

О возможной связи морфологии гальки в районе губы Завалишина с упруго-анизотропными свойствами слагающих её пород (экспериментальные данные)

Мирошникова Я.А., Ковалевский М.В., Тришина О.М., Нерадовский Ю.Н.

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, miroshnikova@geoksc.apatity.ru; koval@geoksc.apatity.ru

Аннотация. Впервые изучены петрофизические свойства яйцевидной гальки белокаменных пляжей Кольского полуострова. Яйцевидная галька составляет около 30 % валунно-галечного материала, который представлен обломками древних пород Балтийского щита. Проведена оценка упруго-анизотропных свойств плагиогранитов и кварцевых диоритов, слагающих гальку, с использованием акустополаризационного метода: определена их плотность и средние показатели продольных и поперечных волн. Для определения ориентировки компонентов напряжений были рассчитаны модули Юнга. Полученные результаты показали, что подобные условия сформированных напряжений соответствуют образованию яйцевидной формы гальки.

Ключевые слова: яйцевидная галька, упруго-анизотропные свойства, каменные пляжи, Кольский полуостров.

On the possible connection of the pebble morphology in the Zavalishin Bay area with the elastic-anisotropic properties of rocks composing it (experimental data)

Miroshnikova Ya.A., Kovalevsky M.V., Trishina O.M., Neradovsky Yu.N.

Geological Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, miroshnikova@geoksc.apatity.ru; koval@geoksc.apatity.ru

Abstract. Petrophysical properties of egg-shaped pebbles of the Kola Peninsula white-stone beaches were studied for the first time. Egg-shaped pebbles make up ca. 30 % of the boulder-pebble material, which is represented by fragments of ancient rocks of the Baltic Shield. The elastic-anisotropic properties of plagiogranites and quartz diorites composing pebbles were evaluated using the acoustopolarization method, i.e., their density and average values of longitudinal and transverse waves were determined. The Young's moduli were calculated to determine the orientation of stress components. The obtained results indicated that such conditions of formed stresses correspond to the formation of egg-shaped pebbles.

Key words: egg-shaped pebbles, elastic-anisotropic properties, stone beaches, Kola Peninsula.

Введение

На северном побережье Кольского полуострова, омываемом Баренцевым морем, наблюдаются белокаменные пляжи с уникальной яйцевидной галькой. Особенно они распространены на участке от острова Малый Олений до острова Малый Зеленецкий, где на расстоянии 40 км насчитывается порядка 70 каменных пляжей (Нерадовский и др., 2019; Miroshnikova, Neradovsky, 2019).

Благодаря взаимодействию пород Балтийского щита и прибрежных волн, на берегу Баренцева моря довольно распространены неглубокие каньоны и редкие бухты вдоль рек. Каньоны представляют собой корытообразные углубления в береговой части моря, борта и ложе которых сложены красными породами, вероятно, калиевыми гранитами и эндербитами. Валунно-галечный материал, образующий каменные пляжи, скапливается в ложе каньонов и состоит из обломков пород в основном светлого цвета, вероятно, плагиогранитов, гнейсогранитов, тоналитов и диорит-плагиогранитов. Более подробно строение пляжей рассмотрено в статье (Нерадовский и др., 2019). Среди гальки с высокой окатанностью выделяются особые образования яйцевидной формы. На некоторых пляжах они составляют около 30 % валунно-галечного материала. Размеры такой гальки варьируют от 5 см до 1 м, при этом форма остается близка к идеальной геометрии яйца (соотношение длинной и короткой оси 5:4 и 9:5 (Miroshnikova, Neradovsky, 2019)). С чем связана яйцевидная морфология гальки до сих пор неясно.

В данной статье приведены первые экспериментальные исследования упруго-анизотропных свойств пород, слагающих яйцевидные образования на побережье Баренцева моря, с целью установить наличие или отсутствие взаимосвязи этих свойств с морфологией гальки. Для этого на пляже № 45, расположенном в пределах губы Завалишина, были отобраны образцы гальки: Н-1 и Н-2.

Описание методики

Для определения связи морфологии гальки с упруго-анизотропными свойствами слагающих пород из образцов Н-1 и Н-2 были изготовлены 10 образцов пород в форме куба с ребром размером 2.1-2.6 см. Минеральный состав пород приведен в таблице 1. Плотность пород определяли методом Архимеда. Скорости распространения продольных и поперечных волн определяли с использованием акустополаризационного метода. Наиболее подробно методика проведения определений описана в работах (Горбачевич, 1995; Головатая и др., 2004; Ковалевский, 2007, 2018).

Таблица 1. Минеральный состав и структуры пород гальки района губы Завалишина.

Table 1. Mineral composition and textures of pebbles in the Zavalishin Bay area.

