

УДК 557. 89: 549. 5:543

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ВОРОНЕЖСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ

О.М. Муравина¹, В.Н. Глазнев²

Воронежский государственный университет, 394006, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1.

Приведены результаты идентификационного моделирования пород Воронежской антеклизы методом группового учета аргументов по керновым образцам. Установлены аппроксимационные соотношения между петрофизическими параметрами пород девонского возраста.

Библиогр. 7 назв. Илл. 4. Табл. 2.

Ключевые слова: петрофизика; статистический анализ; идентификационное моделирование.

STRUCTURAL AND PARAMETRIC MODELS OF VORONEZH ANTECLISE SEDIMENTARY COVER PETROPHYSICAL PARAMETERS

O.M.Muravina, V.N.Glaznev

Voronezh State University, 1 Universitetskaya Sq., Voronezh, 394006, Russia.

The article introduces the results of Voronezh anteclise rocks identification modeling by the method of group account of arguments by core samples. The approximate ratios between the petrophysical parameters of Devonian rocks have been estimated.

7 sources. 4 figure. 2 table.

Key words: petrophysics; statistical analysis; identification modeling.

Построение комплексной геофизической модели литосферы Воронежского кристаллического массива (ВКМ) по данным гравиметрии, магнитометрии, геотермии, электрометрии и материалов региональных и детальнейших сейсмических исследований базируется на комплексной интерпретации геофизических данных, заключительным этапом которой является решение обратных задач по всем используемым геофизическим методам [1]. Для получения корректных результатов интерпретации принципиально важным является формирование стартовой модели изучаемой среды, построение которой базируется на известных физических свойствах типичных пород изучаемого региона. В качестве таких исходных петрофизических материалов была использована со-

зданная пространственная база петрофизической информации, содержащая сведения о плотности, скорости продольных волн, магнитной восприимчивости, остаточной намагниченности, удельном сопротивлении, поляризуемости и радиоактивности пород для образцов керна почти по 4400 скважинам региона.

Помимо физических свойств, база данных содержит необходимые сведения о геологической принадлежности образцов пород керна скважин к определенным типам пород, заданным в рамках достаточно подробной классификации. Сформированная пространственная база петрофизических данных является наиболее полным петрофизическим описанием типичных кристаллических и осадочных пород террито-

¹Муравина Ольга Михайловна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики, тел./факс: (473) 2208385.

Muravina Olga, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Associate Professor of the Department of Geophysics, tel.: (473) 2208385, e-mail: muravina@geol.vsu.ru

²Глазнев Виктор Николаевич, доктор физико-математических наук, зав. кафедрой геофизики, тел.: (8473) 2208385, e-mail: glaznev@geol.vsu.ru

Glaznev Victor, Doctor of Physico-Mathematical sciences, Head of the Department of Geophysics, tel.: (8473) 2208385, e-mail: glaznev@geol.vsu.ru

рии ВКМ и отвечает современным требованиям, что позволяет эффективно выполнять поиск и выборки материалов по признаковым или пространственным запросам, а также обрабатывать и анализировать данные с применением новейших математических разработок. Детальное изучение петрофизических характеристик пород осадочного чехла связано с необходимостью достаточно точного учёта влияния самой верхней части разреза на результаты геофизического моделирования [2].

Обработка петрофизических материалов по породам осадочного чехла региона включала ряд этапов, необходимых для создания объективной усреднённой петрофизической характеристики пород по их литологическим типам и возрастным группам, в рамках некоторой генерализованной стратификации осадочных пород региона. На основе разработанной структурной модели осадочного чехла ВКМ [2,3] и сопредельных территорий была осуществлена привязка данных к реальным географическим координатам и стратиграфическим горизонтам, рассчитаны усреднённые петрофизические характеристики по литологическим типам и возрастным группам пород. Заключительным элементом обработки явился статистический анализ петрофизических данных по осадочному чехлу Воронежской антеклизы. Первичная статистическая обработка выявила сложный характер распределения физических свойств пород, слагающих осадочный чехол ВКМ и сопредельных территорий. Петрофизические данные, за редким исключением, являются полимодальными, асимметричными, что определило необходимость разработки специальной методики обобщения на основе робастных подходов. Так, для тестирования на статистическую однородность по отдельным геологическим единицам был использован квантильный анализ [7]. Для статистически однородных данных с гауссовым распределением зависимость между квантилем (0,1)-нормального

