

## ПЕТРОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ВОРОНЕЖСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ

О. М. Муравина, В. И. Жаворонкин, В. Н. Глазнев

*Воронежский государственный университет*

*Поступила в редакцию 25 февраля 2013 г.*

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы создания базы петрофизических данных по осадочным породам Воронежской антеклизы и её обрамления. Сформирована пространственная база данных и выполнен робастный анализ основных особенностей распределения петроплотностных характеристик различных литотипов пород чехла. Показано, что при построении модели земной коры региона с использованием гравиметрических данных следует учитывать вклад пород осадочного чехла.

**Ключевые слова:** петрофизическая база данных, осадочные породы, робастные оценки, статистические свойства плотности пород.

**Abstract.** The article deals with the issues of Petrophysical data on sedimentary rocks of the Voronezh antecline and its framing. A spatial database and perform a robust analysis of the main features of the distribution characteristics of different lithological rocks types. It is shown that for construction a model of the Earth's crust in the region should take into account the contribution of sedimentary cover rocks.

**Key words:** petrophysical data-base, sedimentary rocks, robust estimations, statistical properties of the rocks densities

### Введение

Построение комплексной геофизической модели литосферы Воронежского кристаллического массива (ВКМ) по данным гравиметрии, магнитометрии, геотермии, электрометрии и материалов региональных и детальнейших сейсмических исследований основано на принципах совместного решения обратных задач геофизики [1, 2]. В рамках такого подхода принципиально важным является формирование некоторого начального приближения изучаемой среды, которое должно базироваться на известных (или предполагаемых) физических свойствах типичных пород изучаемого региона. Как показывает накопленный опыт применения комплексного моделирования, именно геологически содержательный выбор начального приближения модели может обеспечить достоверность получаемых результатов геофизической интерпретации. При этом в представлении о начальном приближении модели среды должны включаться как физические свойства пород, так и имеющиеся геологические и геофизические сведения о характере границ изучаемых комплексов пород.

Важным аспектом комплексного геофизического изучения среды является решение обратных задач в рамках каждого из используемых геофизи-

ческих методов [1, 2]. Очевидно, что влияние наиболее близко расположенных к поверхности наблюдений источников физических полей может существенно сказаться на качестве интерпретации данных и, следовательно, на точности восстановления геологического строения среды. Такое положение особенно касается потенциальных методов геофизики – гравиметрии и магнитометрии, где близкие к поверхности источники аномалий вносят существенный вклад в суммарное наблюдаемое поле. Аналогично сказывается влияние геометрии пространства и его физических свойств на решение задач электрометрии и геотермии.

В рамках задачи геофизического изучения строения литосферы ВКМ возникает также проблема достаточно точного учёта влияния самой верхней части разреза на результаты геофизического моделирования. Для изучаемой территории (ВКМ и его обрамления) верхняя часть реального разреза сложена осадочными породами Воронежской антеклизы [3], которые собственно и формируют некоторую часть аномальных геофизических полей региона. Кроме того, сама территория ВКМ обрамляется крупными депрессиями [4], заполненными разнородными осадочными комплексами: Московской синеклизой, Рязано-Саратовским прогибом, Прикаспийской и Днепровско-Донецкой впадинами. Размеры этих структур весьма значительны в плане, а амплитуда погружения фунда-

мента для двух последних крупных региональных структур составляет около 20 км. Следует также отметить, что для территории ВКМ известны достаточно значительные по амплитудам (более 50 метров) локальные выступы кристаллического фундамента [5], опосредованное влияние которых, в виде резкого уменьшения мощности осадочного комплекса, несомненно, даёт некоторые осложнения в наблюдаемых аномальных геофизических полях региона.

Таким образом, приведённые выше соображения о роли пород осадочного чехла в процедуре комплексного геофизического моделирования, требуют тщательной численной проверки и формализации, основанной на реальных данных о физических свойствах пород чехла изучаемой территории ВКМ и прилегающих районов. Именно с этих позиций нами были, в первую очередь, детально исследованы петрофизические характеристики пород осадочного чехла Воронежской антеклизы.

