

УДК 552.21+550.831+550.834 (470.22)

Использование физических свойств пород при решении комплексной задачи геофизики

А.М. Жирова¹, В.Н. Глазнев²

¹ Геологический институт КНЦ РАН

² Воронежский государственный университет, кафедра геофизики

Аннотация. В работе показана необходимость привлечения петрофизических данных для решения обратных задач геофизики. В качестве примера приводится схема использования физических параметров среды для комплексного геофизического моделирования глубинного строения крупнейших щелочных массивов Кольского региона. Рассмотрены все стадии исследования, которые связаны с использованием физических характеристик пород.

Abstract. In the research the necessity of petrophysical data use for solving inverse problems of geophysics has been shown. As an example the scheme of use of environmental physical parameters for the complex geophysical simulation of the deep structure of the largest alkaline massifs of the Kola region has been given. All stages of the research concerned with using physical characteristics of rocks have been considered.

Ключевые слова: петрофизические данные, корреляционные связи между физическими свойствами пород, комплексное геофизическое моделирование

Key words: petrophysical data, correlation of physical property of rocks, complex geophysical simulation

1. Значимость петрофизических данных в решении обратной комплексной задачи

Физические свойства пород нужны на всех стадиях решения комплексной задачи и, в первую очередь, на этапе задания начальных приближений модели, являющихся опорными при расчетах обратных задач. Характеристики пород также необходимы для построения априорных ограничений, налагаемых на начальную модель с целью уменьшения неоднозначности получаемых решений. Установленные на основе петрофизических данных вероятностные корреляционные связи между физическими параметрами среды являются необходимым условием интерпретации геофизических материалов и комплексного геолого-геофизического истолкования полученных результатов. Выбор конкретного комплекса геофизических полей при решении обратных задач обуславливается существующими системами съемок, обеспечивающих более-менее плотное покрытие изучаемой территории и наличием устойчивых корреляционных связей между петрофизическими параметрами среды, соответствующих этим полям. Кроме того, породы должны надежно дифференцироваться по физическим характеристикам, соответствующим наблюдаемым геофизическим полям. Для выяснения этих вопросов необходим анализ петрофизических свойств пород. В качестве примера рассматриваются петрофизические свойства уникальных щелочных массивов Кольского полуострова (Хибинского и Ловозерского), с которыми связаны основные месторождения апатитовых руд и редкометалльные месторождения (рис. 1).

Рис. 1. Схема района комплексного моделирования:

- 1 – палеозойские щелочные массивы;
- 2 – раннепротерозойский рифтогенный комплекс;
- 3 – раннепротерозойские габбро-анортозиты и перидотиты;
- 4 – архейские гранитогнейсы;
- 5 – главные разломы (границы террейнов)



2. Анализ петрофизических свойств пород Хибинского и Ловозерского массивов и их обрамления

В рамках поставленных задач выполнено обобщение и систематизация разнородных материалов об упругих и плотностных свойствах пород региона, которые включали в себя первичные и результирующие данные о породах массивов и их обрамления (Баюк и др., 1971; Галдин, 1971; Kern et al., 1993 и др.). В результате анализа установлено, что наибольшими значениями скорости упругих волн Хибинского массива отличаются ультраосновные фойдолиты (6,03 км/с), наименьшими – нефелиновые сиениты (хибиниты – 4,85 км/с и фойяиты – 5,06 км/с). К сожалению, сведений о скоростных свойствах пород Ловозерского массива очень мало. По расчетным данным Г.Н. Шаблинского (Шаблинский, Каверзнева, 1965), А.В. Роллера (1978) и др., скорости нефелиновых сиенитов Ловозерского массива составляют 5,8÷6,2 км/с. Лишь в зонах внешнего контакта массива с архейскими гнейсами (зона фенитизации) и в зонах предполагаемых нарушений скорость падает до 5,00 км/с. Усредненное значение скорости продольных волн для осадочно-вулканогенных отложений Ловозерского массива составляет 5,61 км/с.

Для пород обрамления Хибинского массива самые низкие значения скорости соответствуют комплексу гранодиоритов, тоналитов (4,63 км/с) и комплексу тоналитов, гнейсов (5,07 км/с), в то время как наиболее высокие – щелочным ультрамафитам (7,49 км/с), перидотитам расслоенного интрузивного комплекса (6,85 км/с) и эффузивам Имандра-Варзуги (6,34 км/с).

