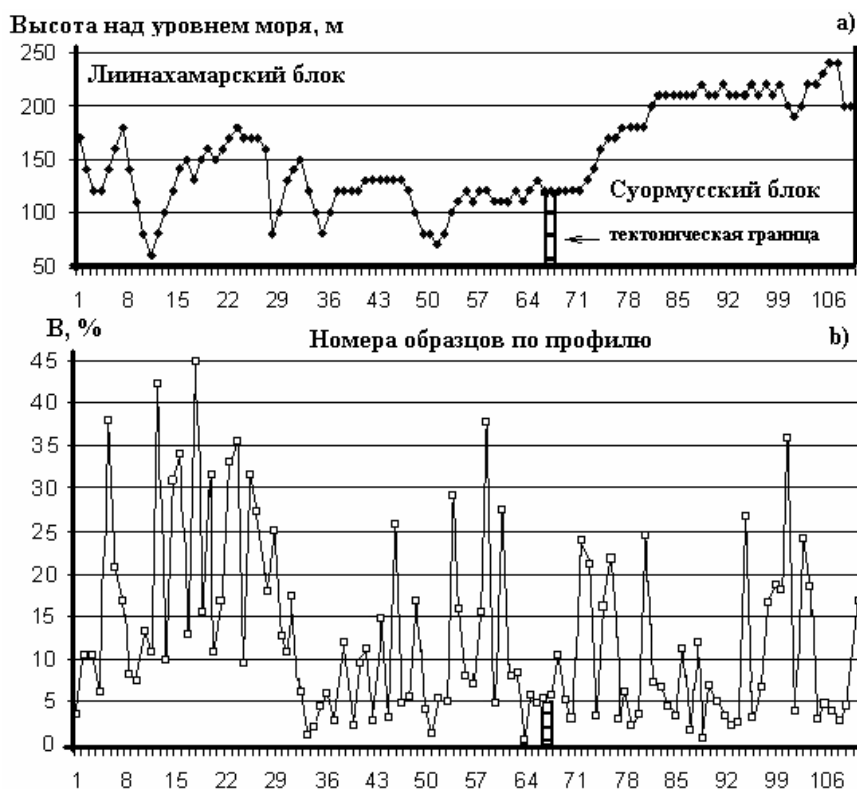


Рис.3. Вариации высотных отметок отбора (а) и величин V - показателей упругой анизотропии (b) (по скоростям распространения поперечных волн) образцов-аналогов керна СГ-3 из архейской части разреза, отобранных по субширотному ориентированному 22-км профилю.

Это исследование показало, что, во-первых, волнообразность в распределении показателей анизотропии упругих свойств пород вдоль профиля индивидуальна для каждого геоблока, откуда также следует, что силовое воздействие на породы каждого геоблока избирательно и консервативно; во-вторых, величина показателя анизотропии упругих свойств обратно пропорциональна высоте точки отбора образца (над уровнем моря). Чем больше в породе деформаций, тем выше степень анизотропии и, соответственно, тем легче она разрушается, реализуясь в денудационных формах рельефа.

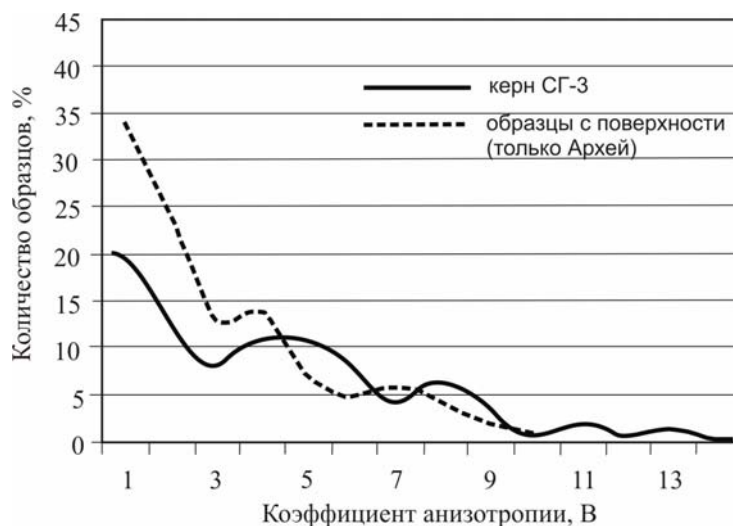


Рис.4. Волновое распределение по величине показателя анизотропии упругих свойств V образцов керна СГ-3 и их аналогов с поверхности: 1 – 0-0.05, 2 – 0.05-0.1, ..., 13 – 0.6-0.65 (%).

Волнообразное распределение по величине показателей анизотропии упругих свойств В образцов керна СГ-3 и их аналогов с поверхности (рис.4) схоже с разложением на линейчатый спектр (обертонны) сложного колебания (рис.5).