### Исходные данные

Исходными данными при построении петрофизической модели осадочного чехла Воронежской антеклизы послужили многочисленные первичные материалы измерений физических свойств керна пород, выполненных в производственных и научных организациях региона в процессе геологического изучения собственно чехла и фундамента ВКМ. Работы такого плана реализовывались на протяжении последних 60 лет с различной степенью интенсивности. Основная часть исследований посвящена, разумеется, изучению петрофизических характеристик кристаллических пород фундамента (см. библиографические ссылки ко второй главе монографии [6]), однако имеющиеся фондовые геолого-геофизические материалы содержат достаточно детальное описание первичных данных и по осадочным породам чехла.

В качестве таких исходных петрофизических материалов использованы сводные фондовые результаты измерений физических свойств пород керна скважин, пробуренных на территории ВКМ и его обрамления, представленные в виде баз данных (Стародубцева Л.Т., 2002; 2004). Указанные материалы содержат более 90000 петрофизических определений различных свойств пород керна почти по 4400 скважинам региона [7]. Основная сложность в работе с этой первичной базой данных заключалась в том, что все результаты петрофизических измерений были привязаны только к номерам скважин и глубинам от их устья безотноси-

тельно системы географических координат. Поэтому на первой стадии обработки исходных данных осуществлялась привязка каждой упомянутой в базе скважины к реальным географическим координатам. Эта достаточно объёмная работа была выполнена с использованием ГИС-технологий в системе ArcView 3.2. В итоге была сформирована пространственная база разнородной петрофизической информации, содержащая сведения о плотности, скорости продольных волн, магнитной восприимчивости, остаточной намагниченности, удельном сопротивлении, поляризуемости и радиоактивности пород для образцов керна почти всех использованных скважин [7]. Помимо физических свойств, сформированная база данных содержит необходимые сведения о геологической принадлежности образцов пород керна скважин к определённым типам пород, заданным в рамках достаточно подробной классификации.

В целом сформированная база данных является наиболее полным петрофизическим описанием типичных кристаллических и осадочных пород территории ВКМ. В рамках данного исследования ниже будут рассмотрены только петрофизические характеристики пород осадочного чехла, поскольку этим породам ранее не уделялось достаточного внимания, и их роль в геофизическом моделировании оценивалась не в должной мере (Р.Ш. Красовицкая, 1962, А.П. Тарков, 1974 и др.). Особо отметим, что в данной работе анализируются плотности осадочных пород, поскольку в гравитационном моделировании, как демонстрировалось во многих работах (см. библиографию в [8, 9]), вклад эффекта этих пород может быть весьма существенным.

### Обработка данных

Созданная пространственная база петрофизических данных отвечает современными требованиями, что позволяет эффективно выполнять поиск и выборки материалов по сформированным признаковым или пространственным запросам с использованием стандартных методов ГИС, а также обрабатывать и анализировать данные с применением новейших математических разработок. Средствами ГИС из общей базы данных были выделены только породы осадочного чехла, петрофизические характеристики которых и рассматриваются в нашей работе. В сформированной выборке выявлены наиболее распространённые типы осадочных пород Воронежской антеклизы, представленные песчаниками, алевритами, аргиллитами, различными глинами, карбонатными породами, сланцами, фос-

форитами и рядом иных, менее распространённых в осадочном чехле региона, разновидностей пород.

Дальнейшая 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. Использование обобщённой стратификации осадочного чехла обусловлено тем, что фактически при решении прямых и обратных задач геофизики нам требуется достаточно большой площадью охват исследуемой территории, особенно при изучении глубинного строения земной коры по данным потенциальных методов. Поскольку на прилегающих к ВКМ частях Русской платформы петрофизические свойства пород чехла [10] изучены, в основном, для крупных стратиграфических единиц (отделов или их объединений по [11, 12]), то и для территории Воронежской антеклизы потребовалось сформировать систему исходных петрофизических данных, которые в дальнейшем будут включены в единую геофизическую модель.