Что касается плотности пород массивов, то, согласно многим исследователям (Игнатьева, 1967; Шаблинский, Каверзнева, 1965 и др.), хибиниты, рихсчорриты и фойяиты, слагающие более 90 % Хибинского плутона, имеют плотность 2,64 г/см³. Плотность ультраосновных фойдолитов несколько выше. Так, средняя плотность уртитов составляет 2,79 г/см³, средняя плотность ийолитов 2,87 г/см³. Плотность апатит-нефелиновых руд составляет 3,02 г/см³. Для Ловозерского массива характерно следующее. Среднее значение плотности для эвдиалитового комплекса равно 2,78 г/см³, для дифференцированного комплекса массива соответствует 2,72 г/см³. Пойкилитовые содалитовые сиениты массива имеют средние значения плотности, равные 2,56 г/см³.

В целом наиболее высокими значениями среди вмещающих массивы пород отмечаются: а) перидотиты, пироксениты, габбро-нориты (3,01 г/см³); б) щелочные ультрамафиты (2,98 г/см³); в) габбро, габбро-анортозиты, диориты (2,92 г/см³); г) нориты, габбро-нориты, диориты Имандровского лополита (2,91 г/см³); д) осадочно-вулканогенные породы Имандра-Варзуги (2,90 г/см³). Наименьшими значениями плотности отмечаются: а) гранодиориты, тоналиты (2,67 г/см³); б) комплекс основания (2,72 г/см³); в) слюдяные, гранат-слюдяные парагнейсы, сланцы, конгломераты (2,72 г/см³).

3. Определение надежности разделения пород

При изучении физических свойств пород и определении их контрастности по величине их средних значений плотности и скорости продольных волн важны также оценки надежности разделения пород. На основе статистического подхода выполнены оценки надежности по величине средних значений признаков (скорости и плотности) с учетом различия их дисперсий. В качестве примера представлены объекты двух классов: ийолит – представитель ультраосновных фойдолитов и рихсчоррит – представитель нефелиновых сиенитов. Оценки надежности показали, что объекты, не различимые по одному признаку, могут быть разделены по другому признаку. На рис. 2 представлена попытка разделения классов по признаку скорости для рихсчорритов и ийолитов. Все расчеты базируются на проверке статистических гипотез и оценках вероятностей ошибок первого и второго рода (Тархов и др., 1982).

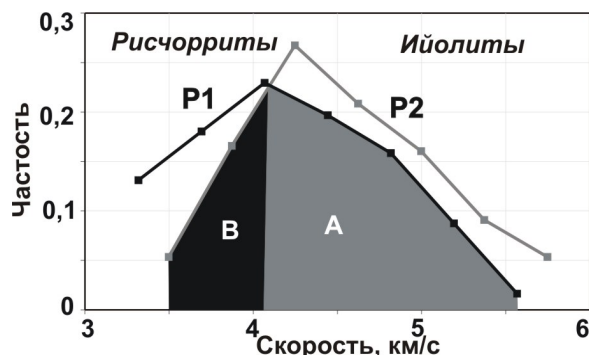


Рис. 2. Определение надежности разделения пород P_1, P_2 – гистограммы частот значений скорости для рихсчорритов и ийолитов соответственно; A – вероятность ошибки первого рода; B – вероятность ошибки второго рода

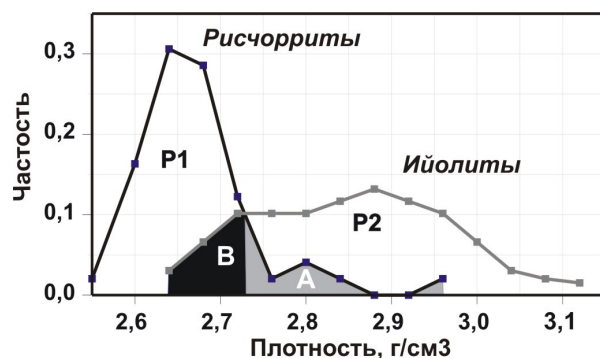


Рис. 3. Определение надежности разделения пород P_1, P_2 – гистограммы частот значений плотности для рихсчорритов и ийолитов соответственно; A – вероятность ошибки первого рода; B – вероятность ошибки второго рода

