

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА КОМПРЕССИОННЫХ, ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ КОМИ

С.Н. Попов<sup>1</sup>, А.С. Кусайко<sup>2</sup>, И.А. Озун<sup>3</sup>

1 – Институт проблем нефти и газа РАН; 2 – НПП «Геопрофи»;

3 – ООО «ЛУКОЙЛ-Коми»

e-mail: [popov@ipng.ru](mailto:popov@ipng.ru)

Лабораторные исследования кернового материала, отобранного из скважин нефтяных и газовых месторождений, является неотъемлемой частью изучения разрабатываемых продуктивных объектов. Обычно, в первую очередь исследуются фильтрационные характеристики пластов-коллекторов, и уделяется мало внимания его физико-механическим свойствам. Однако, в связи с тем, что в последнее время нефтяные и газовые компании активно стали использовать при разведке и проектировании разработки месторождений углеводородов геомеханические модели, изучение упругих и прочностных свойств коллекторов нефти и газа становится все более актуальным [1–4]. В рамках данной работы были проведены исследования компрессионных, деформационных (модуль упругости, модуль деформаций, коэффициент Пуассона) и прочностных (предел прочности при растяжении, предел прочности при сжатии) свойств некоторых месторождений Республики Коми. Образцы отбирались таким образом, чтобы охватить, по возможности, основные продуктивные пласты, которые содержат наибольшие запасы углеводородного сырья. Характеристики образцов керна, использованных для исследований, показаны в табл. 1.

*Таблица 1*

**Характеристики образцов исходного кернового материала,  
отобранного для исследований**

№	Месторождение	№ скв.	Продуктивный объект	№ обр.	Глуб. отбора, м		Итого, м
					от	до	
1	Харьягинское	100 Р	Р2-III	Х-100 р-1	1668,95	1669,02	0,07
2	Харьягинское	100 Р	Р2-II	Х-100 р-2	1700,95	1701,08	0,13
3	Харьягинское	100 Р	T1-I	Х-100 р-3	1411,65	1411,73	0,08
4	Харьягинское	1118	D2st	Х-1118-4	3719,08	3719,18	0,1
5	Возейское	2 Оц	P1a	В-2Оц-5	1599,79	1599,86	0,07
6	Возейское	2 Оц	C3	В-2Оц-6	1645,68	1645,75	0,07
7	Возейское	2006	Ф1	В-2006-7	2160,5	2160,57	0,07
8	Харьягинское	1068	D2af	Х-1068-8	3787,1	3787,22	0,12
9	Осваньюрское	3	C1s	О-3-9	1962,79	1962,9	0,11

Для исследования компрессионных свойств из исходного кернового материала выбуривались цилиндрические образцы с диаметром и высотой 30 мм. Для каждого образца разрабатывалась специальная программа исследований, которая учитывала следующие параметры: глубину залегания продуктивного объекта; начальное пластовое давление; величину снижения давления; коэффициент Пуассона породы-коллектора; коэффициент Био.

При условии равенства горизонтальных эффективных напряжений, среднее эффективное напряжение для экспериментов определялось на основе следующей зависимости:

$$\sigma_{eff.av.} = \frac{2\sigma_{eff.h} + \sigma_{eff.v}}{3}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{eff.h}$  – эффективное горизонтальное напряжение;  $\sigma_{eff.v}$  – эффективное вертикальное напряжение.

Вертикальное эффективное напряжение вычислялось из соотношения:

$$\sigma_{eff.v.} = \rho g H - \alpha P, \quad (2)$$

где  $\rho$  – средняя плотность вышележащей толщи пород;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – глубина залегания продуктивного объекта;  $\alpha$  – коэффициент Био;  $P$  – поровое давление флюида.

Эффективное горизонтальное напряжение определялось на основе известного значения вертикального напряжения [1–2, 5–6]:

$$\sigma_{eff.h.} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{eff.v} = \frac{\nu}{1-\nu} (\rho g H - \alpha P), \quad (3)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона породы-коллектора.

Параметры коэффициент Пуассона и коэффициент Био для расчета эффективных напряжений определялись на основе литературных данных для каждого типа породы [1–2].

При проведении экспериментов, для соответствия пластовых и лабораторных условий, эффективные напряжения вычислялись как разница между внутривисочным давлением и давлением всестороннего обжима образцов, с таким условием, чтобы сохранялось равенство:

$$\sigma_{eff.av.} = P_{conf} - P, \quad (4)$$

где  $P_{conf}$  – давление всестороннего обжима образцов в лабораторных экспериментах.

В табл. 2 для примера приведена программа испытаний одного из исследованных образцов керна.

С целью экономии времени использования лабораторной установки, образцы подвергались только одному циклу нагрузки-разгрузки, и на каждом шаге изменения эффективных напряжений выдержка составляла 0,5 часа. Всего изменение пористости образцов определялось в четырех точках ветви нагрузки и в двух точках ветви разгрузки (см. табл. 2). На рис. 1 представлены результаты лабораторных исследований.

*Таблица 2*

**Программа испытаний обр.118  
(скв.100Р, объект Р2-III, глубина 1669.0)**

№ шага	$P_{эфф}$ , МПа	Время выдержки, часы
1	0,5	0,5
2	5	0,5
3	14	0,5
4	26,5	0,5
5	13	0,5
6	0,5	0,5
Итого		3

Для удобства последующей обработки на графиках значение пористости строится в относительных единицах (нормированное по отношению к начальному значению), а от величины эффективных напряжений определяется натуральный логарифм (см. рис. 1). Как видно из рисунка, для всех образцов наблюдается существенное снижение пористости при увеличении эффективных напряжений (снижении пластового давления). Наибольшее снижение пористости происходит для образцов пород, отобранных их пластов Р2-II и Ф1, в меньшей степени – для пластов D2st, С3. Максимальное снижение данной характеристики составило 17% относительной величины (пласт Р2-II Харьягинского месторождения), минимальное – 5% относительной величины (пласт С3 Возейского месторождения).

Результаты лабораторных испытаний обрабатывались по специальной методике. На рис. 2 представлена схема, согласно которой определяются основные параметры, характеризующие уплотнение горной породы-коллектора:  $\lambda$  – коэффициент общего (упругого и пластического) уплотнения;  $\kappa$  – коэффициент упругого уплотнения;  $\chi$  – параметр упрочнения.