Для решения этих задач потребовалось выполнить: разбраковку неоднозначных и противоречивых данных, осуществить привязку данных к стратиграфическим горизонтам; рассчитать усреднённые петрофизические характеристики по литологическим типам и возрастным группам пород. Заключительным элементом обработки явился статистический анализ петрофизических данных по осадочному чехлу Воронежской антеклизы и формирование некоторых массивов петрофизических характеристик, пригодных для решения прямых и обратных задач геофизики.

Остановимся более подробно на отдельных этапах работы. Важной задачей нашего исследования являлась необходимость согласования известных сведений о мощности осадочного чехла с положением границ кристаллического фундамента по каждой скважине. Для ее решения были оценены и учтены возможные углы наклона скважин. После разделения данных в скважинах с учетом глубинного положения стратиграфических горизонтов осадочного чехла, стало возможным выполнить классификацию образцов осадочных пород по геологическим возрастам. В результате каждое значение плотности образца с определенной географической координатой (координата нахождения скважины) было соотнесено с глубинами отдель-

ных слоёв в точках стратифицированного осадочного комплекса. Так как для выполнения всех описанных выше процедур стандартных средств ГИС было недостаточно, были разработаны специальные программные модули в среде MathCad. На основе известной информации о мощностях отдельных слоев стратифицированного осадочного комплекса определялось попадание координат точек с образцами в отдельные осадочные слои по стволу каждой скважины. Для учета возможности выклинивания слоев задавалась предельная минимальная мощность слоя, меньше которой слой определялся выклинившимся, а значение плотности образца относилось либо к верхнему, либо к нижнему стратиграфическому горизонту. Для учета неравномерности распределения данных по глубине был выполнен расчет средневзвешенных значений плотности по отдельным стратиграфическим горизонтам.

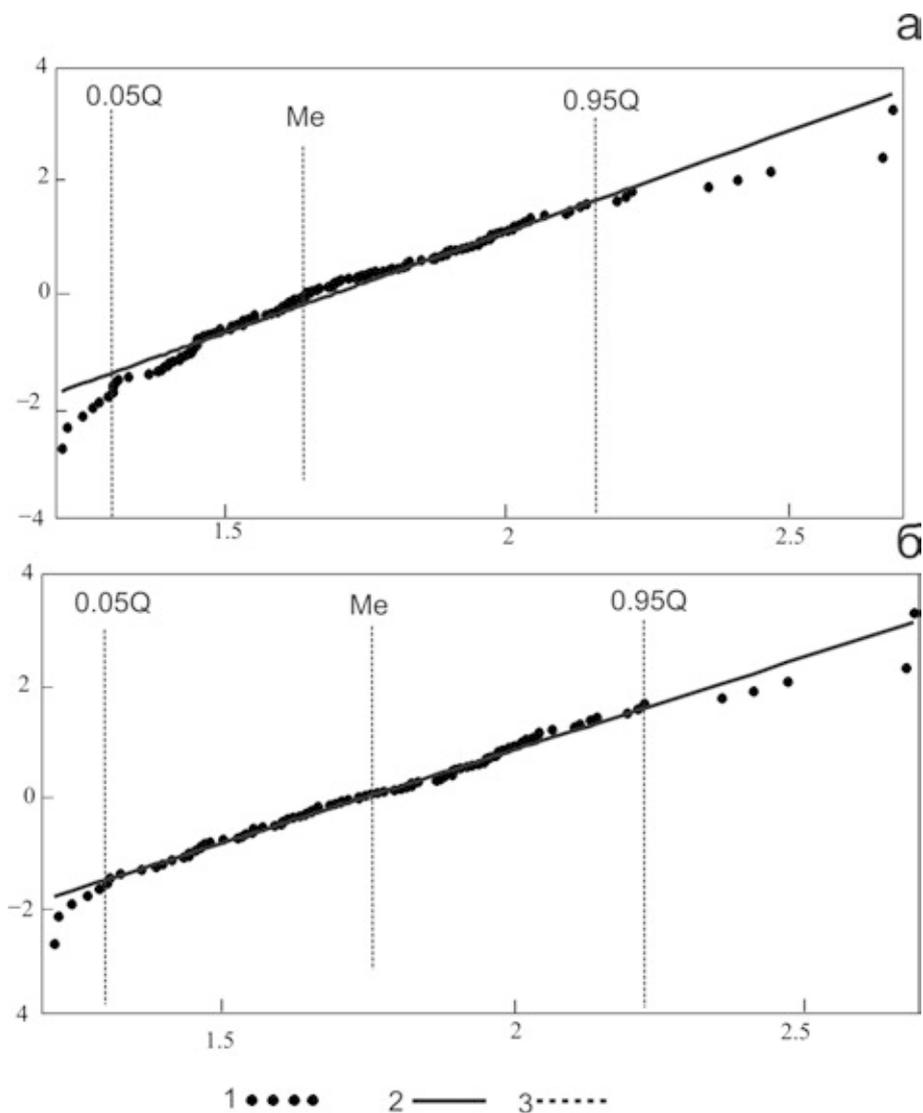
Таким образом, в результате обработки данных каждое значение петрофизической характеристики образца ядра получило помимо пространственных координат, атрибут принадлежности к слою определенного возраста, что позволило сформировать выборки значений петрофизических характеристик каждой возрастной группы пород.