распределения и квантилем данных должна быть линейной. Зоны статистической неоднородности отмечаются нарушением линейности и могут быть скорректированы отбраковкой нетипичных значений. Графики квантильной регрессии были использованы также для выполнения процедуры усечения тяжелых и легких «хвостов» распределения по линиям р-квантиля и (1-р)-квантиля (рис. 1). В результате, использованные подходы к статистическому анализу сгруппированных данных позволили выявить основные закономерности в распределении петрофизических характеристик и перейти к решению задачи установления аппроксимационных зависимостей петрофизических параметров осадочных пород, необходимых для построения обобщённого начального приближения петрофизической модели чехла региона. С этой целью был выполнен идентификационный анализ методом группового учета аргументов (МГУА), в результате которого были получены структурно параметрические уравнения связи между различными петрофизическими характеристиками, литологическим типом пород, возрастом и глубиной залегания.

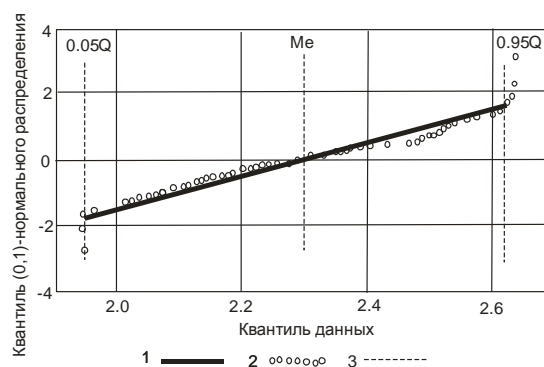


Рис. 1. Графики квантильной регрессии для пород девонского возраста:

1 — экспериментальная зависимость; 2 — теоретическая зависимость; 3 — линии 5% квантиля (0.05Q), медианы (Me) и 95% квантиля (0.95Q)

Теоретические основы МГУА изложены в работах [4, 5]. Применение МГУА позволяет установить соотношения между геологическими атрибутами (идентификационные модели). В про-

цессе идентификации не только рассчитываются оптимальные коэффициенты уравнения, но и выбираются его параметры и структура путем опробования многих моделей-претендентов по минимальным значениям внешних критериев.

В результате выполненного идентификационного анализа были получены аппроксимационные соотношения между различными петрофизическими характеристиками для пород разного возраста. В табл. 1 приводятся основные статистические характеристики данных о плотности и скорости пород девонского возраста.

Таблица 1
Статистические характеристики осадочных пород девона

Статистические характеристики	Петрофизические параметры	
	V_p , км/с	σ , г/см ³
Среднее	3,20	2,31
Медиана	3,2	2,28
Мода	1,9	2,58
Стандартное отклонение	1,35	0,27
Минимум	0,7	1,72
Максимум	6,4	2,89
Объем выборки	170	326

Рассмотрим некоторые полученные результаты на примере отложений девонского возраста. Девонские толщи сложены разнообразными породами – терригенными, органогенными, хемогенными, их промежуточными разновидностями и, в малой части, эффузивно-осадочными и эффузивными. Для пород девона выделяют нижнюю терригенную и верхнюю карбонатную толщи, граница между которыми проводится в средней части франского яруса [6].

Породы девона вскрыты скважинами в присводовой части юго-западного крыла, своде и северо-восточном крыле Воронежской антеклизы и за ее пределами. Мощность пород существенно изменяется в плане – в пределах Воронежской антеклизы

мощность отложений колеблется от нуля до 600 м на севере и северо-востоке. Девонские отложения представлены глинами, а также глинистыми разновидностями известняков с прослоями мергелей, глин и алевролитов. В толще девона встречаются несколько резко выраженных плотностных границ, которые ассоциируются со сменой менее плотных слоёв карбонатных и песчаных пород типичными глинами и мергелями. Плотность пород изменяется от 1.7 г/см³ для песчаных отложений до 2.9 г/см³ для массивных известняков. Низкие значения скорости распространения продольных волн характерны преимущественно для терригенных пород, более высокими значениями скорости обладают карбонатные породы.

