

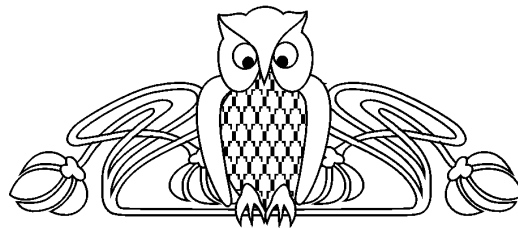


Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2021. Т. 21, вып. 3. С. 186–191  
*Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2021, vol. 21, iss. 3, pp. 186–191  
<http://geo.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-3-186-191>

Научная статья  
УДК 550.312; 551.242

## О некоторых закономерностях изменения плотности в литосфере Северной Евразии



**В. А. Огаджанов**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Огаджанов Виктор Александрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, [ozhva@mail.ru](mailto:ozhva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2645-4110>

**Аннотация.** На базе предложенной в статье методики расчета нормального уплотнения горных пород с глубиной, анализа петрофизических характеристик и интерпретации гравитационных аномалий исследованы основные закономерности изменения плотности в литосфере Северной Евразии. Показано, что для плотностного разреза литосферы характерно чередование парагенетически связанных разуплотненно-уплотненных (относительно нормального уплотнения) комплексов горных пород на всех уровнях: от приповерхностных слоев осадочных толщ до мантии. Зоны разуплотненно-уплотненных комплексов горных пород имеют глобальную выраженность.

**Ключевые слова:** гравитационные аномалии, литосфера, нормальное уплотнение, плотностной разрез

**Для цитирования:** Огаджанов В. А. О некоторых закономерностях изменения плотности в литосфере Северной Евразии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2021. Т. 21, вып. 3. С. 186–191. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-3-186-191>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article  
<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-3-186-191>

### Some regularities of change in density in the lithosphere of Northern Eurasia

**V. A. Ogadzhanov**

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Viktor A. Ogadzhanov, [ozhva@mail.ru](mailto:ozhva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2645-4110>

**Abstract.** A method is proposed for calculating the normal compaction curve of rocks for the deep parts of the lithosphere. It is based on the analysis of petrophysical characteristics and interpretation of gravitational anomalies. The main regularities of density changes in the lithosphere of Northern Eurasia are investigated. It has been shown that the density section of the region's lithosphere is characterized by alternation of paragenetically connected decompacted-compacted (relative to normal compaction) rock complexes at all levels of the lithosphere from the surface layers of bottom sediments to the mantle. These zones of decompacted-compacted rocks complexes have a global distribution.

**Keywords:** gravitational anomalies, lithosphere, normal compaction, density cuts

**For citation:** Ogadzhanov V. A. Some regularities of change in density in the lithosphere of Northern Eurasia. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2021, vol. 21, iss. 3, pp. 186–191 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-3-186-191>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

### Введение

Многие процессы, происходящие в литосфере, в частности формирование месторождений полезных ископаемых, очагов землетрясений, инженерно-геологических условий и т. д., связаны с изменением плотности горных пород. Ограниченность прямых определений плотности

горных пород на больших глубинах не позволяет по петрофизическим данным исследовать характер ее изменения с глубиной. Наиболее полное представление об общих закономерностях этого процесса можно получить на основе детального изучения верхней части земной коры [1].

В бассейнах интенсивного накопления терригенных толщ, таких как Южно-Каспийская



впадина, где пробурено большое количество глубоких скважин, при анализе данных о плотностных характеристиках верхней части разреза была установлена закономерность, которая носит региональный характер, а именно выявлена парагенетическая связь зон аномального (по отношению к нормальной тенденции) разуплотнения и уплотнения пород при идентичном литофациальном составе; эти закономерности выявляются на глубинах в несколько тысяч метров [1,2].

Разуплотненно-уплотненный разрез в кристаллической коре обнаружен в толще метаморфических пород, вскрытых Кольской сверхглубокой скважиной [3–5].