После предварительной обработки появилась возможность приступить непосредственно к анализу фактических данных: выполнить статистическую обработку плотностных параметров пород различных литотипов и различных возрастов, проследить динамику изменения петрофизических характеристик с изменением геологического возраста, глубины залегания и т.д.

Собственно с целью детальной статистической обработки петрофизических характеристик были сформированы выборки данных по каждой возрастной группе и по литотипам пород в рамках отдельных слоёв принятой стратификации осадочного комплекса. На первом этапе статистическая обработка включала в себя такие стандартные процедуры как построение гистограмм и расчет статистических моментов. Первичная 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 исполь-

зован квантильный анализ [13]. Графики квантильной регрессии (рис. 1) позволили выявить зоны неоднородности, которые, по возможности, были скорректированы отбраковкой нетипичных значений, применением методики усечения «хвостов» [14]. На рис. 1 (а, б) представлены диаграммы квантильной регрессии для пород неогенового возраста до проведения корректирующих процедур

(рис. 1, а) и после их выполнения (рис. 1, б). В результате, использованные подходы к статистическому анализу сгруппированных данных позволили выявить основные закономерности в распределении петрофизических характеристик и определить направление дальнейшей более глубокой статистической обработки.

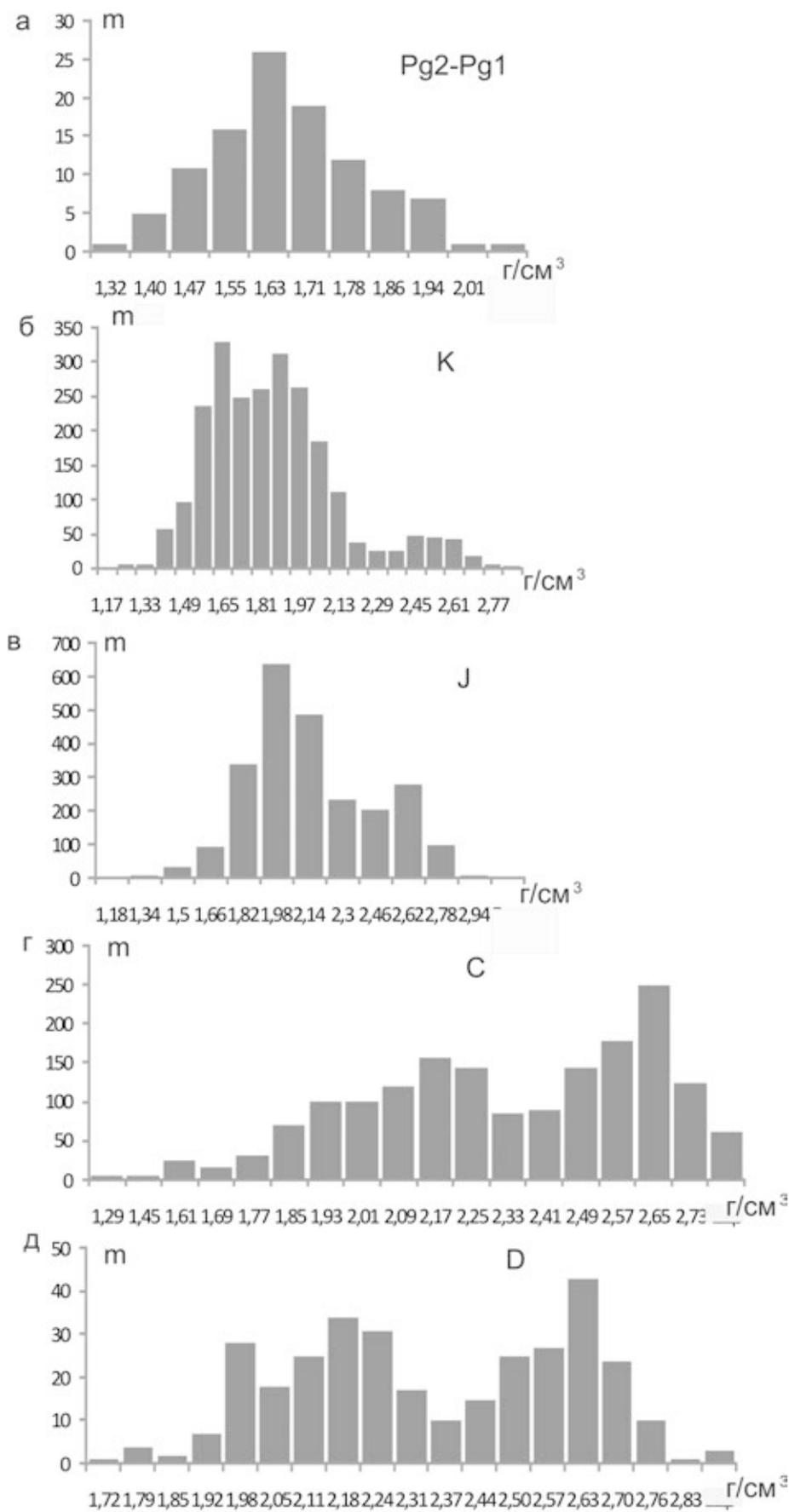