Сводные гистограммы распределения плотности и скорости распространения продольных волн девонских

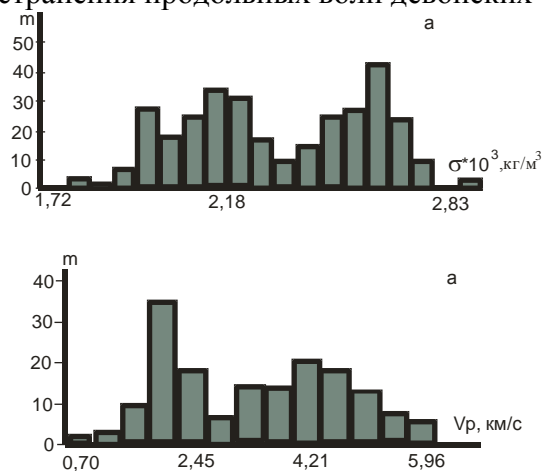


Рис. 2. Гистограммы распределения петрофизических характеристик осадочных пород девонского возраста:

а – для плотности (σ) образцов горных пород; *б* – для скорости (V_p) распространения продольных волн

пород, представленные на рис. 2, отражают плотностную и скоростную дифференциацию этой толщи.

Идентификационное моделирование выполнялось в два этапа. На первом этапе работы был выполнен обобщенный анализ всех доступных петрофизических параметров. Была сформирована выборка из 68 образцов различных пород с максимальным набором петрофизических характеристик: плотность,

скорость распространения продольных упругих волн, магнитная восприимчивость, остаточная намагниченность, поляризуемость, удельное электрическое сопротивление и радиоактивность. В качестве зависимой переменной поочередно назначалась одна из петрофизических характеристик, остальные параметры, включая литологический индекс и глубину залегания образца, рассматривались как зависимые переменные.

В результате первичного идентификационного анализа петрофизических характеристик осадочных пород девонского возраста были получены модели, которые по структуре можно разделить на два типа. Модели первого типа получены после первого ряда селекции и определяются уравнением вида

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_1 \cdot X_2, \quad (1)$$

где Y – зависимая переменная; X_1, X_2 – переменные аргументы.

Модели второго типа получены после второго ряда селекции и определяются уравнением вида

$$Y = a_1 + a_2 Z_1 + a_3 Z_2 + a_4 Z_1 Z_2, \quad (2)$$

где

$$Z_1 = b_1 + b_2 X_1 + b_3 X_2 + b_4 X_1 X_2;$$

$$Z_2 = c_1 + c_2 X_3 + c_3 X_4 + c_4 X_3 X_4;$$

Y – зависимая переменная; X_1, X_2, X_3, X_4 – переменные аргументы.

В табл. 2 приводятся характеристики полученных моделей. Первые две модели получены для случая, когда зависимой переменной назначалась плотность образцов горных пород. В модели 1 плотность выражается через магнитную восприимчивость и скорость распространения продольных упругих волн. Во второй модели одной из трех переменных-аргументов также является магнитная восприимчивость, кроме того в уравнении участвуют глубина отбора образца и литологический тип. Модели 3 и 4 позволяют оценить магнитную восприимчивость горных пород: в модели 3 – по значениям плотности и скорости продольных волн или с помощью более сложной зависимости (модель 4) в виде уравнения с тремя переменными аргументами, в котором, кроме скорости продольных волн и плотности присутствует такой фактор, как глубина отбора образца. Модель 5 позволяет рассчитать скорость распространения упругих волн по значениям глубины отбора образца, плотности и магнитной восприимчивости.