Тем самым из материалов глубокого и сверхглубокого бурения следует наличие зон разуплотненно-уплотненных пород в осадочной толще и кристаллической земной коре.

Судить о характере распределения плотности в мантии можно на основании аналитических расчетов уплотнения пород с глубиной, построения плотностных моделей литосферы по результатам интерпретации гравитационных аномалий и совместного анализа этих данных.

#### Методика исследования

Методика расчета кривой нормального уплотнения для осадочных и метаморфизованных пород ранее уже была изложена. В предположении об ультраосновном составе верхней мантии были проведены расчеты уплотнения ультраосновных пород с глубиной, при этом в качестве начальных условий приняты величины плотности, коэффициентов объемного теплового расширения и сжимаемости в нормальных условиях, а также давления и температуры на заданных глубинах. Нормальное значение плотности, к которому может привести влияние закономерно нарастающих с глубиной геостатического давления и температуры, должно удовлетворять теоретической кривой уплотнения.

В общем случае для изменения плотности под воздействием давления и температуры из дифференциальных уравнений термодинамики [6] выводится экспоненциальная зависимость:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\beta P} e^{-\alpha T}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – вычисленные значения плотности,  $\sigma_0$  – начальное значение плотности (в условиях нормальных давлений и температур),  $P$  – геостатическое давление,  $T$  – температура,  $\alpha$  – коэффициент объемного теплового расширения,  $\beta$  – коэффициент сжимаемости.

В уравнении (1) коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  принимаются как постоянные. Анализ изменения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  проведен посредством использования экспериментальных данных, приведенных в работах [7, 8]. Результаты определения коэффициента  $\alpha$  ряда породобразующих минералов показывают, что для подавляющего их большинства

его значения близки между собой и незначительно возрастают с повышением температуры [7]. В общем случае распределение величин  $\alpha$  при изменении температуры для большинства минералов можно аппроксимировать кривой (рис. 1), из которой видно, что при температурах более 400°C этот коэффициент изменяется незначительно и может быть принят как постоянный.

Анализ данных об изменении коэффициента  $\beta$  показывает, что его величина для разных групп горных пород в интервале значений давлений от 200 до 1500 МПа остается практически неизменной.

В качестве начальных значений плотности при расчете уплотнения ультраосновных пород были приняты их минимальные величины, согласно фактическим данным [9].

Расчет изменения плотности с глубиной как функции геостатического давления осуществлялся по следующей методике. Принималось начальное значение давления, обусловленное весом вышележащей толщи, рассчитывались плотность в слое достаточной малой толщины (например, 10 м) по формуле (1) и давление малого слоя, приращение давления последнего суммировалось с давлением вышележащей толщи, а приращение толщины малого слоя – с глубиной вышележащей толщи. С учетом суммированного давления и приращения глубины рассчитывалась плотность в следующем залегающем ниже слое малой толщины и т. д. Изменения температуры с глубиной задавались тремя значениями вертикального геотермического градиента – 10, 18 и 22°C/км. Эти значения были выбраны в соответствии с фактическими данными измерения температур в разрезе Кольской сверхглубокой скважины. Температурная поправка вводилась в значение плотности на заданной глубине, рассчитанной как функция геостатического давления. Поскольку увеличение температуры ведет к понижению плотности, поправка температуры в формуле (1) вводится со знаком минус. Результаты расчетов уплотнения ультраосновных пород приведены на рис. 2.

Здесь следует обратить внимание на то, что вертикальный геотермический градиент 22°C/км типичен для нижней толщи метаморфических пород пониженной плотности – 2,65–2,70·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup> вскрытой Кольской сверхглубокой скважины, в то время как для уплотненных метаморфических толщ амфиболитовой фации с плотностью около 3,00·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup> типично значение вертикального геотермического градиента, равное 10°C/км. Учитывая, что плотность нормально уплотненной мантии также составляет около 3,00·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>, вертикальный геотермический градиент в ней тоже может быть принят 10°C/км. Аномальные изменения плотности должны сопровождаться аномальными изменениями вертикального геотермического градиента.