Номера образцов	Минеральный состав, %	Структура и текстура пород	Название породы
Н-1	Pl-48-52, Срх-8, Мс-1-2, Qz-15, Вт-18, Нbl-2-3, Czo-1-2, Ap<1, рудн. мин.-2-3	Мелко-среднезернистая, массивная, гипидиоморфнозернистая	Кварцевый диорит
Н-2	Pl-38-44, Мс-15, Qz-30, Вт-5, Ms-2-3, Нbl-1-2, Ep-1-2, Ap<1, Ttn<1, рудн. мин.-1-2	Крупно-среднезернистая, массивная, бластогипидиоморфнозернистая	Плагиогранит

Акустополариграммы образцов и петрофизические свойства образцов приведены на рисунке 1 и в таблице 2, соответственно. В таблице 2 представлены плотность, квазиматрица скорости V_{ij} , показатели анизотропии A_p и B_s . Результаты измерений величин скоростей распространения продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн по всем граням кубического образца приведены в виде квазиматрицы (табл. 2, (Горбачевич, 1995)):

$$V_{ij} = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где V_{11}, V_{22}, V_{33} – скорости распространения продольных колебаний, измеренные в направлениях 1-1', 2-2', 3-3'. V_{12}, V_{13} – скорости распространения поперечных колебаний, измеренные в направлении 1-1' при ориентировке векторов поляризации (ОВП) в направлении 2-2', 3-3'; V_{21}, V_{23} – скорости распространения поперечных колебаний, измеренные в направлении 2-2' при ориентировке вектора поляризации излучателя поперечных колебаний (ОВП) в направлении 1-1', 3-3'; V_{31}, V_{32} – скорости распространения поперечных колебаний, измеренные в направлении 3-3' при ОВП в направлении 1-1', 2-2' соответственно.

Показатели анизотропии вычисляли по формулам:

$$A_p = \frac{1}{V_{cp}} \cdot \sqrt{(V_{11} - V_{cp})^2 + (V_{22} - V_{cp})^2 + (V_{33} - V_{cp})^2}, \quad (2)$$

где $V_{cp} = (V_{11} + V_{22} + V_{33}) / 3$ – величина средней скорости распространения продольных колебаний в анизотропном образце.

Таблица 2. Петрофизические свойства гальки района губы Завалишина
 (экспериментальные данные).
 Table 2. Petrophysical properties of pebbles in the Zavalishin Bay area (experimental data).

Номера образцов	Наименование породы	Матрица скорости V_{ij} , км/с	ρ_R , г/см ³	V_{PR} , км/с	V_{SR} , км/с	A_p	B_s
H1-1	кварцевый диорит	5.28 3.21 3.35 3.27 5.39 3.20 3.57 2.98 4.93	2.54	5.20	3.26	0.06	0.19
H1-2	кварцевый диорит	5.20 3.11 3.13 3.06 5.24 3.21 3.10 3.12 5.11	2.73	5.18	3.12	0.02	0.05
H1-3	кварцевый диорит	5.60 3.26 3.18 3.11 5.18 3.14 3.19 3.20 5.14	2.70	5.31	3.18	0.07	0.03
H1-4	кварцевый диорит	5.29 2.95 2.97 3.14 5.26 3.12 3.06 3.21 4.97	2.70	5.17	3.08	0.05	0.05
H1-5	кварцевый диорит	5.58 3.12 3.24 3.03 5.13 3.02 3.20 3.08 5.15	2.56	5.28	3.11	0.07	0.05
H2-1	плаггиогранит	5.27 3.16 3.09 3.52 5.34 3.26 3.00 3.30 5.35	2.63	5.32	3.22	0.01	0.12
H2-2	плаггиогранит	5.41 3.34 3.31 3.34 5.18 3.30 3.18 3.24 5.20	2.70	5.26	3.29	0.03	0.02
H2-3	плаггиогранит	5.28 3.19 3.19 3.16 5.07 3.14 3.09 3.20 5.03	2.70	5.13	3.16	0.04	0.04
H2-4	плаггиогранит	5.44 3.17 3.13 3.09 5.13 3.07 3.08 3.13 5.20	2.78	5.26	3.11	0.04	0.03
H2-5	плаггиогранит	5.33 3.18 3.15 3.36 5.10 3.10 3.17 3.25 5.29	2.72	5.24	3.20	0.03	0.08
СРЕДНЕЕ			2.68±0.08	5.24±0.06	3.18±0.07		

Для оценки степени анизотропии образца по скорости поперечных колебаний рассчитывали обобщенный показатель анизотропии B_s . Величину B_s вычисляли по формулам (Горбачевич, 1995):

$$B_s = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2}, \quad (3)$$

где $B_1 = \frac{2 \cdot (V_{12} - V_{13})}{(V_{12} + V_{13})}$; $B_2 = \frac{2 \cdot (V_{21} - V_{23})}{(V_{21} + V_{23})}$; $B_3 = \frac{2 \cdot (V_{31} - V_{32})}{(V_{31} + V_{32})}$ – коэффициенты двулучепреломления

поперечных волн, определенных соответственно для направлений 1-1', 2-2', 3-3'. В таблице 2 также даны средние величины скорости продольной волны для образца, рассчитанные как $V_{PR} = (V_{11} + V_{22} + V_{33})/3$. Средние величины скорости поперечной волны определены как $V_{SR} = (V_{12} + V_{13} + V_{21} + V_{23} + V_{31} + V_{32})/6$.