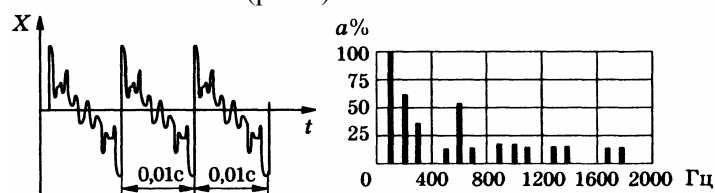


Рис.5. Акустический спектр ноты (взятой на пианино), который представляет собой сложное колебание [Курс..., 2002].

Обсуждение результатов

На основании достаточно большого числа систематических наблюдений и измерений упругой анизотропии образцов керна и горных пород с поверхности, ранее уже был сделан вывод, что как в недрах горных массивов, так и на поверхности вариации их анизотропии упругих свойств подчиняются одним и тем же закономерностям. Закономерности таковы, что: 1) каждый геоблок обладает уникальными пространственными вариациями показателей анизотропии упругих свойств пород и 2) это распределение, в большинстве случаев, описывается графиками, имеющими вид квазигармонических колебаний как для керна, так и для образцов, отобранных по профилям с поверхности. Волнообразное распределение анизотропии упругих свойств в горных массивах даёт повод предполагать наличие здесь некоего, контролирующего их геодинамическую эволюцию, колебательного процесса и, по-видимому, обуславливается автоколебательными процессами в литосферных блоках. Консервативность волнового воздействия также предполагает, что автоколебательные системы в геоблоках представляют собой поля стоячих волн, существующие с момента обособления (в их границах) на протяжении всей истории существования этих геоблоков. Этой же консервативностью могут быть обусловлены, по-видимому, случаи геодинамической «унаследованности» вроде появления «новых» геологических структур на месте «старых».

Идея о волновом контроле над геодинамическими процессами не противоречит законам природы и наглядно доказана экспериментом Э.Ф.Ф.Хладни (1787 г.) с получением т. н. «фигур Хладни». В этих фигурах происходит визуализация узлов и пучностей стоячей волны, возбуждаемой в плоской мембране. Общий рисунок фигур зависит от формы пластины, положения опор и частоты вибрации. Системы стоячих волн могут возникать почти в любом ограниченном непустом пространстве при условии постоянной энергетической подпитки извне. В качестве такого энергетического источника для поддержания волновых полей в литосфере могут быть рассмотрены, к примеру, приливные волны [Добролюбов, 2003].

Контролирующая тектонические процессы (расслоение твёрдых сред) роль стоячих волн была подтверждена экспериментальной работой по разрушению под действием одноосного нагружения образцов горных пород, находящихся под воздействием стоячей волны [Ильченко, 2002]. Образцы разрушались с образованием текстуры «cone-in-cone», причём толщина «слоёв» в форме образуемых системами микротрещин вложенных пластин конической формы была близкой к длине контролирующей процесс разрушения стоячей волны.

Расчленение разреза СГ-3 на пять (четыре из которых имеют одинаковую мощность: ~2.6 км) тектонических пластин (малую мощность (~1.8 км) верхней (V, рис.1) пластины можно отнести к последствиям ледниковой эрозии поверхности Балтийского щита) позволяет сделать предварительные выводы: 1) тектоническое расслоение верхней части литосферы на близкие по мощности пластины является следствием геодинамического процесса, протекающего под контролем единого литосферного волнового поля; 2) каждый литосферный блок, в той или иной мере, является колебательной системой (аналогом резонатора с низкой добротностью) и вся динамика его внутренних процессов также контролируется своим волновым полем.

В этой связи тектонические события (разрушение или расслоение, например) в пределах геоблоков могут происходить в периоды достижения резонансных критических значений, их «переполнения» упругой энергией с переходом её в энергию акустических сигналов. Горная порода геоблока превращается в акустически активную среду, работающую на этапе разрушения как автоколебательная система (своеобразная «геомеханическая лазерная

система») [Современная..., 2008], которая предполагает возникновение полей стоячих волн, контролирующих пространственно (выбор размера тектонических пластин и локализации интервалов заложения сдвиговых зон) разрушительные геодинамические силовые процессы.

А поскольку не существует двух одинаковых геоблоков, то нет и одинаковых волновых полей, под контролем которых могут возникать вариации пространственного распределения в породах различных физических (в том числе упругих) свойств. Таким образом, можно полагать, что геодинамическое развитие каждого конкретного геоблока должно отличаться уникальными особенностями, которые, тем не менее, должны накладываться на единые для всех блоков физические свойства, обусловленные общностью глобальных процессов в рамках единой геодинамической эволюции литосферы.