Ошибка первого рода (A) заключается в том, что принимается решение о наличии объекта класса 2 (в данном случае ийолитов, см. рис. 2), в то время как в действительности имеет место объект класса 1 (рискорриты). Ошибка второго рода (B) связана с обратной ситуацией. Через вероятности A и B и априорные вероятности классов p_1 и p_2 найдена вероятность общей безусловной ошибки разделения классов (q) и вероятность правильного разделения классов, называемая надежностью разделения (γ):

$$q = p_1 * A + p_2 * B; \quad \gamma = 1 - q.$$

Сумма вероятностей ошибок первого и второго рода характеризует степень расхождения плотности распределения (гистограмм) P_1 и P_2 . В примере с различием по скорости ийолитов и рискорритов (рис. 2) получено низкое значение надежности разделения пород по признаку средней скорости и с учетом ее дисперсии.

Однако при разделении объектов в поле признака плотности наблюдается обратная ситуация, оценки надежности имеют приемлемые значения (рис. 3). Вычисленное значение общей безусловной ошибки разделения классов (q), равное 0,15, и значение надежности (γ), равное 0,85 (или 85 %), свидетельствует о надежности разделения пород по признаку средней плотности и с учетом ее дисперсии.

Таким образом, объекты, неразделимые по одному признаку, делимы по другому и наоборот. Особенности физических свойств пород плутона подтверждают необходимость комплексирования таких методов как гравиметрия и сейсмометрия.

4. Взаимосвязь физических свойств пород Хибинского и Ловозерского массивов и их обрамления

Наличие устойчивых корреляционных связей между физическими параметрами среды является необходимым условием выполнения процедуры комплексного геофизического моделирования. Задача определения взаимосвязи между параметрами реализуется на основе феноменологического подхода, и полученные зависимости носят вероятностный характер, а не функциональный, поскольку получены из экспериментальных данных.

Диаграмма представляет зависимость V - ρ -свойств пород, соответствующих породам всех комплексов в пределах региона изучения и вмещающих Хибинский массив (рис. 4). По диаграмме прослеживается тенденция обратной зависимости значений физических характеристик пород от содержания кремнезема и прямой зависимости от содержания темноцветных минералов. Так, самыми большими значениями скорости и плотности обладают ультраосновные породы Мончегорского и Панского плутона (перидотиты, пироксениты), а также щелочные ультрамафиты, имеющие высокое содержание мафических минералов. Среднее положение занимают породы основного состава – породы Имандровского лополита (нориты, габбро) и Главного хребта (габбро-анортозиты, габбро). Довольно высокие скорости и плотности у пород комплекса Имандра-Варзуга, однако они характеризуются заметным разбросом значений, что является следствием содержания различных пород от эффузивов до осадочно-эффузивных пород. Большой вклад в дисперсию вносят архейские породы – гранодиориты, тоналиты и комплекс основания – тоналиты, гнейсы. Кислые породы характеризуются довольно низкими значениями физических свойств из-за высокого содержания кремнезема. Полученная аппроксимирующая функция допускает возможность перехода как от скорости к плотности, так и обратную процедуру расчета на базе установленных связей, что является необходимым элементом комплексной геофизической интерпретации данных сейсмометрии и гравиметрии.

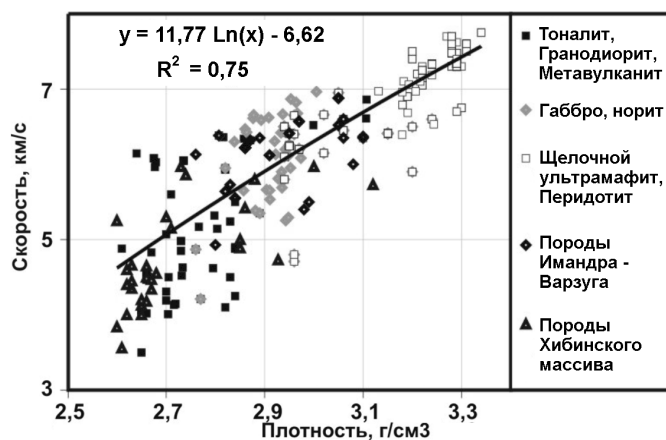


Рис. 4. Компильционная диаграмма зависимости скорости продольных волн от плотности для всех пород, входящих в регион изучения