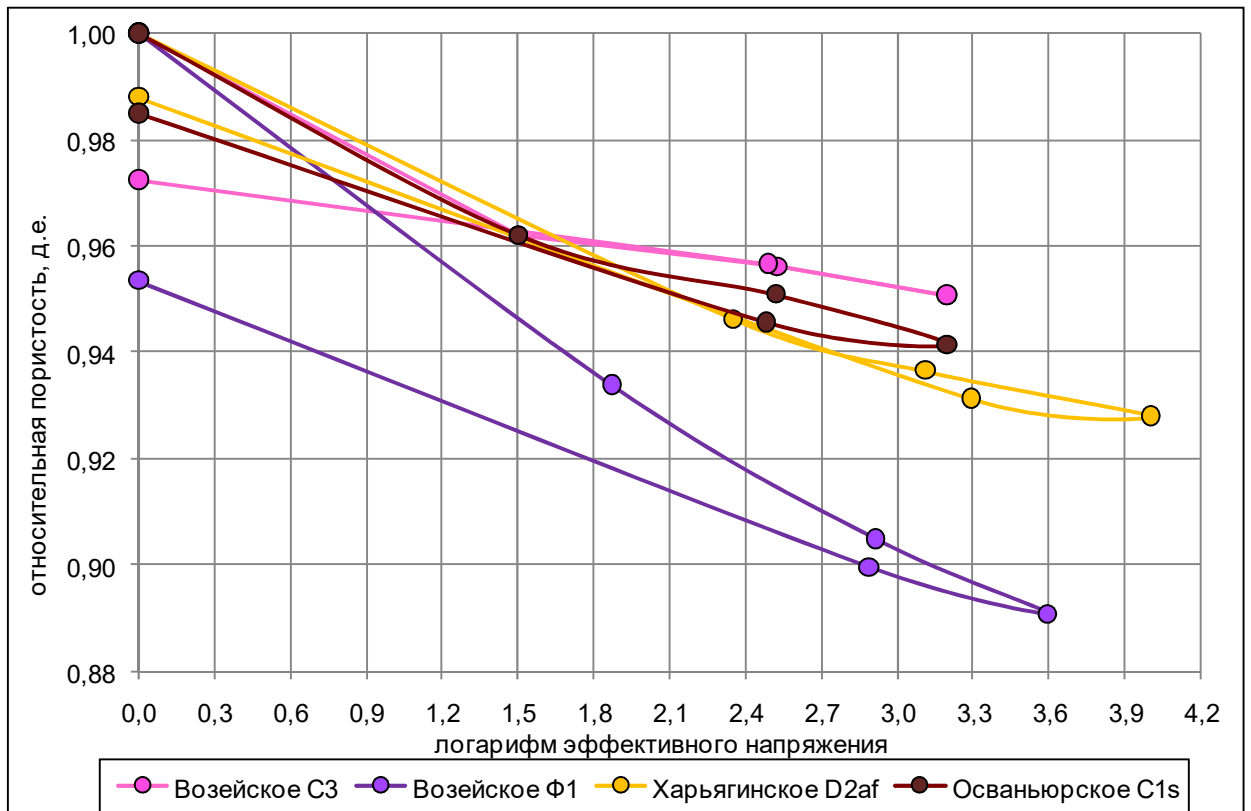
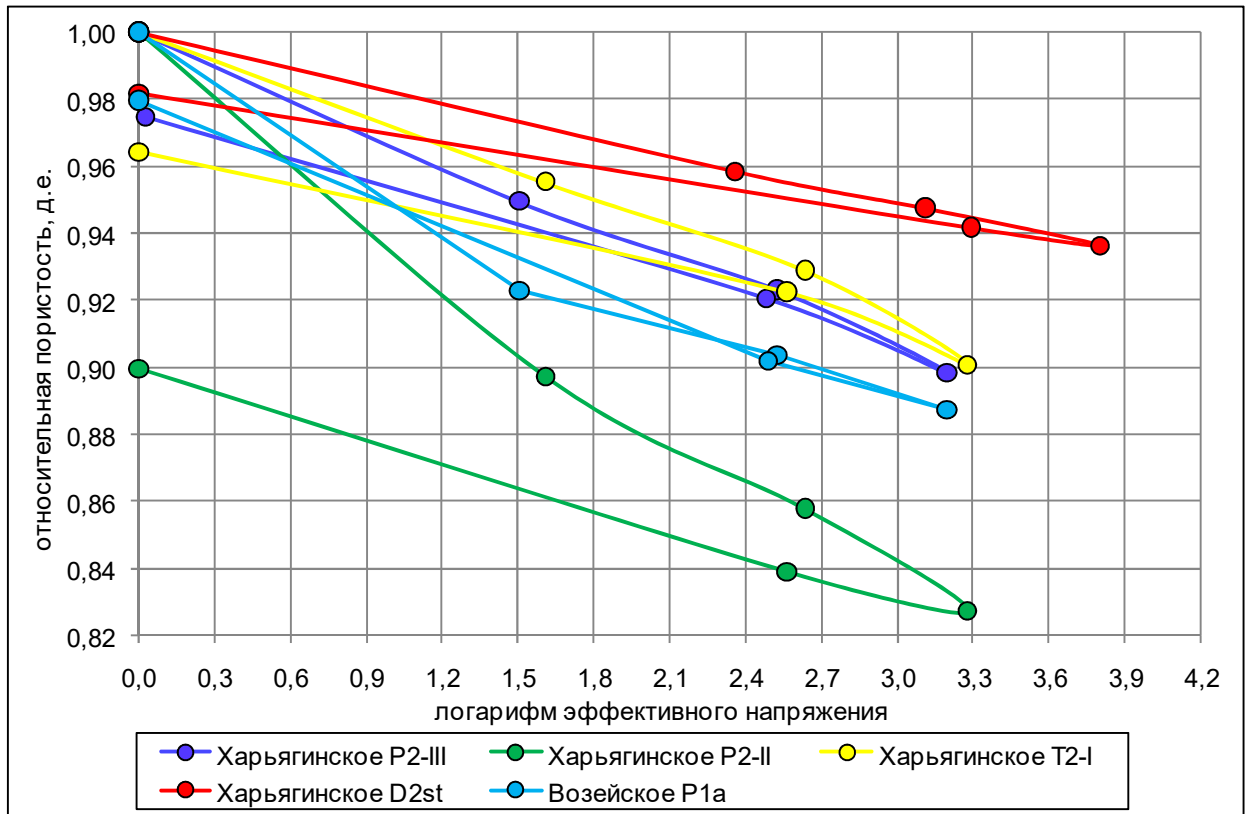


Рис. 1. Изменение относительной пористости образцов керн в зависимости от логарифма эффективных напряжений