Выводы

Под волновым контролем находятся пространственные вариации напряженно-деформированного состояния литосферы, которое, в свою очередь, так или иначе, управляет динамикой всех физических процессов в литосфере. Соответственно, под волновым контролем находятся пространственные миграции флюидов (все формы существования углеводородов и растворы минеральных солей). Таким образом, информация о структурах волновых полей литосферных блоков может быть с немалой пользой востребована изыскателями, занятыми в разных направлениях наук о Земле. Создание методики, позволяющей проводить диагностику волновых полей литосферных блоков, представляется актуальнейшей задачей.

Возможно, для диагностики волновых полей отдельных геоблоков будут не лишними сведения о пространственных вариациях показателей анизотропии упругих свойств горных пород. Методически, основа такого рода диагностики, может представлять собой что-то вроде спектрального анализа пространственных вариаций показателей анизотропии упругих свойств образцов керна и пород с поверхности, измеренных в достаточном количестве.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 07-05-00100.

Литература

- Горбацевич Ф. Ф. (1995), *Акустополарископия горных пород*, Изд-во Кольского НЦ РАН, Апатиты.
- Горбацевич Ф. Ф. (1997), *Определение величин скорости распространения упругих волн в анизотропных образцах малых размеров. Методические рекомендации*, Изд-во Кольского НЦ РАН, Апатиты.
- Горбацевич Ф. Ф., В. Л. Ильченко, Ю. П. Смирнов (2000), Геодинамическая обстановка в интервале 1.7-1.9 км Кольской сверхглубокой скважины, *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, №1, 70-77.
- Горбацевич Ф. Ф., М. В. Ковалевский, О. М. Тришина (2006), Особенности упругой симметрии кристаллических пород в разрезе финской скважины Оутокумпу, *Минералогия во всем пространстве сего слова. Труды III Ферсмановской научной сессии, посв.50-летию Кольского отделения РМО*, Изд-во «К & М», Апатиты, 154-157.
- Горяинов П. М., И. В. Давиденко, Ф. Ф. Горбацевич и др. (1992), Теоретические и экспериментальные основы тектоно-кессонного эффекта (явление дезинтеграции), геодинамические следствия, *Глубинное строение и геодинамика кристаллических щитов европейской части СССР*, Апатиты, 136-144.
- Добролюбов А. И. (2003), *Бегающие волны деформации. Изд. 2-е, испр.*, Едиториал УРСС, Москва.
- Ильченко В. Л., Ф. Ф. Горбацевич, Ю. П. Смирнов (2005), Анизотропия упругих свойств керна и состояние пород околоствольного массива Кольской сверхглубокой скважины в зоне Лучломпольского разлома, *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, №3, 1-11.
- Ильченко В. Л., Ф. Ф. Горбацевич, Ю. П. Смирнов (1999), Упругая анизотропия образцов керна Кольской сверхглубокой скважины из интервала 8.7-11.4 км, *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, №3, 151-159.

ИЛЬЧЕНКО: О ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВАРИАЦИЯХ УПРУГОЙ АНИЗОТРОПИИ

- Ильченко В. Л. (2000), Природа упругой анизотропии керна Кольской сверхглубокой скважины, *Автореферат канд. дисс.*, С.-Пб.
- Ильченко В. Л. (2010), О вариациях плотности и анизотропии упругих свойств архейских пород в приповерхностном залегании (на примере Центрально-Кольского мегаблока, Балтийский щит), *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, №1, 73-79.
- Ильченко В. Л. (2007), О плотностных и упруго-анизотропных свойствах пород Кольской сверхглубокой скважины и их поверхностных гомологов, *Вестник МГТУ (Мурманский гос. тех. университет)*, 10, 251-255.
- Ильченко В. Л. (2009), О результатах изучения анизотропии упругих свойств горных пород из зоны Лучломпольского разлома (Печенгский район, Кольский полуостров), *Физика Земли*, №3, 64-72.
- Ильченко В. Л. (2002), Результаты экспериментального исследования ультразвукового воздействия на упругие свойства осадочных горных пород под нагрузками, *Труды Нижегородской акустической научной сессии*, ННГУ, 346-348.
- Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований*, (1998), ТЕХНОНЕФТЕГАЗ, Москва.
- Новопашин М. Д. (ред.) (2008), *Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования*, Изд-во СО РАН, Новосибирск, 148.
- Ремизов А. Н., А. Я. Потапенко (2002), *Курс физики. Учебник для вузов*, Дрофа, Москва.
- Brudy M., M. D. Zoback, K. Fuchs, F. Rummel, J. Baumgartner (1997), Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength, *Journ. of Geoph. Res*, 102, 18453-18,475.

В. Л. ИЛЬЧЕНКО Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Тел: 8 1555 79-626;
Факс: 8 1555 76481, e-mail: vadim@geoksc.apatity.ru