5. Прогнозная модель для комплексной интерпретации сейсмогравиметрических данных

Важным моментом при решении обратных геофизических задач является задание начальных распределений физических параметров изучаемой среды. Как известно, большинство методов решения обратных задач разработано для случая, когда оператор прямой задачи линеен. Однако в геофизике линейность этого оператора имеет место только в задачах гравиметрии относительно плотности и магнитометрии относительно компонента вектора намагниченности. Что же касается обратной задачи сейсмометрии, то в связи с тем, что форма луча (L_i) зависит от искомого распределения скорости $V(r)$ в формуле времени пробега сейсмического луча:

$$t_i = \int_{L_i} \frac{ds}{V(r)},$$

задача является нелинейной. Поэтому данная задача решается в линеаризованной постановке. Платой за линеаризацию является то, что на искомую модель накладывается ограничение, связанное с малостью отличия начальной модели $V_0(r)$ от искомой $V(r)$, т.е.

$$V(r) = V_0(r) + \delta V(r), \quad \delta V(r) \ll V_0(r),$$

где $\delta V(r)$ – малая скоростная поправка, которую предстоит определить. А это приводит к большому весу самих начальных скоростных моделей (задаваемых до начала моделирования) в процессе решения обратной задачи и повышает ответственность выбора этих стартовых моделей, которые должны быть достаточно реалистичны и надежны. Для построения 3D-начальных моделей в работе использовались современные представления о геологии данного региона, результаты петрофизических исследований, а также результаты сейсмических и гравиметрических съемок различного масштаба. В процедуру комплексной интерпретации включено формализованное описание имеющейся геологической информации по изучаемому объему среды. На основе этих геологических представлений, многочисленных интерпретационных геофизических материалов и петрофизических данных с учетом влияния РТ-условий на физические свойства пород получено начальное представление об объемной модели региона. Методика построений подобных моделей достаточно хорошо отработана при изучении территории Балтийского щита (Минц и др., 1996).

6. Граничные условия

При большой размерности пространства (искомых) параметров, гораздо большей, чем количество исходных данных, возникает неоднозначность решения обратной задачи, которую можно уменьшить, задавая некоторые априорные ограничения на искомую модель. В работе использован следующий способ задания априорных данных: закрепление параметров, полученных на основании результатов других исследований. В качестве граничных условий, налагаемых на скоростную модель, использованы результаты малоглубинной сейсмической томографии. Использование граничных условий при построении моделей скорости является необходимым элементом моделирования для получения реалистичных и достоверных результатов. Априорные ограничения, налагаемые на скоростную модель, представляют собой расчетные скоростные характеристики, относящиеся к дневной поверхности и к области вблизи нее до глубины 0,10÷0,15 км. Последние получены в результате малоглубинных сейсмотомографических исследований в рамках данной работы. Результатами малоглубинной томографии являются наиболее достоверные значения скорости, распределенные по поверхности и вблизи нее, опирающиеся, с одной стороны, на априорные петрофизические материалы по поверхности, а с другой – на детальные сейсмические данные МОВ, полученные в 1970÷80-х годах Н.И. Пронягиным, А.В. Роллером и др. С помощью малоглубинного сейсмотомографического моделирования петрофизические свойства пород уточнены и дополнены результатами обращения коротких годографов (до 2 км) сейсмических волн. Тем самым получено скоростное распределение, увязанное пространственно и соотнесенное с породами массива и его обрамления. Расчетные результаты дают информативную картину скорости по поверхности и вблизи нее и на этапе 3D моделирования позволяют закрепить значения скорости в верхней части модели. Рис. 5

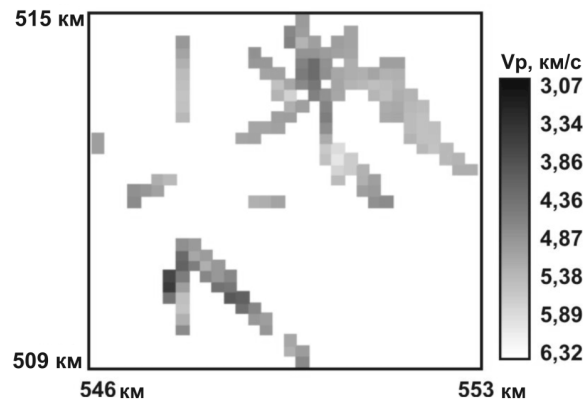


Рис. 5. Распределение значений скорости продольных волн на горизонтальном уровне $H=0,6$ км по одному из участков исследуемого региона

демонстрирует результаты расчета скоростных характеристик по одному из участков изучаемого региона. Введение априорного ограничения на распределение упругих характеристик в верхней части начальной модели позволяет повысить достоверность получаемых скоростных распределений.