Априори предполагается, что мантия до глубин примерно 35–40 км перекрыта толщей

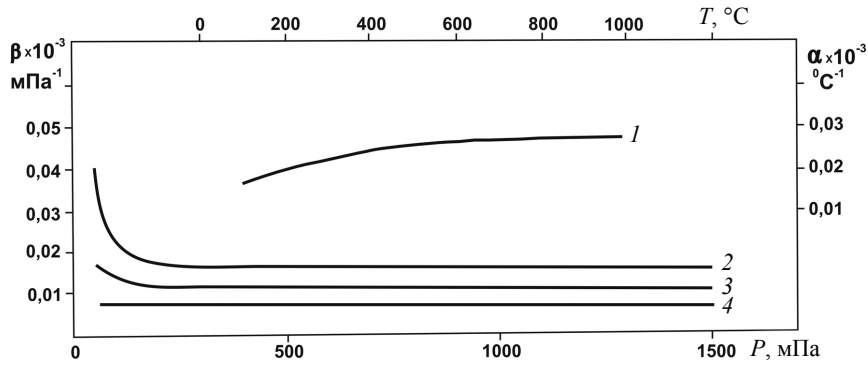


Рис. 1. Изменение коэффициентов объемного теплового расширения в зависимости от температуры и сжимаемости в зависимости от давления для разных минералов и групп горных пород: 1 – кривая коэффициента объемного теплового расширения разных минералов; кривые коэффициента сжимаемости горных пород: 2 – кислых, 3 – основных, 4 – ультраосновных

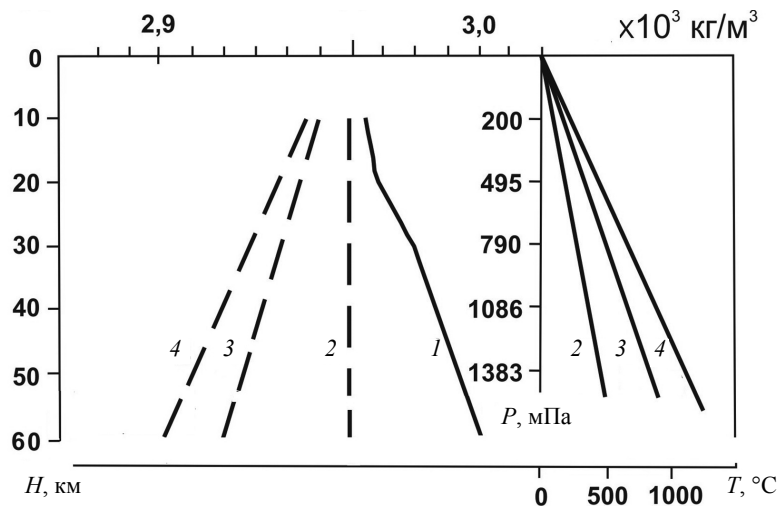


Рис. 2. Тенденции изменения плотности ультраосновных пород с глубиной в зависимости от давления и температуры: 1 – зависимость от давления; 2, 3, 4 – зависимость от давления и температуры при значениях геотермического градиента 10, 18 и 22 °C/км (нумерация линий уплотнения соответствует линиям изменения температуры с глубиной)

земной коры. В качестве начального значения плотности для разреза ультраосновных пород были приняты их минимальные величины, согласно фактическим данным, приведенным в табл. П.7 источника [9], а именно: оливин-дунит –  $2,80 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , перидотит –  $3,00 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , пироксенит –  $3,07 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; в среднем для ультраосновных пород –  $2,96 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Таким образом, результатом расчета нормального уплотнения для верхней мантии является теоретическая кривая уплотнения ультраосновных пород, которая начинается и определяется им от заданного начального значения плотности  $2,96 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  глубины 40 км как функция нарастающих геостатического давления и температуры с предпочтительным значением геотермического градиента  $10^\circ\text{C/км}$ . Теоретическая кривая уплотнения, ранее рассчитанная по данной методике для земной коры Европейской плиты, дала возможность путем сравнения фактических и теоретических разрезов

выделить в осадочной толще и кристаллическом фундаменте интервалы с аномальным изменением плотности [5].