Обсуждение результатов

Анализ результатов определений скорости распространения продольных и поперечных волн, представленных в таблице 2, показывает, что каждая из скоростных характеристик пород содержит определенную (детерминированную) и некоторую случайную (флуктуационную) составляющие. Среднее значение плотности пород составляет 2.68 ± 0.08 г/см³. Средние показатели скорости продольных волн (V_{PR}) – 5.24 ± 0.06 км/с, поперечных (V_{SR}) – 3.18 ± 0.07 км/с. Анализ коэффициен-

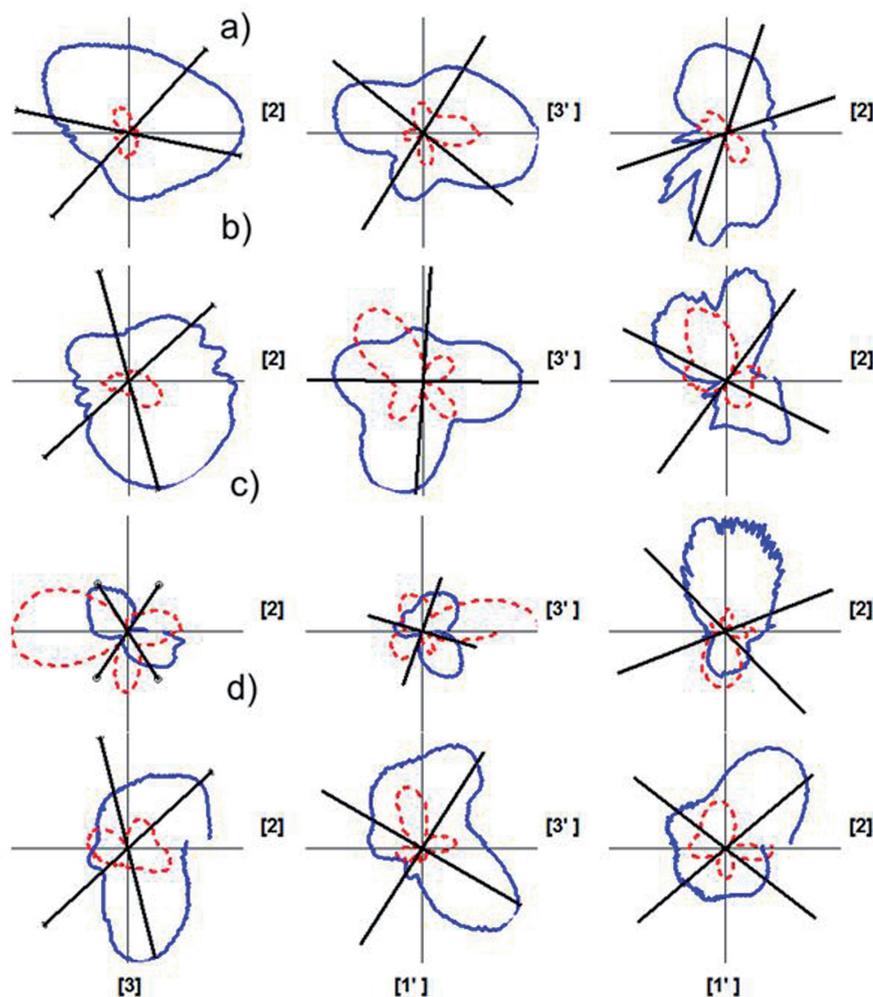


Рис. 1. Акустополариграмы некоторых образцов гальки: а) – Н1-1; б) – Н1-2; в) – Н2-1; д) – Н2-2. Поляризация излучателя и приемника упругих волн: синие (сплошные) линии – векторы параллельны; красные (пунктир) – векторы скрещены.

Fig. 1. Acoustopolarigrams of some pebble samples: а) – Н1-1; б) – Н1-2; в) – Н2-1; д) – Н2-2. Polarization of the emitter and receiver of elastic waves: blue (solid) lines – parallel vectors; red (dotted) – crossed vectors.

тов упругости не показывает существенных значений, что позволяет сделать вывод о том, что изученные породы сложены достаточно однородно и механические напряжения в них по разным направлениям сохраняются.