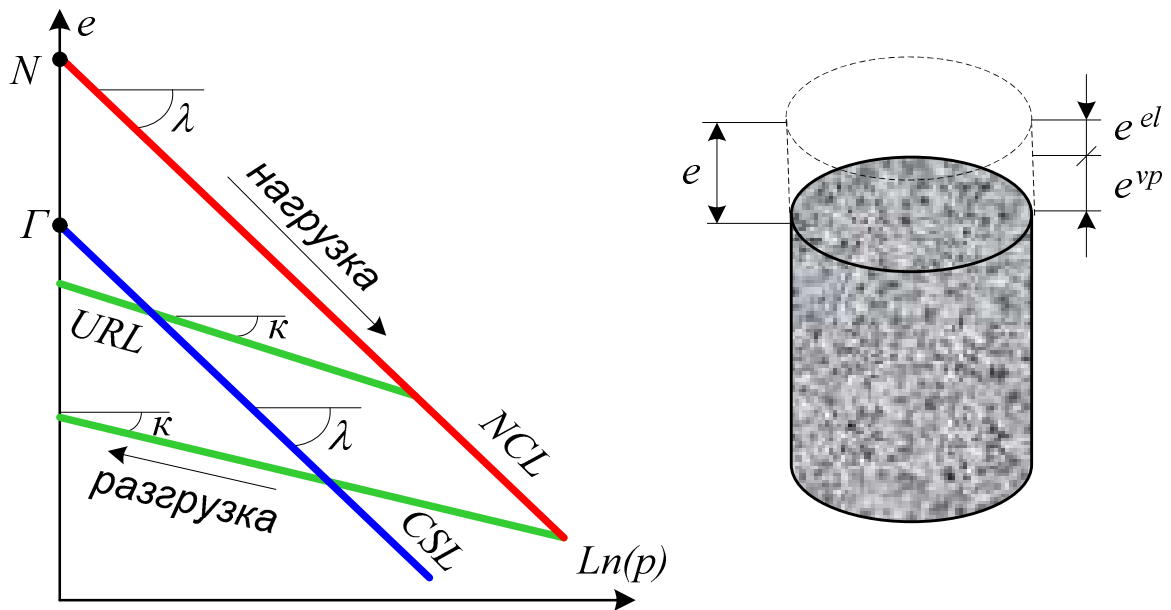


Рис. 2. Схема компрессионных испытаний и изменения пористости образца керна

При деформации породы под воздействием нагрузки изменение объема порового пространства происходит за счет упругих ( $e^{el}$ ) и пластических ( $e^{vp}$ ) деформаций (см. рис. 2).

Каждая из этих составляющих может быть охарактеризована через определенный параметр. На рис. 2 линия  $NCL$  («normal consolidation line») представляет собой линию нормальной консолидации породы;  $CSL$  («critical state line») – линия предельного состояния;  $URL$  («unload-reload line») – линия разгрузки и повторной нагрузки [7–8].

Параметр  $\lambda$  определяется следующим образом:

$$\lambda = \frac{e_1 - e_0}{\ln \frac{p_2}{p_1}}, \quad (5)$$

где величины  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $p_1$  и  $p_2$  – соответствующие значения пористости и эффективного напряжения.

Далее находится параметр  $\kappa$ :

$$\kappa = \frac{e_2 - e_1}{\ln \frac{p_2}{p_1}}. \quad (6)$$

И в заключение можно определить параметр упрочнения породы:

$$\chi = \frac{1 - e_0}{\lambda - \kappa} \quad (7)$$

На основе вышеприведенных соотношений были найдены параметры уплотнения и упрочнения по данным компрессионных испытаний образцов керна, отобранных из исследуемых месторождений. Результаты определения данных характеристик приведены в табл. 3. Полученные значения коэффициентов  $\lambda$ ,  $\kappa$  и  $\chi$  описывают упругие и пластические деформации породы-коллектора под воздействием нагрузки и могут быть использованы в дальнейшем для задач геомеханического моделирования при разработке рассматриваемых месторождений, например, с использованием шатровой модели уплотнения коллектора.

Таблица 3

Основные характеристики испытанных образцов керна

№ п/п	№ Образца	Месторождение	Продуктивный объект	№ скв	Глубина отбора, м	Пористость, %	$\lambda$	$\kappa$	$\chi$
1	118	Харьягинское	P2-III	100P	1699,0	22,1	0,0127	0,00782	153,4
2	17	Возейское	P1a	2Оц	1602,3	6,9	0,0040	0,00160	384,6
3	В-1	Возейское	С3	2Оц	1642,9	15,3	0,0053	0,00134	207,6
4	В-2	Возейское	Ф1	2006	2159,7	6,3	0,0025	0,00087	566,4
5	О-1	Осваньюрское	С1s	О-1	1963,0	15,2	0,0053	0,00119	201,6
6	Х-1	Харьягинское	T2-I	100P	1411,7	25,1	0,0186	0,00705	60,2
7	Х-3	Харьягинское	D2st	1068	3719,3	14,5	0,0035	0,00211	622,9
8	Х-4	Харьягинское	D2af	1068	3787,0	13,3	0,0040	0,00080	266,0
9	Х-5	Харьягинское	P2-II	100P	1700,9	24,9	0,0193	0,00655	57,2
Ср. знач.						<b>16,0</b>	<b>0,0083</b>	<b>0,00326</b>	<b>279,9</b>

После определения величин упругого и пластического уплотнения строились зависимости данных параметров от различных характеристик продуктивных объектов. Наилучшее корреляционное отношение было получено для зависимостей  $\lambda$ ,  $\kappa$  и  $\chi$  от пористости (рис. 3). Все три функции, описывающие данные зависимости, имеют экспоненциальный характер:

$$\lambda = 0,001e^{0,101K_p}, \quad (8)$$

$$\kappa = 0,0004e^{0,11K_p}, \quad (9)$$

$$\chi = 1196e^{-0,11K_p}. \quad (10)$$

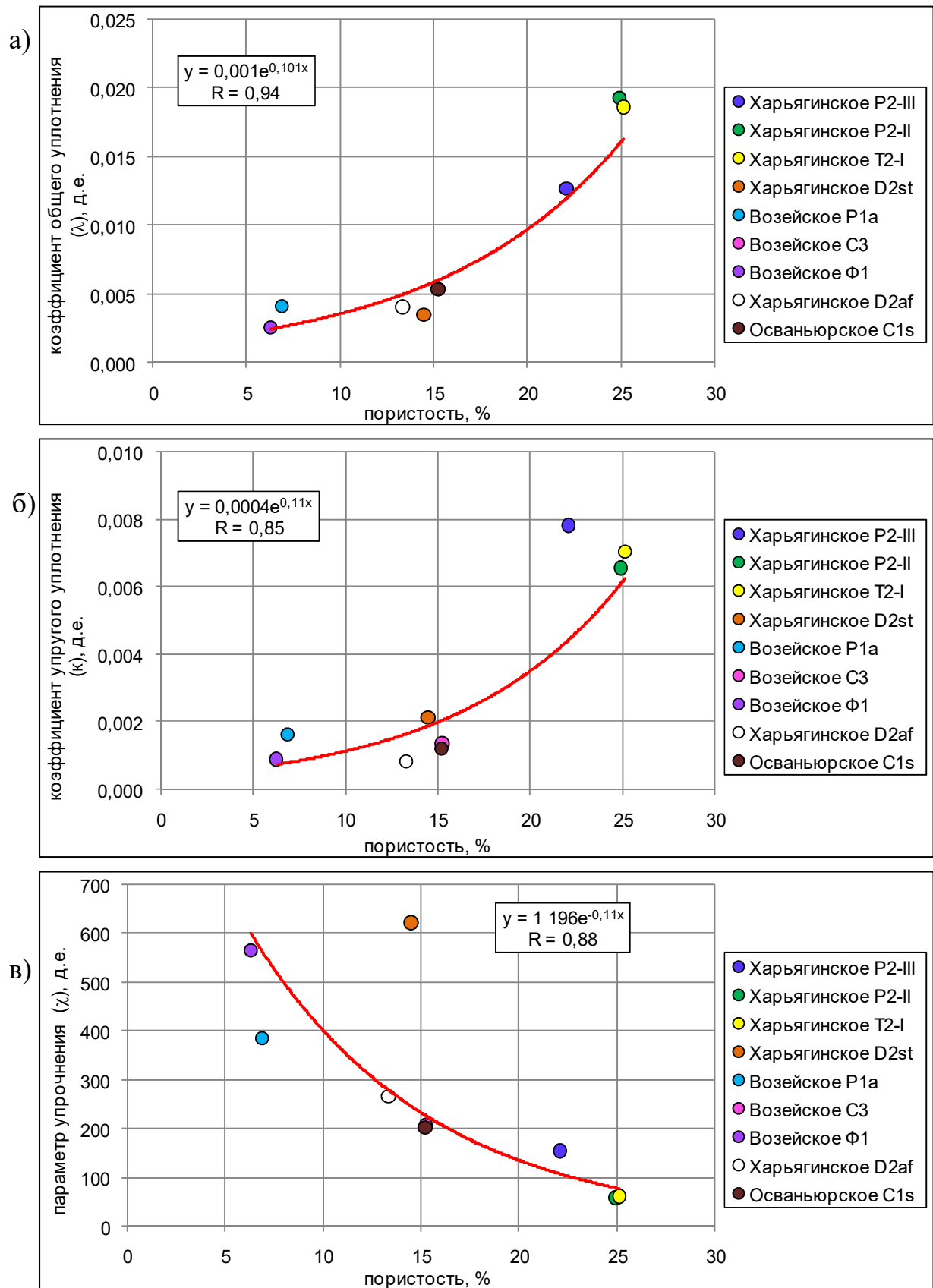


Рис. 3. Изменение параметров общего (а) и упругого (б) уплотнения и упрочнения (в) образцов керн в зависимости от пористости

В формулах (8)–(10)  $K_p$  – пористость образцов керна. Полученные закономерности изменения величин упругого и пластического уплотнения от пористости имеют вполне естественную закономерность: при увеличении пористости данные характеристики увеличиваются, что говорит о том, что с ростом пористости порода-коллектор становится более деформируемой, причем, как в области упругих, так и в области пластических деформаций.

С целью определения предела прочности при сжатии и деформационных характеристик пород (модуль упругости, коэффициент Пуассона, модуль деформаций, коэффициент деформаций) были подготовлены призматические образцы с размерами 20x20x40 мм, а также цилиндрические образцы с диаметром 30 мм и высотой 30 мм.

Предел прочности при одноосном растяжении определялся по ГОСТ 21153.3-85, п. 2 и п. 4 [9]. Образец равномерно нагружали до разрушения со скоростью 3 МПа/с. Предел прочности при одноосном растяжении ( $\sigma_p$ ) в МПа для каждого образца выборки вычисляли по формуле:

$$\sigma_p = 10 \frac{P}{S}, \quad (11)$$

где  $P$  – разрушающая сила, кН;  $S$  – площадь разрыва образца, равная произведению его диаметра на длину, см<sup>2</sup>.

Всего предел прочности на растяжение был определен на 9 образцах. Результаты лабораторных исследований приведены в табл. 4. Анализируя результаты исследований, следует отметить, что величина предела прочности пород на растяжение характерна для данного типа пород и варьируется в широком диапазоне, в связи с тем, что исследования проводились на образцах керна, отобранных из терригенного и карбонатного коллектора, а также с различной глубины залегания продуктивной толщи. Данный параметр изменяется в интервале от 0,39 МПа до 9,77 МПа и, в среднем, составляет 3,62 МПа. Предел прочности при одноосном сжатии определялся согласно ГОСТ 21153.2-84, п. 1 [10]. Образец размещали между стальными плитами, совмещая ось образца с центром нижней опорной плиты испытательной машины, нагружали равномерно до разрушения со скоростью 3 МПа/с. Записывали максимальную величину разрушающей образец силы  $P$ , зафиксированную силоизмерителем испытательной машины, в килоньютонах. Значение предела прочности при одноосном сжатии ( $\sigma_{сж}$ ) в МПа для каждого образца выборки вычисляли по формуле:



$$\sigma_{сж} = 10K_B \frac{P}{S}, \quad (12)$$

где  $P$  – разрушающая сила, кН;  $S$  – площадь поперечного сечения образца, см<sup>2</sup>;  $K_B$  – безразмерный коэффициент высоты образца, устанавливается по таблице 2а ГОСТ 21153.2-84.

Таблица 4

**Результаты определения предела прочности образцов при растяжении  
(согласно ГОСТ 21153.3-85, п. 2, п. 4)**

№ обр.	Длина раскола, см	Диаметр (высота), см	S, см <sup>2</sup>	Разруш. сила, кН	$\sigma_p$ , МПа
<b>X-100p-1</b>	1,96	1,96	3,84	0,15	<b>0,39</b>
<b>X-100p-2</b>	2,95	2,92	8,61	0,66	<b>0,77</b>
<b>X-100p-3</b>	1,98	1,98	3,92	0,40	<b>1,02</b>
<b>X-1118-4</b>	2,96	2,92	8,64	2,98	<b>3,45</b>
<b>B-20ц-5</b>	1,98	1,95	3,86	1,02	<b>2,64</b>
<b>B-20ц-6</b>	1,6	1,98	3,17	0,93	<b>2,93</b>
<b>B-2006-7</b>	1,98	1,98	3,92	2,24	<b>5,71</b>
<b>X-1068-8</b>	2,96	2,89	8,55	8,35	<b>9,77</b>
<b>O-3-9</b>	2,96	2,89	8,55	5,09	<b>5,95</b>
<b>Ср. знач.</b>					<b>3,62</b>

Деформационные характеристики при одноосном сжатии определялись по ГОСТ 28985-91 [11]. Данные параметры исследовались в диапазоне требуемых напряжений, при этом диапазон напряжений от 5 до 50% от предела прочности при одноосном сжатии являлся обязательным. Образцы нагружали до начального напряжения  $\sigma_0 = 0,05\sigma_{сж}$ , которое принималось за условный ноль. Деформацию образца регистрировали на 10 ступенях напряжения сжатия в процессе нагружения до 50–70% от предела прочности при одноосном сжатии и при последующей разгрузке до  $\sigma_0$  также на 10 ступенях. Далее производили повторное нагружение образца ступенями до полного его разрушения с регистрацией предела прочности при одноосном сжатии. Отсчеты фиксировались дискретно с интервалом времени между отсчетами не более 10 с. По результатам испытаний были определены следующие деформационные характеристики:

- зависимость «напряжение-деформация»;
- модуль деформации  $E_d$ ;
- коэффициент поперечных деформаций  $\nu$ ;
- модуль упругости (модуль Юнга)  $E_y$ ;
- коэффициент Пуассона  $\mu$ .