**Рис. 1.** Графики квантильной регрессии для пород неогенового возраста: а – первичные данные; б – скорректированные данные; вертикальная ось – квантиль (0,1) – нормального распределения; горизонтальная ось – квантиль данных; 1 – экспериментальная зависимость; 2 – теоретическая зависимость; 3 – линия 5 % квантиля (0.05Q), линия медианы (Me), линия 95 % квантиля (0.95Q)

### Анализ результатов

Исходя из изложенных выше соображений, кратко рассмотрим главные черты распределения петрофизических характеристик для плотности осадочных отложений по отдельным возрастным группам.

Плотностные особенности стратиграфических комплексов пород региона и прилегающих территорий показаны на обобщенных гистограммах распределения плотности (рис. 2). Значения основных статистических характеристик представлены в таблице. Распределения плотности осадочных



**Рис. 2.** Обобщённые гистограммы распределения плотности для пород осадочного чехла Воронежской антеклизы и сопредельных территорий: а – палеогеновые отложения; б – меловые отложения; в – юрские отложения; г – каменноугольные отложения; д – девонские отложения

пород в районе ВКМ отражают сложную слоистую структуру осадочного чехла существенно дифференцированную по плотности.

Таблица  
Статистические характеристики возрастных групп осадочных пород

Основные статистические характеристики	Возрастные группы пород					
	N <sub>1</sub> -Pg <sub>3</sub>	Pg <sub>2</sub> -Pg <sub>1</sub>	K	J	C	D
Среднее, г/см <sup>3</sup>	1,75	1,63	1,83	2,08	2,30	2,31
Медиана, г/см <sup>3</sup>	1,71	1,61	1,8	2,02	2,33	2,28
Мода, г/см <sup>3</sup>	1,83	1,61	1,8	1,98	2,6	2,58
Стандартное отклонение	0,28	0,15	0,28	0,30	0,31	0,27
Дисперсия выборки	0,077	0,024	0,077	0,092	0,098	0,070
Экссесс	0,47	-0,03	0,97	-0,53	-0,55	-1,14
Асимметрия	0,54	0,32	0,95	0,35	-0,44	-0,06
Минимум, г/см <sup>3</sup>	1,22	1,32	1,17	1,18	1,21	1,72
Максимум, г/см <sup>3</sup>	2,69	2,09	2,8	2,84	2,88	2,89
Объем выборки	119	107	2356	2418	1694	326