Плотностные модели литосферы до глубины 90 км получены по результатам интерпретации гравитационных аномалий по трансрегиональным профилям: Симферополь – Воркута – Тикси, Нахичевань – Волгоград – Бузулук – Екатеринбург – Тюмень и Уренгой – о. Шокальского [10]. Указанные плотностные модели ранее были опубликованы в работах [2, 5].

Суммарная протяженность профилей, по которым построены плотностные модели, составляет 9000 км. Профили пересекают альпийские геоструктуры: складчатости Кавказа и Крыма; герцинские геоструктуры: Скифскую плиту, Западно-Сибирскую плиту, Урал; докембрийские геоструктуры: Восточно-Европейскую и Сибирскую платформы. Глобальный масштаб подобных исследований дает основание для выводов



о наличии некоторых общих закономерностей распределения плотности в литосфере Северной Евразии.

### Результаты исследования и их обсуждение

На всех построенных по гравиметрическим данным плотностных моделях в мантии выделяются три слоя, различающихся по значениям плотности: верхний – с плотностью  $3,00\text{--}3,18 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  в интервале глубин от 40 до 50–60 км; средний слой с пониженной плотностью –  $2,80\text{--}2,85 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  в интервале глубин от 50 до 70–80 км; нижний слой с плотностью  $3,10 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , находящийся под нижней границей слоя пониженной плотности (рис. 3).

Мантия в пределах складчатых областей Кавказа и Крыма однородна по плотности, которая, согласно расчетам по аномалиям гравитационного поля, составляет  $3,10 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , что больше теоретической плотности, определяемой тенденцией нормального уплотнения на  $0,14 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . В пределах Скифской плиты, южной и центральных частей Восточно-Европейской платформы плотность верхнего слоя мантии больше теоретической на  $0,14\text{--}0,22 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , плотность среднего слоя меньше теоретической на  $0,11 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . В северной части Восточно-Европейской платформы, складчатого сооружения Полярного Урала, на севере Западно-Сибирской плиты и в северо-западной части Сибирской платформы плотность верхнего слоя мантии практически совпадает с теоретическими значениями, плотность среднего слоя на  $0,16 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  меньше теоретической. Плотность верхней мантии Южного Урала и юго-западной части Западно-Сибирской плиты на  $0,14 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  больше, а плотность среднего слоя на  $0,11 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  меньше теоретической. Нижний слой мантии в интервале от нижней границы среднего слоя пониженной плотности до глубин 80–90 км для всех геоструктурных элементов по

плотности однороден и превышает теоретическую на  $0,14 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Из сопоставления плотностных разрезов, рассчитанных по гравиметрическим данным, с теоретическими значениями плотности, определяемыми тенденцией нормального уплотнения, очевидно повсеместное для территории Северной Евразии распространение в верхней мантии слоев пониженной плотности. В ряде случаев они чередуются со слоями аномально высоких значений плотности. Закономерность чередования слоев с аномально высокими и аномально низкими значениями плотности геологического разреза была ранее выявлена для земной коры Европейской плиты, что следует из сводного плотностного разреза, представленного в работе [5]; дополнив плотностной разрез земной коры плотностным разрезом мантии (рис. 4), можно получить представление о наиболее общих закономерностях изменения плотности в литосфере. К таким закономерностям можно отнести чередование аномально разуплотненных и уплотненных комплексов пород.

При условии неизменного вещественного состава горных пород их разуплотнение может являться следствием изменяющихся давлений и температур [2, 3]. Разуплотнение ультраосновных пород с глубиной возможно уже при геотермическом градиенте  $18^\circ\text{C/км}$  (см. рис. 2).