Значения характеристик вычислялось по формулам:

$$E_D = \frac{(\sigma_K - \sigma_H)}{(\varepsilon_{1K} - \varepsilon_{1H})}, \quad (13)$$

$$\nu = \frac{(\varepsilon_{2K} - \varepsilon_{2H})}{(\varepsilon_{1K} - \varepsilon_{1H})}, \quad (14)$$

$$E_Y = \frac{(\sigma_K - \sigma_H)}{(\varepsilon'_{1K} - \varepsilon'_{1H})}, \quad (15)$$

$$\mu = \frac{(\varepsilon'_{2K} - \varepsilon'_{2H})}{(\varepsilon'_{1K} - \varepsilon'_{1H})}, \quad (16)$$

где  $\sigma_K, \sigma_H$  – напряжения в конце и в начале заданного диапазона при нагружении или разгрузке, МПа;  $\varepsilon_{1K}, \varepsilon_{1H}$  – относительные продольные деформации образца в конце и в начале заданного диапазона при нагружении;  $\varepsilon_{2K}, \varepsilon_{2H}$  – относительные поперечные деформации образца в конце и в начале заданного диапазона при нагружении;  $\varepsilon'_{1K}, \varepsilon'_{1H}$  – относительные продольные деформации образца в конце и в начале заданного диапазона при разгрузке;  $\varepsilon'_{2K}, \varepsilon'_{2H}$  – относительные поперечные деформации образца в конце и в начале заданного диапазона при разгрузке.

Прежде, чем определить деформационные характеристики образцов, предварительно был найден предел прочности при сжатии у соответствующих попарных образцов. Так как образцы после таких исследований разрушались, то деформационные характеристики определялись на основе оставшихся попарных образцов. Результаты определения пределов прочности образцов на сжатие приведены в табл. 5. Среднее значение предела прочности образцов при сжатии составило 25,58 МПа, интервал изменения – от 9,47 МПа до 49,39 МПа.

После проведения предварительных испытаний на оставшихся попарных образцах определялись деформационные характеристики пород. Образцы нагружались до значения 50–70% от предела прочности попарного образца на сжатие. Затем образцы разгружались до напряжений, близких к нулю, и опять повторно нагружались до полного разрушения, тем самым повторно определялся параметр предела прочности при сжатии, т.е. данная характеристика находилась 2 раза. На основе этих значений рассчитывалась его средняя величина. Основным результатом проведенных исследований являлись диаграммы напряжения-деформации, при этом, согласно ГОСТ 28985-91 при этом определялись как

**Результаты определения предела прочности образцов при одноосном сжатии  
(согласно ГОСТ 21153.2-84, п. 1)**

№ обр.	Стороны основания, см	Высота, см	S, см <sup>2</sup>	Разр. сила, кН	$\sigma_{сж}$ без Кв	m=h/d	K <sub>в</sub>	$\sigma_{сж с}$ К <sub>в</sub> , МПа
<b>X-100p-1</b>	1,97*1,97	3,96	3,88	3,61	9,30	2,01	1,018	<b>9,47</b>
<b>X-100p-2</b>	1,98*1,91	3,96	3,78	7,08	18,73	2,04	1,024	<b>19,18</b>
<b>X-100p-3</b>	1,98*1,98	3,98	3,92	7,52	19,18	2,01	1,018	<b>19,53</b>
<b>X-1118-4</b>	1,97*1,98	3,97	3,90	12,16	31,18	2,01	1,018	<b>31,74</b>
<b>B-20ц-5</b>	1,98*1,98	3,97	3,92	4,64	11,84	2,01	1,018	<b>12,05</b>
<b>B-20ц-6</b>	1,98*1,99	3,98	3,94	6,27	15,91	2,00	1,000	<b>15,91</b>
<b>B-2006-7</b>	1,98*1,99	3,98	3,94	19,46	49,39	2,00	1,000	<b>49,39</b>
<b>X-1068-8</b>	1,98*1,99	3,98	3,94	16,53	41,95	2,00	1,000	<b>41,95</b>
<b>O-3-9</b>	1,98*1,99	3,97	3,94	12,23	31,04	2,00	1,000	<b>31,04</b>
<b>Ср. знач.</b>								<b>25,58</b>

продольные, так и поперечные деформации. На основе полученных диаграмм вычислялись деформационные характеристики образцов: модуль упругости, модуль деформаций, коэффициент Пуассона, коэффициент поперечных деформаций, согласно соотношениям (13)–(16). Все результаты исследований деформационных и прочностных свойств пород сведены в табл. 6.

На основе полученных значений предела прочности пород при растяжении были построены графики зависимости данного параметра от глубины залегания продуктивного объекта (рис. 4, а). Как видно из рисунка наблюдается некоторая корреляционная связь между рассматриваемыми параметрами. Следует отметить, что существенный разброс вносит величина пористости образцов коллектора, так как известно, что упругие и прочностные свойства пород напрямую зависят от этого параметра пористости [12]. Однозначно можно сказать, что с увеличением глубины предел прочности породы при растяжении увеличивается. Наибольшая величина предела прочности при растяжении получена для образцов, отобранных из девонских отложений, наименьшая – для триасовых, пермских и верхнего отдела каменноугольных отложений.

На рис. 4, б представлена зависимость среднего значения предела прочности при сжатии от глубины. Из рисунка видно, что как и для предела прочности при растяжении, наибольшим пределом прочности при сжатии характеризуются образцы среднедевонских отложений, наименьшим – пласты триаса, перми и верхнего отдела каменноугольных отложений.

Таблица 6

## Обобщенные результаты исследований деформационных и прочностных характеристик исследуемых образцов керн

№ обр.	Продуктивный объект	$\sigma_p$ , МПа	$\sigma_{сж}$ (1-е опред-е), МПа	$\sigma_{сж}$ (2-е опред-е), МПа	$\sigma_{сж}$ (ср. зн.), МПа	$E_d$ , ГПа	$E_y$ , ГПа	$\mu$ , д.е.	$\nu$ , д.е.	$C$ , МПа	$\phi$ , град
<b>X-100p-1</b>	P2-III	0,39	9,47	-	9,47	-	-	-	-	0,96	41,9
<b>X-100p-2</b>	P2-II	0,77	19,18	15,25	17,215	2,9	4,9	0,347	0,237	1,92	42,2
<b>X-100p-3</b>	T1-I	1,02	19,53	20,15	19,84	3,7	8,5	0,428	0,312	2,23	39,5
<b>X-1118-4</b>	D2st	3,45	31,74	83,96	57,85	9,8	19,3	0,128	0,220	5,23	31,5
<b>B-20ц-5</b>	P1a	2,64	12,05	20,9	16,475	6,9	12,4	0,195	0,264	2,82	23,9
<b>B-20ц-6</b>	C3	2,93	15,91	20,81	18,36	6,7	13,4	0,304	0,261	3,41	25,7
<b>B-2006-7</b>	Ф1	5,71	49,39	57	53,195	10,5	24,1	0,326	0,300	8,40	30,9
<b>X-1068-8</b>	D2af	9,77	41,95	89,79	65,87	8,6	16,4	0,105	0,100	10,12	23,2
<b>O-3-9</b>	C1s	5,95	31,04	54,16	42,6	4,2	16,9	0,124	0,056	6,79	25,3
<b>Ср. знач.</b>		<b>3,62</b>	<b>25,58</b>	<b>45,25</b>	<b>33,43</b>	<b>6,7</b>	<b>14,5</b>	<b>0,245</b>	<b>0,219</b>	<b>4,65</b>	<b>31,6</b>