Отложения неогенового возраста представлены песчано-глинистыми отложениями плиоцена, олигоцена и миоцена. Плотность отложений плиоцена изменяется от 1.65 до 2.37 г/см<sup>3</sup>, олигоцена и миоцена – от 1.36 до 2.36 г/см<sup>3</sup>. Плотностная дифференциация пород олигоцена обусловлена количеством глинистого материала и другими структурно-литологическими особенностями различиями водонасыщенности пород. Мощность отложений неогена составляет от 10 до 25 метров. Отложения широко развиты на северо-востоке Воронежской области в левобережной части Дона. В остальных районах встречаются локально. Породы палеогенового возраста, присутствующие в Белгородской области, а также на юге Курской и Воронежской областей [3], представлены в основном песками и суглинками с примесью карбонатного материала. Плотность пород изменяется от 1.32 до 2.09 г/см<sup>3</sup>, а мощность всего палеогенового комплекса достигает примерно 60 метров. Гистограмма распределения плотности пород нижнего и среднего палеогена (рис. 2, а) одномодальна, симметрична, близка к нормальной, что свидетельствует об относительно однородном плотностном составе отложений. Медианные и модальные значения совпадают (1.61 г/см<sup>3</sup>) и близки к среднему значению плотности (1.63 г/см<sup>3</sup>).

Ниже по разрезу залегают отложения мелового периода, которые наиболее широко развиты в пре-

делах изучаемой территории. На севере и северо-востоке Воронежской области и в южной части Липецкой области отложения практически повсеместно перекрыты неогеном. Мощность меловых отложений колеблется от первых десятков до 500 м. Отложения меловой системы делятся на две различные по литологии толщи [3] – нижнюю терригенную в объеме неокомского надъяруса, аптского, альбского и сеноманского ярусов и верхнюю – преимущественно карбонатную, представленную породами туронского, коньякского, сантонского, кампанского и маастрихского ярусов.

Особенности пород верхнего и нижнего мела отчетливо демонстрирует обобщенная двумодальная гистограмма (рис. 2, б), построенная по представительной выборке объемом 2356 значений (табл. 1). В верхнем отделе мела можно выделить три главных слоя осадочных пород, обладающих различной плотностью. В самой верхней части залегают алевроиты и алевролиты, плотность которых изменяется от 1.50 до 2.8 г/см<sup>3</sup>. Значительная плотностная дифференциация меловых пород обусловлена плотностью упаковки зёрен и, соответственно, степенью водонасыщенности пород. В толще сантонских отложений отмечается большая фациальная изменчивость (от мела до мергеля), но, несмотря на это, плотность варьирует в узких пределах, что является характерной особенностью карбонатных отложений [10]. Нижняя часть толщи сложена белыми, мелоподобными мергелями близкими к мелу, но более плотными. Выше по разрезу происходит увеличение плотности, и мергели переходят в более глинистые разновидности, сменяющиеся в свою очередь менее плотными опоковидными мергелями, глинами и песчаниками. Плотность отложений этого слоя варьирует от 1.40 до 1.80 г/см<sup>3</sup>. Ниже залегают отложения коньякского и туронского ярусов, сложенные массивными мелами. Плотность этих отложений изменяется в интервале от 1.21 до 2.06 г/см<sup>3</sup>. Значительное понижение плотности пород связано, вероятно, с наличием частичного дробления пород в условиях воздействия тектонических процессов. Породы сеномана, альба, апта и неокома представлены песками с локальными линзами гравия и гальки с примесью глин. Содержание примесей глин увеличивается с глубиной, что и обуславливает общее возрастание плотности этого типа пород в диапазоне изменений от 1.72 до 2.52 г/см<sup>3</sup>. В меловых отложениях на всей территории Воронежской антеклизы и за её пределами встречаются отдельные фосфоритовые плиты мощностью до 2 м и конгло-

мераты фосфоритов. Плотность фосфоритов существенно отличается от вмещающих пород и составляет 2.8–3.0 г/см<sup>3</sup>.