Перераспределение давлений и температур зачастую связано с особенностями флюидного режима недр [11–13]. Ранее нами [1, 2, 5] было высказано мнение о парагенетической связи разуплотненных и уплотненных комплексов горных пород, которое объяснялось тем, что под воздействием аномально высоких давлений флюидов горные породы в зоне разуплотнения увеличиваются в объеме (дилатируют) и оказывают давление на окружающие его образования, уплотняя их. Изменение плотности может происходить как без изменения, так и с изменением (например серпентинизацией) вещественного состава.

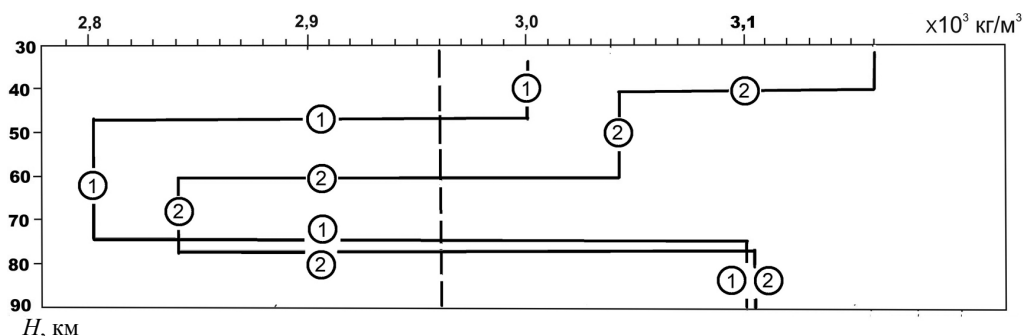


Рис. 3. Обобщенные плотностные разрезы мантии для разных геоструктур Северной Евразии, полученные по результатам интерпретации гравиметрических данных по региональным профилям в сопоставлении с тенденцией нормального уплотнения: 1 – север Восточно-Европейской платформы, Северный Урал, север Западно-Сибирской плиты и северо-западная часть Сибирской платформы; 2 – Скифская плита, юг Восточно-Европейской платформы, Южный Урал и юго-западная часть Западно-Сибирской плиты. Прерывистой линией показана тенденция нормального уплотнения, рассчитанная как функция геостатического давления и температуры