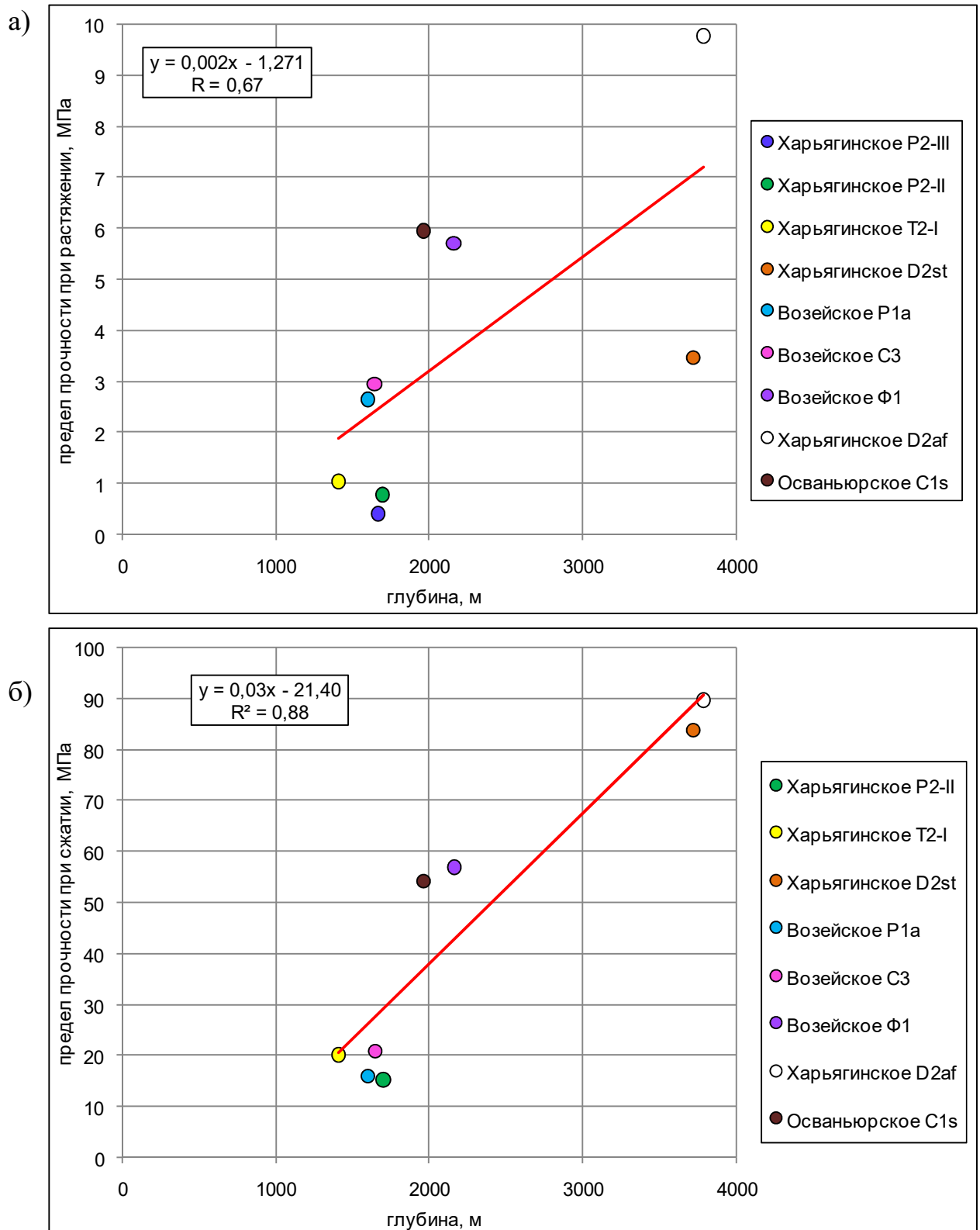


Рис. 4. Изменение предела прочности при растяжении (а) и среднего предела прочности при сжатии (б) образцов керна в зависимости от глубины залегания продуктивного объекта

Рис. 5 характеризует зависимости модуля упругости, определенного на основе испытаний образцов керна, от глубины и среднего предела прочности при сжатии. Как видно из рисунка, зависимость данного параметра от глубины весьма слабая, что связано с тем, что модуль упругости существенно зависит от пористости. В то же время наблюдается довольно хорошая корреляция данного параметра от предела прочности при сжатии.

В связи с этим можно поступить следующим образом: так как зависимость предела прочности от глубины имеет довольно хороший коэффициент корреляции, то через связь «модуль упругости»–«предел прочности при сжатии»–«глубина», можно определить функцию связи «модуль упругости»–«глубина». На основе простых вычислений можно показать, что полученная таким образом зависимость будет иметь вид:

$$E = 0,046H + 3,77 . \quad (17)$$

По результатам определения прочностных характеристик пород (предел прочности при растяжении и при сжатии) появляется возможность построения паспортов прочности для исследуемых продуктивных объектов, а также определения и двух других параметров, характеризующих прочность породы, но более удобных для численного моделирования, – угла внутреннего трения и коэффициента сцепления.

На рис. 6 представлены результаты построения паспортов прочности по некоторым из испытанных образцов керна. Параметры: угол внутреннего трения и коэффициент сцепления приведены в табл. 4 с итоговыми результатами испытаний. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем при моделировании оседаний земной поверхности при разработке рассматриваемых месторождений.

Подводя итог выполненной работы, можно сделать следующие основные выводы:

1. В рамках работы выполнены компрессионные испытания образцов керна, отобранных из продуктивных объектов нефтяных месторождений Республики Коми. Эксперименты показали, что при снижении пластового давления может происходить весьма существенное снижение пористости породы-коллектора – от 5 до 17% в относительной величине, что говорит о высокой степени деформируемости некоторых продуктивных пластов.