Анализ результатов первого этапа моделирования выявил основные факторы, которые участвуют в построении модельных уравнений. На втором этапе была выполнена корректировка матрицы исходных данных, которая сводилась к исключению параметров, не отобранных,

Таблица 2

Характеристики идентификационных моделей петрофизических параметров осадочных пород девонского возраста

№ п/п	Размерность матрицы входных данных	Зависимая переменная	Тип уравнения	Абсолютная погрешность для 60% образцов
1	68×8	$\sigma = f(\chi, Vp)$	1	$\pm 0,06 \text{ г/см}^3$
2	68×8	$\sigma = f(H, \chi, Li)$	2	$\pm 0,1 \text{ г/см}^3$
3	68×8	$\chi = f(\sigma, Vp)$	1	$\pm 50 \cdot 10^{-5} \text{ ед. СИ}$
4	68×8	$\chi = f(H, \sigma, Vp)$	2	$\pm 35 \cdot 10^{-5} \text{ ед. СИ}$
5	68×8	$Vp = f(H, \sigma, \chi)$	2	$\pm 0,8 \text{ км/с}$
7	167×5	$\sigma = f(Li, Vp)$	1	$\pm 0,01 \text{ г/см}^3$
8	167×5	$Vp = f(H, \sigma)$	1	$\pm 0,5 \text{ км/с}$

в уравнения первого этапа. Это позволило увеличить количество образцов, участвующих в моделировании, с 68 до 167. В итоге размерность матрицы исходных данных составила 167×5 . Модели, полученные после второго этапа идентификации, отличаются лучшим качеством (табл. 2). Модель 7 (рис. 3 а, б) определяет плотность как функцию двух переменных – скорости распространения продольных упругих волн и литологического типа образца. Для наглядности экспериментальные и модельные значения плотности отсортированы по литологическому индексу и отражают изменения плотности при пе-

реходе от терригенных к карбонатным породам.

Модель 8 (рис. 4 а, б) связывает скорость распространения продольных упругих волн с плотностью горных пород и глубиной отбора образца. На рисунке экспериментальные и модельные значения отсортированы по глубине отбора.

Модель 7 имеет очевидную практическую значимость, так как позволяет перейти от плотностной модели среды к скоростной, что особенно важно с учетом того, что данные о плотности пород представлены в базе данных наиболее полно.