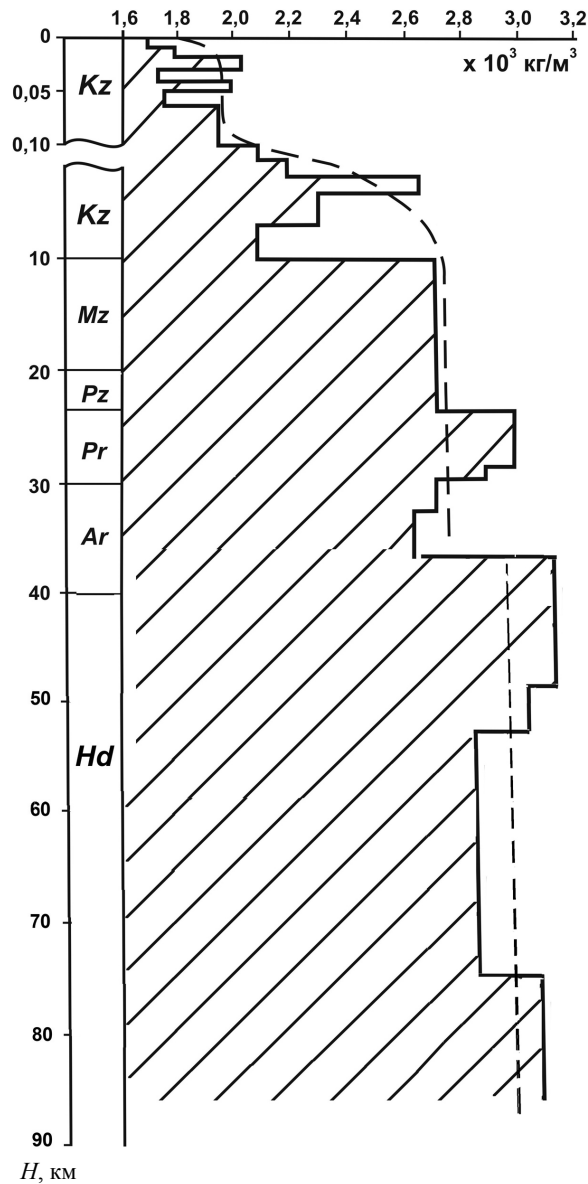


Рис. 4. Сводный плотностной разрез литосферы Северной Евразии. Составлено по материалам бурения глубоких и сверхглубоких скважин – Саатлинской и Кольской, а также по материалам интерпретации гравиметрических данных по региональным профилям. Прерывистой линией показана тенденция нормального уплотнения, рассчитанная как функция геостатического давления и температуры

Если дилатация является следствием флюидной динамики, то становится объяснимым проникновение высоконапорных флюидов в земную кору и, как следствие, формирование в земной коре зон разуплотнения, подобных тем, которые выявлены при бурении Кольской сверхглубокой скважины. При этом создаются благоприятные условия для процессов диапиризма и вулканизма как кульминационной формы его проявления [5]. В частности, по результатам интерпретации гра-

витационных аномалий в кристаллической коре Куринской и Прикаспийской впадин, Уральских гор, Западно-Сибирской плиты выявлены понижения плотности с глубиной с формированием коровых и мантийных диапиров (рис. 5). В восточной части Западно-Сибирской плиты также выявляется структура, идентифицируемая с мантийным диапиром, где разуплотненные комплексы мантии перекрыты уплотненными комплексами мантии в нижней части земной коры [2].