7. Учет РТ-влияния на физические свойства пород

Изменение физических свойств пород с глубиной происходит не только в связи с изменением литологии, вещественного состава этих пород. Если в качестве области расчетов используется вся земная кора или ее значительная часть, а именно с такой ситуацией имеем дело при региональных исследованиях, на физические свойства также влияют и изменения РТ-условий.

Учет влияния РТ-условий важен на различных стадиях комплексной интерпретации данных: а) при построении начальных прогнозных моделей плотности и скорости; б) для корректного выполнения процедуры перехода от плотности к скорости и обратно; в) на заключительной стадии – стадии геологической "расшифровки" моделей, полученных в параметрах физических свойств пород.

Термобарические петрофизические опыты, проведенные различными авторами (Лебедев и др., 1988; Kern et al., 1993), свидетельствуют о том, что влияние РТ-условий на физические свойства пород литосферы может быть весьма значительным и неоднородным в пределах различных блоков литосферы.

Для оценки значимости изобарических и изотермических поправок к плотности и скорости пород на изучаемых глубинах проведены предварительные расчеты (рис. 6 и 7), которые основываются на аппроксимационных формулах, полученных В.Н. Глазевым (2003) для северо-востока Балтийского щита. Значимость поправок можно определить путем их сравнения с контрастностью пород в поле скорости и плотности по петрофизическим данным, а также с погрешностью моделирования. Поправки зависят от значений давления и температуры и от нормальных (т.е. соответствующих уровню дневной поверхности) значений скорости и плотности.

В изучаемом диапазоне глубин с ростом давления значения поправки увеличиваются, а с ростом температуры наблюдается их закономерное уменьшение. Влияние нормальных значений плотности и скорости на поправки обратно: чем выше нормальное значение физического параметра, тем меньше величины изобарических и изотермических поправок. На глубинах 5÷20 км поправки к нормальной скорости, равной 5,1 км/с, соответствующей скорости тоналитов – гнейсов, составляют: изобарическая – (-0,102)÷(-0,272) км/с, изотермическая – 0,632÷1,014 км/с. Погрешность сейсмотомографических расчетов в обобщенной схеме комплексной интерпретации в скоростном выражении не превышает 0,06 км/с.

Таким образом, значения поправок, так же как и контрастность пород в поле скорости по петрофизическим данным, имеют близкие значения и составляют десятые доли и первые единицы км/с. Аналогичные данные получены в отношении плотностных поправок. Поправки к нормальной плотности, равной 2,72 г/см³ (плотность тоналитов-гнейсов) составляют: изобарическая – (-0,006)÷(-0,019) г/см³, изотермическая – 0,022÷0,052 г/см³.

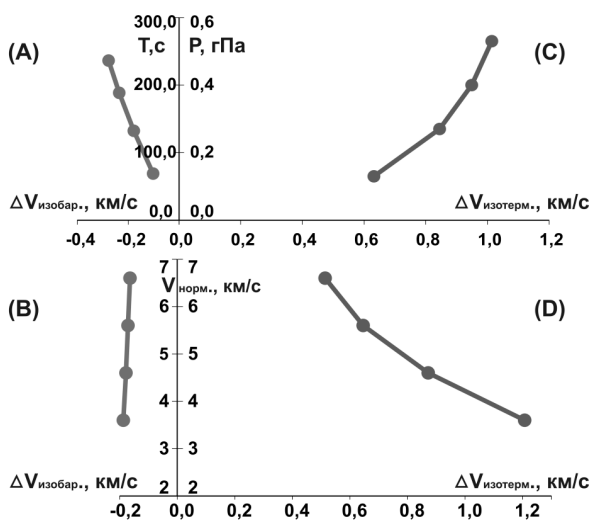


Рис. 6. Зависимость изобарической поправки к скорости от: (А) температуры, (В) нормальной скорости, а также зависимость изотермической поправки к скорости от: (С) давления, (D) нормальной скорости