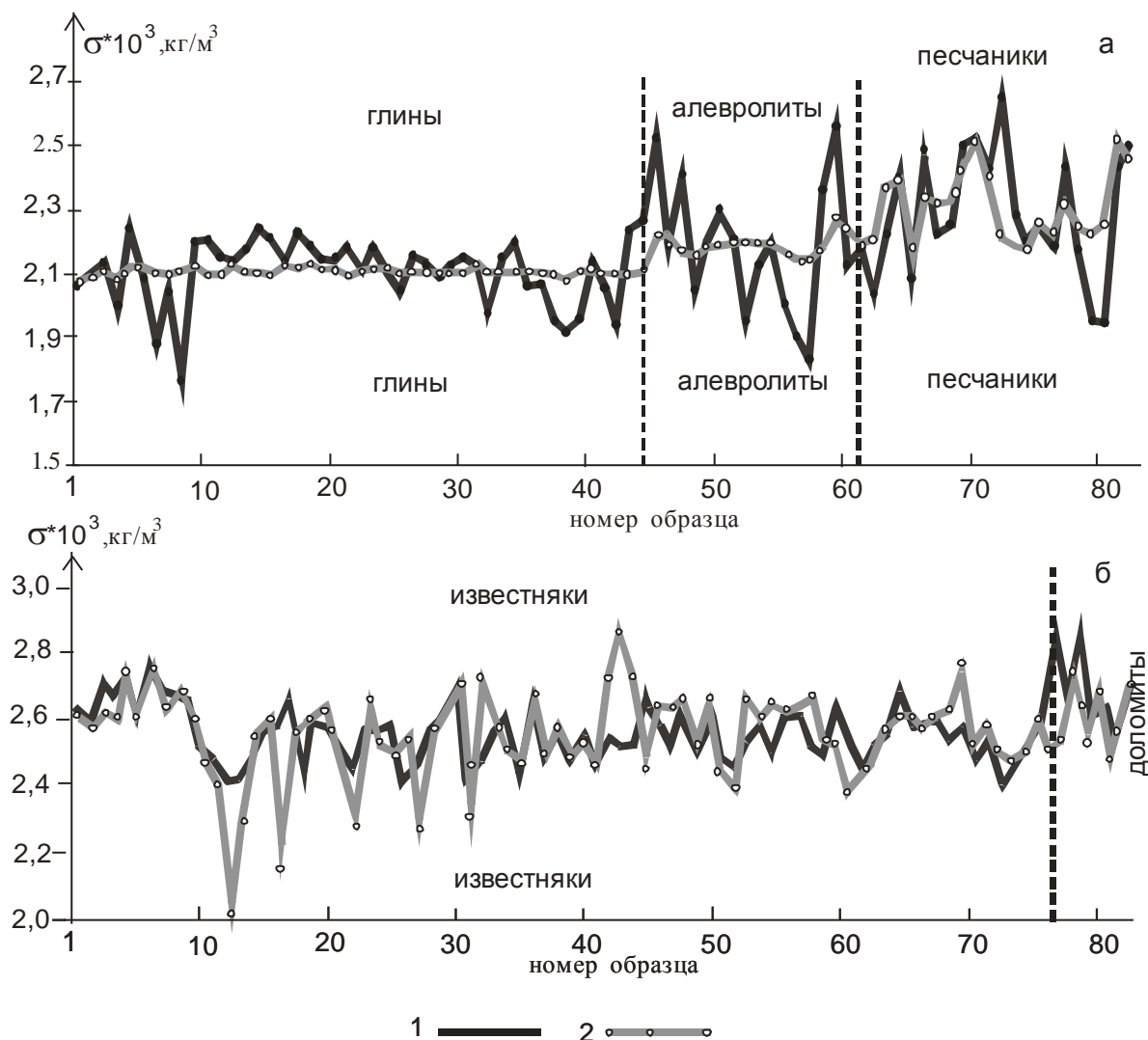


Рис. 3. Результаты моделирования плотности образцов девонских отложений: а – терригенные породы; б – карбонатные породы; 1 – экспериментальные значения; 2 – модельные значения