Юрская система представлена, в основном глинами слюдястыми, известковистыми с прослоями известняка, мергеля и песчаника, а также галькой фосфоритов. В низах юры залегают пески разнозернистые, с галькой и гравием кварца, с прослоями песчаников, глин и угля, с включениями пирита, сидерита и обугленной древесины. Юрские отложения распространены повсеместно на изучаемой территории. Мощность отложений увеличивается, преимущественно, в направлении с севера на юг [11]. Выборка данных образцов, относящихся к юрской системе также достаточно представительна (см. табл.). Обобщенная гистограмма юрских отложений представлена на рис. 1, в. Плотность отложений варьирует от 1.60 до 2.84 г/см<sup>3</sup>.

В составе каменноугольной системы выделяются нижний (турнейский, визейский, серпуховский ярусы) и средний (башкирский и московский ярусы) отделы [3]. Каменноугольные отложения развиты на юго-западном склоне Воронежской антеклизы и её юго-восточном замыкании [3]. Мощности каменноугольных образований нарастают от первых метров у границы выклинивания до сотен метров по направлению к отрицательным структурам обрамления антеклизы. Каменноугольные отложения нижнего отдела представлены карбонатными породами, преимущественно известняками. Плотность известняков меняется от 1.92 г/см<sup>3</sup> до 2,88 г/см<sup>3</sup>. Более плотные органогенные известняки (2.60 г/см<sup>3</sup>), плотность глинистых известняков ниже и составляет в среднем 2.46 г/см<sup>3</sup>. Широко распространены также песчано-глинистые отложения. Верхняя часть разреза сложена глинами алевролитистыми, слюдястыми, песчаными средняя плотность которых меняется от 1.92 г/см<sup>3</sup> до 2.02 г/см<sup>3</sup>. Глины переслаиваются с мергелями, известняками, алевролитами, песчаниками. Обобщенную гистограмму плотности пород (рис. 2, г) отличают отрицательные значения асимметрии и эксцесса, многомодальность, существенное несовпадение медианных и модальных значений. Таким образом, особенности приведённых распределений подтверждают неоднородный петроплотностной состав пород этой возрастной группы.

Девонские толщи сложены чрезвычайно разнообразными породами – терригенными, органогенными, хемогенными (эвапоритами) и их промежуточными разновидностями, эффузивно-осадочными и

эффузивными. Многие авторы по преобладающему развитию пород выделяют нижнюю терригенную и верхнюю карбонатную толщи, граница между которыми проводится в средней части франского яруса [3]. 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, особенно за пределами собственно массива [12]. В пределах Воронежской антеклизы мощность отложений колеблется от 0 у границ выклинивания до 600 м на севере и северо-востоке [3]. Девонские отложения представлены глинами, а также глинистыми разновидностями известняков с прослоями мергелей, глин и алевролитов. В рамках толщи 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 1.3 г/см<sup>3</sup> для песчаных отложений до 3.1 г/см<sup>3</sup> для массивных известняков. Сводная гистограмма распределения плотности девонских пород, представленная на рис. 2, д, достаточно наглядно отражает плотностную дифференциацию этой толщи.