2. На основе обработки результатов испытаний образцов керна были получены значения параметров упругого и пластического уплотнения, а также параметра упрочнения исследуемых продуктивных объектов. Значения коэффициентов  $\lambda$ ,  $\kappa$  и  $\chi$

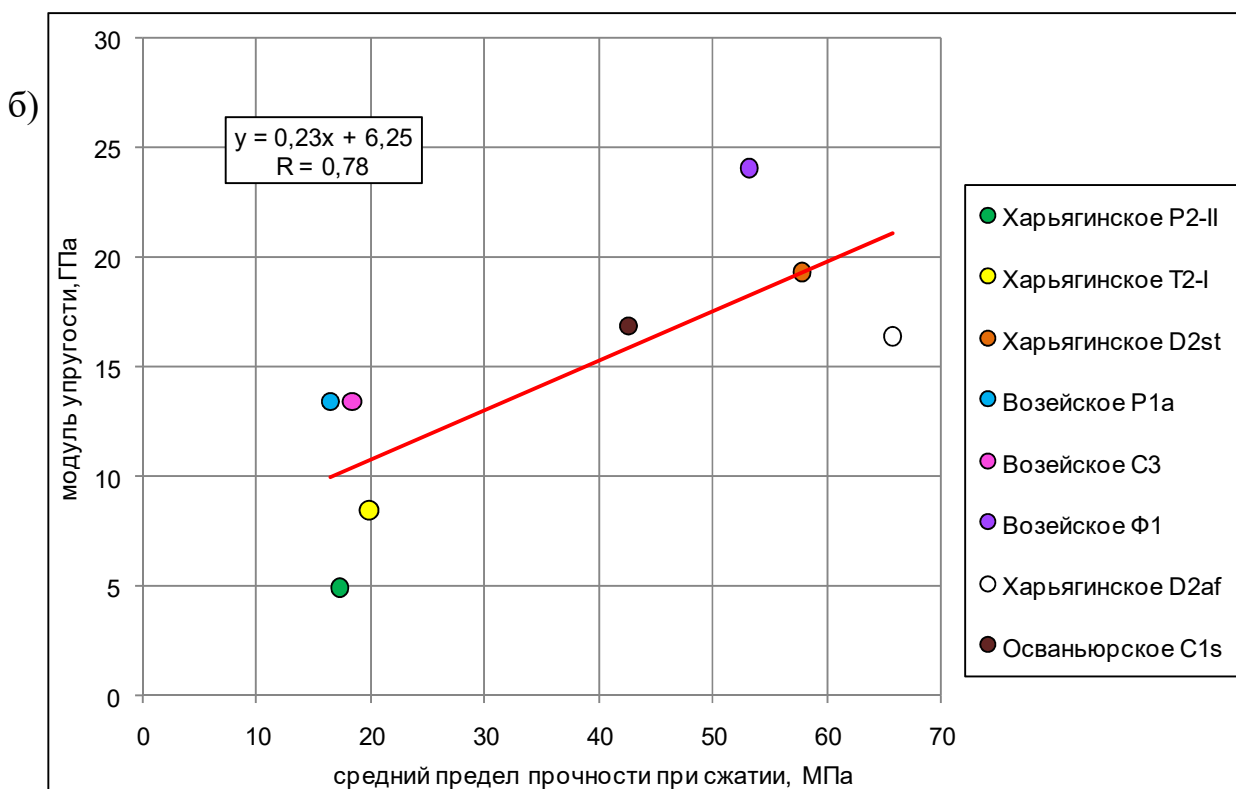
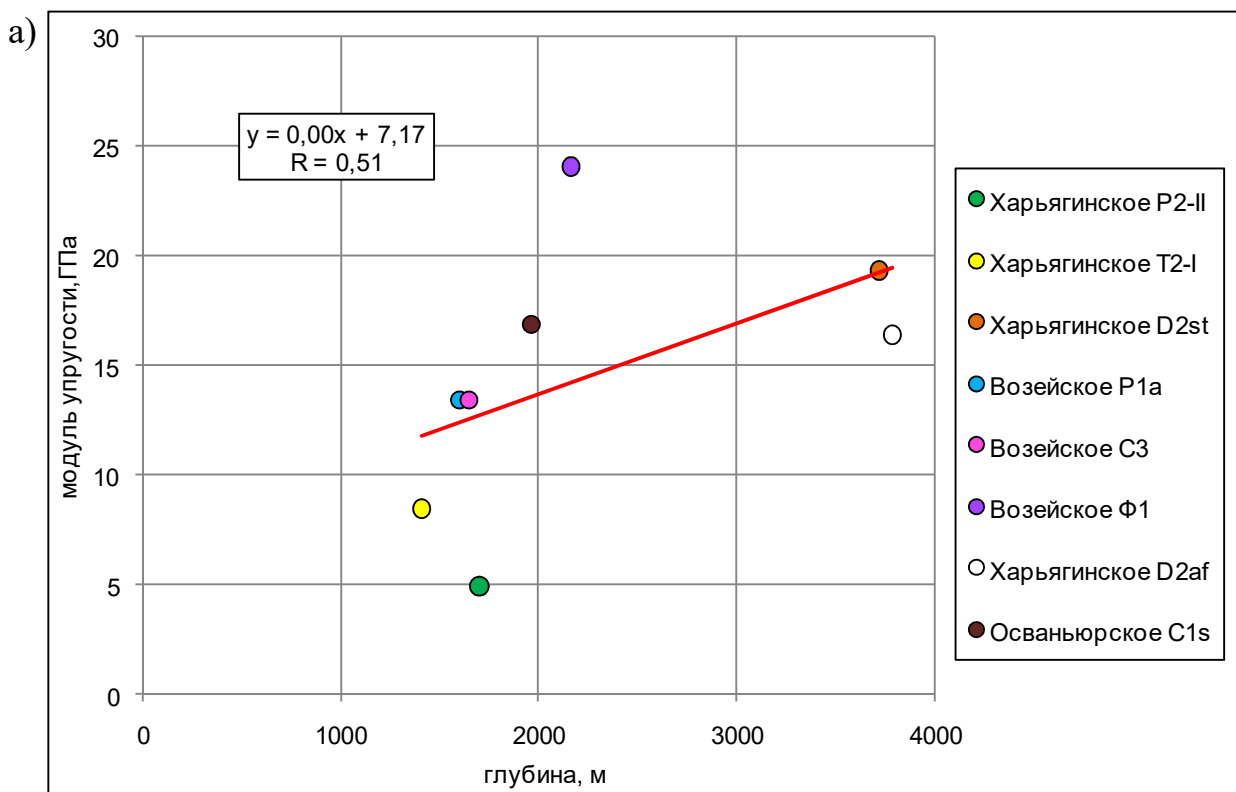


Рис. 5. Изменение модуля упругости образцов керна в зависимости от глубины залегания продуктивного объекта (а) и среднего предела прочности при сжатии (б)