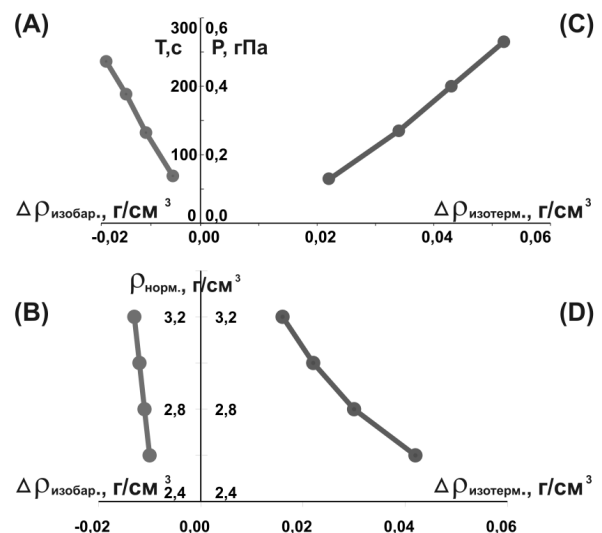


Рис. 7. Зависимость изобарической поправки к плотности от: (А) температуры, (В) нормальной плотности, а также зависимость изотермической поправки к плотности от: (С) давления, (D) нормальной плотности

Результаты расчетов с использованием нормальных значений скорости и плотности пород изучаемого региона показали, что обе поправки являются значимыми (рис. 6 и 7). Это подтверждает необходимость учета влияния литостатического давления и температуры на скорости упругих волн и на плотность слагающих пород в процессе решения обратной комплексной задачи.

8. Заключение

В рамках настоящих исследований показана значимость физических свойств пород при решении обратных задач геофизики. На основе анализа петрофизических данных:

- 1) сделан вывод о возможности комплексирования таких методов, как сейсмометрия и гравиметрия, с целью построения 3D-моделей строения изучаемых объектов;
- 2) получены корреляционные функции, являющиеся необходимым элементом комплексирования, поскольку на их основе осуществляется объединение (согласование) решений каждого отдельного метода;
- 3) построены начальные объемные модели строения изучаемых объектов, необходимые для комплексной интерпретации сейсмогравиметрических данных;
- 4) построены априорные ограничения, налагаемые на модель на основном этапе моделирования;
- 5) оценены изобарические и изотермические поправки к плотности и скорости пород на изучаемых глубинах, и на основе этих оценок сделан вывод о значимости термодинамического влияния на физические свойства пород.

Исследования поддержаны грантом РФФИ № 07-05-13579- офи_ц.

Литература

- Kern H., Walter C., Flue E.R.** Seismic properties of rocks exposed in the Polar profile region. *Precamb. Res.*, v.64, N 1-2, p.169-188, 1993.
- Баяк Е.И., Воларович М.П., Скворцова Л.С.** Скорость упругих волн при высоких давлениях в изверженных и метаморфических породах различных регионов. В сб.: *Тектонофизика и механические свойства горных пород*. М., Наука, с.127-137, 1971.
- Галдин Н.Е.** Анизотропия скоростей упругих волн в ультраосновных породах Кольского полуострова. В сб.: *Тектонофизика и механические свойства горных пород*. М., Наука, с.179-188, 1971.
- Глазнев В.Н.** Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. *Апатиты, КНЦ РАН*, 252 с., 2003.
- Игнатьева Т.С.** Физические свойства пород и руд месторождений апатита. В сб.: *Опыт применения радиоактивных и других физико-химических методов при поисках и разведке руд нерадиоактивных элементов*. Л., Недра, с.112-123, 1967.
- Лебедев Т.С., Корчин В.А., Савенко В.Я.** Петрофизические исследования при высоких РТ-параметрах и их геофизические приложения. *Киев, Наукова думка*, 247 с., 1988.
- Миц М.В., Глазнев В.Н., Конилов А.Н.** Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: Палеогеодинамика, строение и эволюция континентальной коры. М., *Научный мир*, 287 с., 1996.
- Роллер А.В., Ронин А.Л., Пронягин Н.И.** Применение метода отражений волн при изучении глубинного строения Хибинского массива. В сб.: *Методы разведочной геофизики. Рудная сейсморазведка*. Л., Недра, с.96-102, 1978.
- Тархов А.Г., Бондаренко В.М., Никитин А.А.** Комплексирование геофизических методов. М., *Недра*, 295 с., 1982.
- Шаблинский Г.Н., Каверзнева Н.А.** О применении геофизических методов для поисков апатитовых руд. *Разведка и охрана недр*, № 9, с.32-35, 1965.