### **Выводы**

Проведённые детальные реконструкции и анализ петрофизических свойств осадочных пород Воронежской антеклизы показывают, что петроплотностная неоднородность пород чехла достаточна для того, чтобы вносить заметный вклад в наблюдаемое гравитационное поле региона. Первые оценочные численные расчёты [15], выполненные на основе приведённых материалов, подтверждают высказанный тезис. Таким образом, для построения петроплотностной модели земной коры в пределах ВКМ и его обрамления, включая структурно-вещественные комплексы осадочного чехла, необходимо сформировать обобщённую структурную модель чехла региона, получить аппроксимационные соотношения для плотности, учитывающие литологический состав пород, глубину их залегания и пространственную неоднородность. Решение этих задач требует более детального изучения распределения плотности пород отдельных стратиграфических горизонтов, что и предполагается рассмотреть на следующем этапе работы, опираясь на сформированную пространственную базу петрофизических данных.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазнев В. Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии / В. Н. Глазнев. – Апатиты : КаЭМ, 2003. – 252 с.
2. Кобрунов А. И. Математические основы теории интерпретации геофизических данных / А. И. Кобрунов. – М. : ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. – 288 с.
3. Савко А. Д. Литология и фации донеогеновых отложений Воронежской антеклизы / А. Д. Савко [и др.] // Труды НИИ геологии ВГУ. Вып. 3. – Воронеж : Изд. ВГУ, 2001. – 201 с.
4. Геологическая карта Восточно-Европейской платформы и её складчатого обрамления (в границах бывшего СССР). Масштаб 1 : 2 500 000 / ред. Ю. Р. Беккер. – СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 1996.
5. Шевырев Л. Т. О современном рельефе поверхности кристаллического фундамента Воронежской антеклизы / Л. Т. Шевырев // Изв. ВУЗов. Серия: Геология и разведка. – 1985. – № 11. – С. 12–18.
6. Литосфера Воронежского кристаллического массива по геофизическим и петрофизическим данным / гл.ред. Н. М. Чернышов. – Воронеж : Научная книга, 2012. – 330 с.
7. Глазнев В. Н. Корреляция скорости и плотности пород Воронежского кристаллического массива / В. Н. Глазнев, В. И. Жаворонкин, Н. Е. Хованский // Материалы 39-й сессии международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». – Воронеж : ВГУ, 2012. – С. 73–77.
8. Красовский С. С. Отражение динамики земной коры континентального типа в гравитационном поле / С. С. Красовский. – Киев : Наукова думка, 1981. – 264 с.
9. Голизра Г. Я. Комплексная интерпретация геофизических полей при изучении глубинного строения земной коры / Г. Я. Голизра. – М. : Недра, 1988. – 212 с.
10. Физические свойства осадочных пород Восточно-Европейской платформы / ред.: Н. В. Подоба, М. Л. Озерская. – М. : Недра, 1975. – 280 с.
11. Атлас литолого-палеогеографических карт Русской платформы и её геосинклинального обрамления. Часть 2. Мезозой и кайнозой / ред. А. П. Виноградов. – М.–Л. : Изд-во литературы по геологии и охране недр, 1961. – 104 с.
12. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР. Том 2. Девонский, каменноугольный и пермский периоды / ред. А. П. Виноградов. – М. : Изд-во Всесоюзного аэрогеологического треста, 1969. – 70 с.
13. Koenker R. Inference on the Quantile Regression Process / R. Koenker, Z. Xiao // *Econometrica*. – 2002. – 70. – P. 1583–1612.
14. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений / Дж. Тьюки. – М. : Мир, 1981. – 696 с.
15. Глазнев В. Н. Петроплотностная модель и гравитационный эффект осадочного чехла Воронежского кристаллического массива и его обрамления / В. Н. Глазнев [и др.] // Материалы 40-й сессии международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». – М. : ИФЗ РАН, 2013. – С. 107–112.

*Воронежский государственный университет*

*О. М. Муравина, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики  
Тел. 8 (473) 220-83-85  
muravina@geol.vsu.ru*

*В. И. Жаворонкин, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики  
Тел. 8 (473) 220-83-85  
zhavoronkin@geol.vsu.ru*

*В. Н. Глазнев, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой геофизики  
Тел. 8 (473) 220-83-85  
glaznev@geol.vsu.ru*

*Voronezh State University*

*O. M. Muravina, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Professor assistant, geophysical department  
Tel. 8 (473) 220-83-85  
muravina@geol.vsu.ru*

*V. I. Zhavoronkin, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Professor assistant, geophysical department  
Tel. 8 (473) 220-83-85  
zhavoronkin@geol.vsu.ru*

*V. N. Glaznev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the geophysical department  
Tel. 8 (473) 220-83-85  
glaznev@geol.vsu.ru*