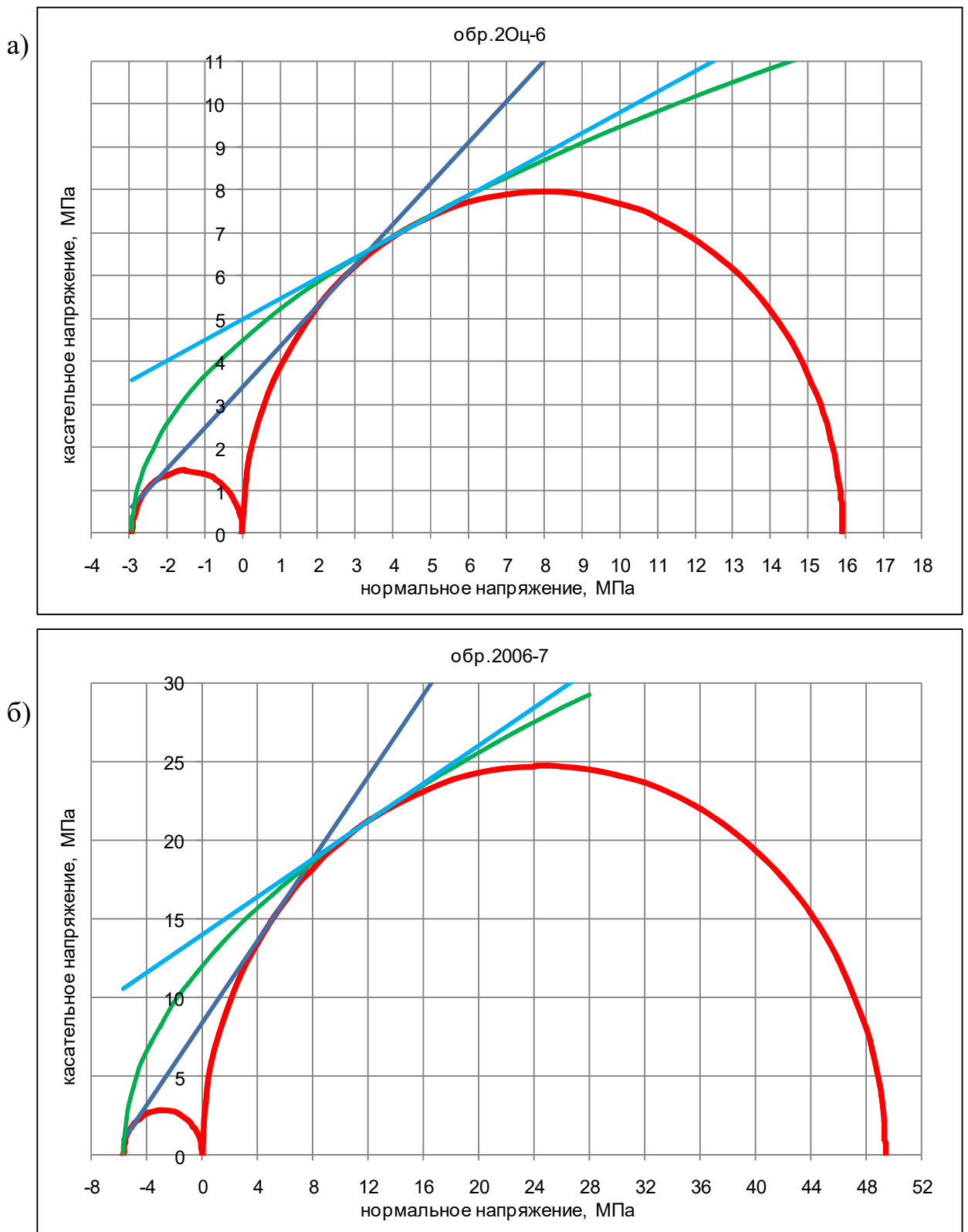


Рис. 6. Результаты построения паспортов прочности пород для обр. 20ц-6 (а) и обр. 2006-7 (б) при использовании различных критериев разрушения



описывают упругие и пластические деформации породы-коллектора под воздействием нагрузки и могут быть использованы в дальнейшем для задач геомеханического моделирования разработки рассматриваемых месторождений, например, с использованием шатровой модели уплотнения коллектора.

3. Авторами были построены зависимости параметров упругого и пластического уплотнения, а также параметра упрочнения от пористости, которые характеризуются высоким коэффициентом корреляции, – от 0,85 до 0,94.

4. В рамках работы выполнены исследования деформационных и прочностных свойств образцов керна, отобранных из продуктивных объектов нефтяных месторождений Республики Коми. На основе обработки результатов испытаний образцов керна были получены зависимости пределов прочности при растяжении и при сжатии, а также модуля упругости от глубины залегания продуктивных объектов.

5. С использованием значений характеристик предела прочности при растяжении и при сжатии построены паспорта прочности исследованных пород-коллекторов.

6. На основе полученных зависимостей появляется возможность прогнозирования деформаций основных продуктивных объектов региона расположения месторождений в процессе снижения пластового давления, в том числе, и изменения пористости, при известном начальном значении данного параметра.

*Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Фундаментальные проблемы геологии, геохимии и гидрогеологии нефтегазоносных осадочных бассейнов. Обоснование значимых факторов эффективного прогноза крупных скоплений УВ в неструктурных условиях», № АААА-А16-116022510269-5).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Fjear E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M., Risnes R. Petroleum related rock mechanics. Elsevier. Amsterdam, 2008. 492 p.
2. Charlez Ph. Rock Mechanics. Vol. 2: Petroleum applications. Paris, 1997. 661 p.
3. Попов С.Н., Мазанов С.В., Жариков М.Г. Разработка геомеханической модели для прогноза изменения фильтрационно-емкостных свойств коллекторов трещинно-порового типа в процессе снижения пластового давления (на примере ачимовских отложений месторождений нефти и газа Крайнего севера) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2015. № 6. С. 47–55.

4. *Гладышев С.В., Попов С.Н., Шустов Д.В., Вальков В.В., Согорин А.А., Терентьев В.Б.* Прогноз напряженно-деформированного состояния горного массива методом конечных элементов при разработке Шершневого месторождения нефти на основе трехмерной геологической модели // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2008. № 8. С. 55–58.

5. *Попов С.Н., Кошелев А.В., Жариков М.Г.* Определение поля напряжений в ачимовских отложениях Уренгойского НГКМ на основе анализа и обработки результатов проведения ГРП // Газовая промышленность. 2013. Спец. вып. № 3/696. С. 82–86.

6. *Попов С.Н.* Определение условий нагружения для лабораторных испытаний цилиндрических образцов керна на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2013. № 5. С. 40–44.

7. *Фадеев А.Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. М: Недра, 1987. 221 с.

8. *Pande, G.N., Sharma K.G.* Multi-laminate model of clays: a numerical evaluation of the influence of rotation of the principal stress axes. // Int. J. Num. & Anal. Meth. in Geomech. 1983. Vol. 7. 397 p.

9. ГОСТ 21153.3-85. «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. Метод разрушения цилиндрических образцов сжатием по образующим».

10. ГОСТ 21153.2-84. «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. Метод одноосного сжатия образцов правильной формы плоскими плитами».

11. ГОСТ 28985-91. «Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии».

12. *Попов С.Н., Зарипов Р.Ш., Паршуков А.В.* Изменение физико-механических свойств пород ачимовских отложений Уренгойской группы месторождений // Газовая промышленность. 2013. Спец. вып. № 8/694. С. 45–47.