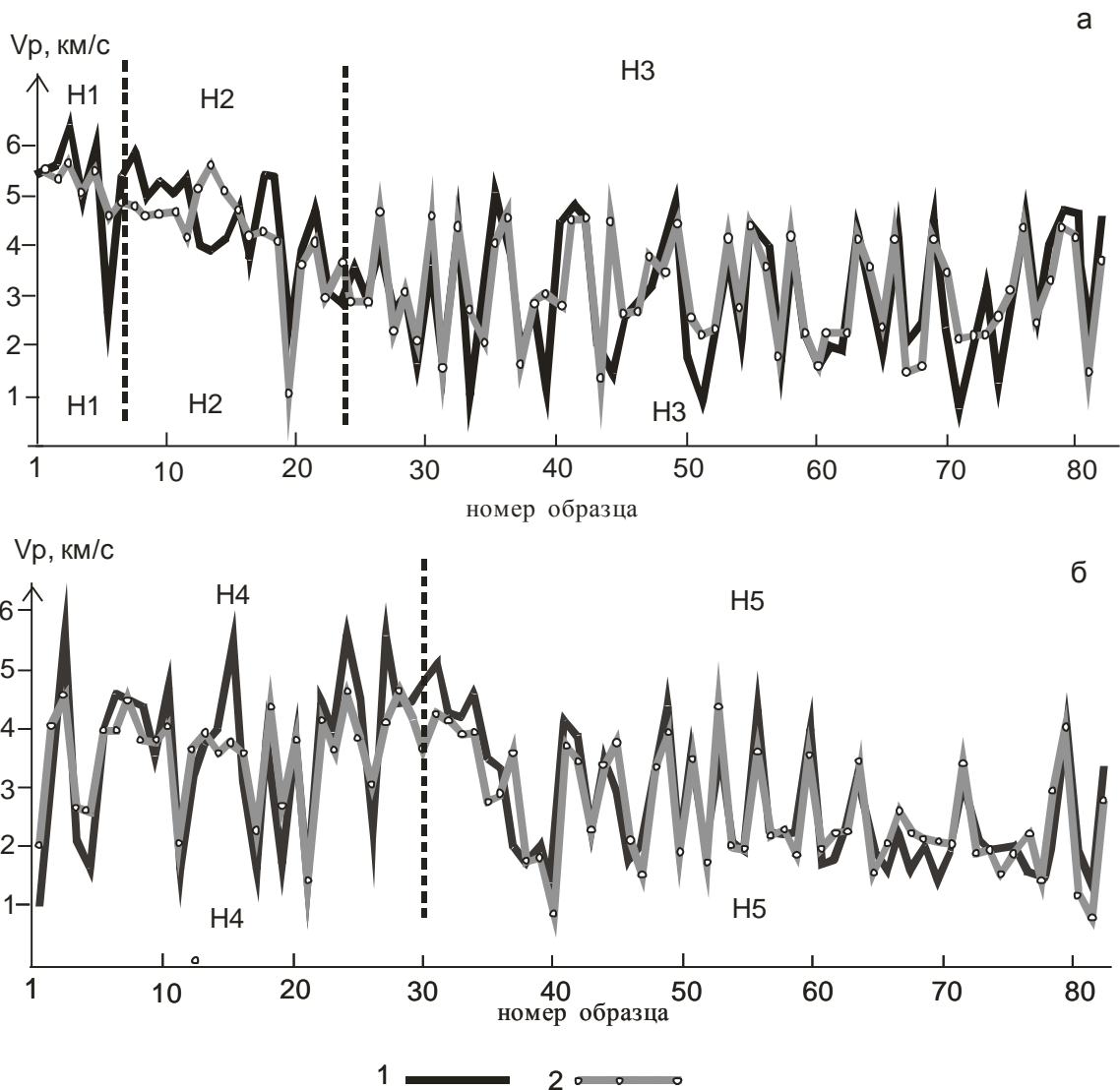


Рис. 4. Результаты моделирования скорости продольных волн образцов девонских отложений:
 а – вертикальная координата точки отбора образцов для значений: H1 от -150 м до -101 м; H2 от -100 м до -50 м; H3 от -50 м до -15 м; б – то же для: H4 от -14 м до -1 м; H5 от 0 м до 50 м; 1 – экспериментальные значения; 2 – модельные значения

Полученные соотношения позволяют перейти от одних известных петрофизических параметров к другим, что дает возможность сформировать обобщённую пространственную структурную модель чехла региона, необходимую для выполнения комплексной интерпретации геофизических полей. Дальнейшее развитие исследований этого направления собственно и предполагает построение карт петрофизических параметров осадочных комплексов на основе установленных статистических закономерностей.

Работа выполнена в рамках научных исследований по гранту РФФИ № 11-05-00110-а.

Библиографический список

1. Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: КаЭМ, 2003. 252 с.
2. Глазнев В.Н., Жаворонкин В.И., Минц М.В., Муравина О.М., Хованский Н.Е. Петроплотностная модель и гравитационный эффект осадочного чехла Воронежского кристаллического массива и его обрамления // Материалы 40-ой сессии международного семинара им. Д.Г.Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». М.: ИФЗ РАН, 2013. С. 107–112.
3. Муравина О.М. Методика создания петрофизической модели оса-

дочного чехла Воронежского кристаллического массива и его обрамления Урала // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Седьмые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Екатеринбург: УрО РАН, 2013. С. 206–208.

4. Муравина О.М. Возможности метода группового учета аргументов при статистической обработке петрофизических данных // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2009. № 2. С. 150–154.

5. Муравина О.М. Метод группового учета аргументов при анализе геофизических данных // Геофизика. 2012. №6. С. 16–20.

6. Савко А.Д., Мануковский С.В., Мизин А.И. и др. Литология и фации донеогеновых отложений Воронежской антеклизы // Труды НИИ геологии ВГУ. Воронеж: Изд. ВГУ, 2001. Вып.3. 201 с.

7. Koenker R., Xiao Z. Inference on the Quantile Regression Process / *Econometrica*, 70, 2002. P.1583–1612.

Рецензент кандидат геолого-минералогических наук,
доцент Иркутского государственного технического университета В.С. Канайкин