Анализ акустополариграмм (рис. 1) совместно с анализом скоростных соотношений (Ковалевский, 2018) позволяет отнести все образцы к орторомбическому типу упругой симметрии. Как известно, данный тип симметрии состоит из системы двух взаимноперпендикулярных плоскостей симметрии. В плоскости более сильной анизотропии наблюдаются максимальные значения V_{PR} , V_{SR} , более слабой – минимальные. При этом если полиминеральная порода формируется в поле напряжений сжатия, то согласно работам (Беликов и др., 1970; Кожевников, 1982; Robin, 1979) максимальной ориентировке силы сжатия отвечают минимальные значения скорости V_{PR} или константы упругости C . Для определения ориентировки компонентов палеонапряжений были рассчитаны модули Юнга (E) отдельно для каждой породы (табл. 3) по направлениям 1-1', 2-2', 3-3'.

Из таблицы 3 видно, что поле палеонапряжений в породах сформировалось одинаково по двум направлениям и в одном направлении определились большие значения. Эпюра таких напря-

жений вписывается в эллипсовидную фигуру. Подобные условия действовавших на породы палеонапряжений способствовали формированию гальки яйцеподобной формы.

Таблица 3. Значения модулей Юнга для гальки района губы Завалишина.
Table 3. Values of the Young's moduli for pebbles of the Zavalishin Bay.

Образец	Модуль Юнга (E) (*10 ⁴), г/(см*сек ²)		
	1-1'	2-2'	3-3'
Н-1	6.28	6.29	6.45
Н-2	6.58	6.74	6.60

Заклучение

Исследования петрофизических свойств гальки в районе губы Завалишина показали, что:

- галька сложена массивными плагиогранитами и кварцевыми диоритами Мурманского домена, причём эти породы достаточно однородны, и следы действовавших в них по разным направлениям палеонапряжений сохраняются. Среднее значение плотности пород составляет 2.68 ± 0.08 г/см³, средние показатели скорости продольных волн (V_{PR}) – 5.24 ± 0.06 км/с, поперечных (V_{SR}) – 3.18 ± 0.07 км/с;
- упругая анизотропия всех образцов относится к орторомбическому типу;
- поля палеонапряжений в образцах формировались одинаково, но в одном направлении определяются большие значения. Это обусловило формирование галек яйцеподобной формы.

Таким образом, изучение петрофизических свойств яйцевидной гальки Баренцева моря показало наличие связи упруго-анизотропных свойств слагающего вещества с морфологией. Это позволяет полагать, что галечник образован из массива горных пород, первоначально находящегося под действием неравносторонних палеосил.

Литература

1. Беликов Б.П., Александров К.С. Рыжова Т.В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М. Изд-во: Наука. 1970. 276 с.
2. Головатая О.С., Горбацевич Ф.Ф., Ковалевский М.В. Акустополаризационный метод исследования упругих свойств горных пород и минералов (на примере кварца) // КВАРЦ, КРЕМЕНЗЕМ: Материалы международного семинара. – Сыктывкар. Изд-во: Геопринт. 2004. С. 244–246.
3. Горбацевич Ф.Ф. Акустополаризация горных пород. Апатиты. Изд-во: Кольского научного центра РАН. 1995. 203 с.
4. Ковалевский М.В. К вопросу о разработке методики определения скоростных соотношений упругих волн в задачах акустополаризации // Материалы XVIII молодежной науч. конф. «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии». СПб. Изд-во: ЛЕМА. 2007. С. 183–185.
5. Ковалевский М.В., Горбацевич Ф.Ф. Методика определения скоростных соотношений упругих волн в задачах изучения петрофизических свойств метаморфизованных пород методом акустополаризации // Математические исследования в естественных науках. Труды XV Всероссийской (с международным участием) научной школы. Апатиты. Изд-во: K&M. 2018. С. 102–106. DOI: 10.31241/MIEN.2018.15.14.
6. Кожевников В.Н. Условия формирования структурно-метаморфических парагенезисов в докембрийских комплексах. Л. Изд-во: Наука. 1982. 184 с.
7. Нерадовский Ю.Н., Мирошникова Я.А., Компанченко А.А. О каменных пляжах Мурманского побережья Баренцева моря // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 663–667. DOI: 10.31241/FNS.2019.16.136.
8. Miroshnikova Ya.A., Neradovsky Yu.N. Pebble beaches of the Murmansk coast – unique formations of the Kola Peninsula // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. V. 302 (1): 012046. 2019. P. 1–6. DOI:10.1088/1755-1315/302/1/012046.
9. Robin P.-Y.F. Theory of metamorphic segregation and related processes // Geohim. and Cosmochim. acta. V. 43. No 10. 1979. P. 1587–1600. DOI: 10.1016/0016-7037(79)90179-0.