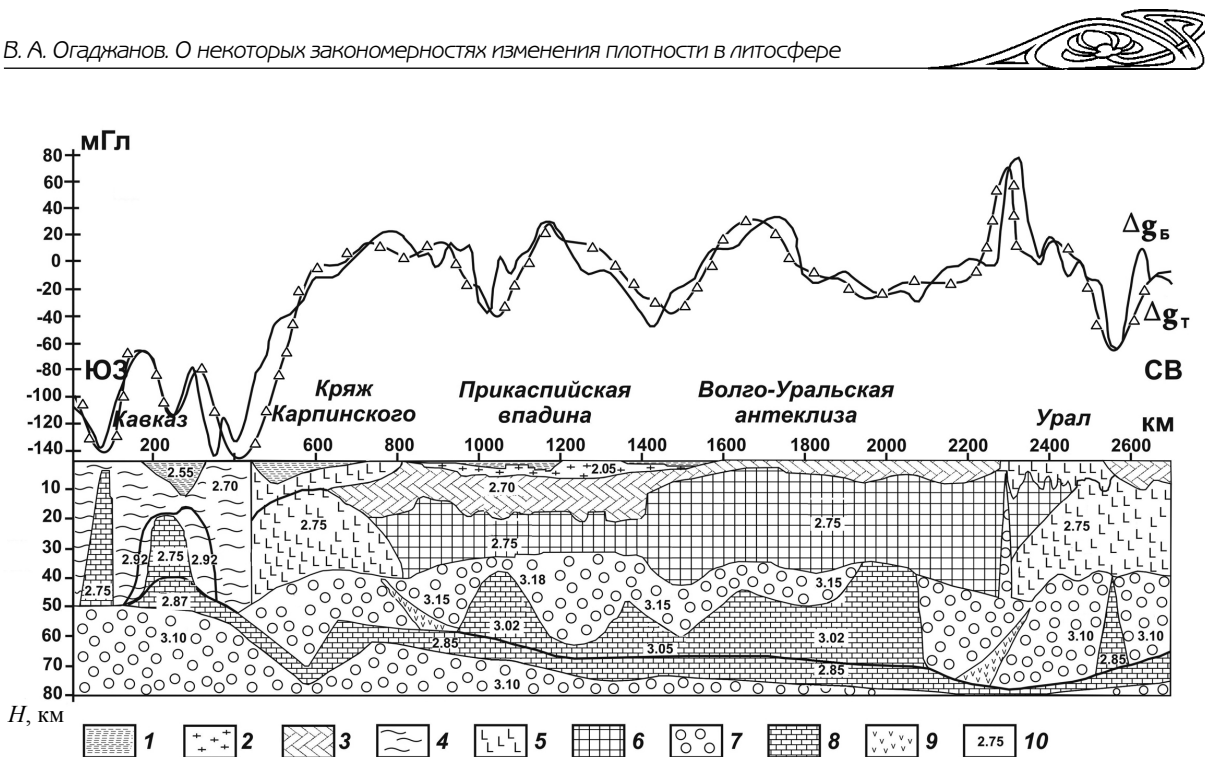


Рис. 5. Плотностной разрез по линии Кавказ – Урал. Толщи осадочных отложений: 1 – мезокайнозойские терригенные; 2 – соленосные; 3 – палеозойские преимущественно карбонатные. Толщи кристаллической коры: 4 – альпийского возраста; 5 – герцинского возраста; 6 – докембрийского возраста. Толщи мантии: 7 – нормально уплотненная; 8 – разуплотненная; 9 – предполагаемые зоны дробления в мантии; 10 – значения плотности

## Заключение

Сопоставление плотностных моделей литосферы, полученных по материалам интерпретации гравитационных аномалий с теоретической кривой изменения плотности с глубиной, позволяет сделать вывод о закономерностях изменения плотности, выраженной в парагенетической связи разуплотненно-уплотненных пород, обусловленных их дилатацией. Процессы дилатации могут протекать в земной коре, верхней мантии и глубже [2, 3]. С учетом изложенного есть основание для выводов о распространении закономерности, выраженной в особенностях чередования парагенетически связанных разуплотненных и уплотненных комплексов в земной коре, на более глубокие слои литосферы. Таким образом, при построении глубинных моделей литосферы следует учитывать наличие дилатационных изменений на разных ее уровнях и связанных с ними геологических объектов, а также процессов дилатационного генезиса.

## Библиографический список

1. Григорьянц Б. В., Гулиев И. С., Огаджанов В. А. Некоторые закономерности и причины изменений плотности в земной коре // Доклады АН Азербайджанской ССР. 1989. Т. 4, № 7. С. 32–35.

2. Огаджанов В. А. Концепция геофизических исследований, основанная на явлении дилатации горных пород // Геофизика. 1998. № 4. С. 10–13.
3. Гончаров М. А. Механизм геосинклинального складкообразования. Москва : Недра, 1988. 263 с.
4. Кольская сверхглубокая / под ред. Е. А. Козловского. Москва : Недра, 1984. 490 с.
5. Огаджанов В. А., Огаджанов А. В. Геолого-геофизические характеристики основных типов глубинных геоструктур Европейской плиты // Геофизика. 2015. № 1. С. 60–66.
6. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. Москва : Наука, 1964. 847 с.
7. Берч Ф., Шерер Д., Снайсер Г. Справочник для геологов по физическим константам. Москва : Издательство иностранной литературы, 1949. 32 с.
8. Справочник по физическим свойствам минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах. Москва : Недра, 1988. 255 с.
9. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых : справочник геофизика / под ред. Н. Б. Дортман. Москва : Недра, 1984. 455 с.
10. Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. Москва : Наука, 1980. 184 с.
11. Файф У., Прайс Н., Томпсон А. Флюиды в земной коре : пер. с англ. Москва : Мир, 1981. 435 с.
12. Фертель У. Х. Аномальные пластовые давления. Москва : Недра, 1980. 397 с.
13. Шербаков А. Н., Козлов Н. Д., Смирнова Г. Н. Газы термальных вод. Москва : Наука, 1974. 218 с.

Поступила в редакцию 11.12.2020, после рецензирования 17.03.2021, принята к публикации 15.05.2021  
 Received 11.12.2020, revised 17.03.2021, accepted 15.05.2021