

нитрильных эластомеров [5, 6] в количестве 0,1+1,0 массовых частей повышает весь комплекс технических свойств резин.

#### Литература

1. Бухина М. Ф. Техническая физика эластомеров. М.: Химия, 1984.
2. Зуев Ю. С., Дегтева Т. Г. Свойства эластомеров в эксплуатационных условиях. М.: Химия, 1986.
3. Федюкин Д. Л., Махлис Ф. А. Технические и технологические свойства резин. М.: Химия, 1985.
4. Зуев Ю. С. Разрушение эластомеров в условиях, характерных для эксплуатации. М.: Химия, 1980.
5. О морозостойкости резино-технических деталей промышленного оборудования: сб. научных трудов СевКавНИПИгаза / С. А. Акопов, Г. П. Шелудько, Р. В. Карапетов, А. С. Акопов. Ставрополь, 2002. Вып. 37.
6. Шелудько Г. П. Исследование влияния активных добавок на тепло-износостойкость эластомеров различной структуры: дис. ... канд. техн. наук. Днепропетровский химико-технологический институт им. Дзержинского, 1977.

УДК 622.244:532.54

**Афонин Леонид Алексеевич, Коршунова Любовь Григорьевна,  
Кругалевич Александр Александрович, Турская Ольга Юрьевна,  
Хандзель Александр Владиславович**

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*В статье рассматривается основанное на применении компьютерной модели решение задачи выбора конструкции горизонтальной скважины (ГС) без фонтанных труб, обеспечивающей оптимальный режим эксплуатации с учетом изменения давления в стволе ГС, наличия искривленного и наклонного участков. В результате рассчитывается диаграмма режимов  $P_y(Q)$  при допустимых забойных давлениях, длинах, диаметрах горизонтального ствола, обеспечивающих вынос твердых частиц из скважины.*

*Ключевые слова: горизонтальная скважина, производительность, забойное давление, режим эксплуатации, конструкция*

**Afonin Leonid A., Korshunova Lyubov G., Krutalevich Aleksandr A.,  
Turskaya Olga Y., Handzel Aleksandr V.**

### SELECTING OPTIMAL DESIGN OF A HORIZONTAL WELL BY NUMERICAL MODELING

*Computer aided design of a horizontal well without flush tubes providing optimal operating conditions with regard to varying pressure along horizontal well length, to the presence of deviated and slant segments is considered. As a result a well-head pressure – flow rate plot is computed. Allowable values of bottom-hole pressure, of horizontal segment lengths and diameters that ensure transport of solid particles are taken into account when building well-head pressure – flow rate plot.*

*Key words: horizontal well, flow rate, bottom-hole pressure, operating conditions, design*

**Математическая модель.** Общая схема конструкции скважины представлена на рис. 1.

Математическая модель притока газа и движения в стволе ГС описывается системой дифференциальных уравнений согласно работе [1]:

$$\frac{dQ}{dl} = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4b(P_k^2 - P)}}{2b}; \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dl} = \left( \lambda \frac{Q}{D} + 2 \frac{dQ}{dl} \right) \cdot \frac{\alpha Q P}{2\alpha Q^2 - P^2}, \quad (2)$$

где

$$\alpha = \frac{8\rho_{cm} P_{am} ZT}{\pi^2 D^4 T_{cm}};$$

$$a = \frac{a^*}{2} \left[ \frac{2}{\nu h_1} \left( \nu h_1 + R_c \ln \frac{R_c}{R_c + \nu h_1} \right) + \frac{R_k - \nu h_1}{R_c + \nu h_1} \right];$$

$$b = \frac{b^*}{8} \left[ \frac{2}{\nu h_1} \left( \ln \frac{R_c + \nu h_1}{R_c} - \frac{\nu h_1}{R_c + \nu h_1} \right) + \frac{R_1 - \nu h_1}{(R_c + \nu h_1)^2} \right];$$

$$h_1 = \frac{h}{2} - R_c;$$

где  $R_c$  – радиус скважины;  $\nu$  – коэффициент анизотропии.

$$\nu = \sqrt{\frac{k_{верт.}}{k_{гориз.}}};$$

$$a^* = \mu Z P_{ам} T_{nl} / k T_{cm};$$

$$b^* = \rho_{cm} P_{ам} Z T_{nl} / l_{ин} T_{cm};$$

$l_{ин}$  – коэффициент макрошероховатости пласта;  $k$  – проницаемость;  $\mu$  – вязкость газа;  $T_{nl}$  – температура пласта.

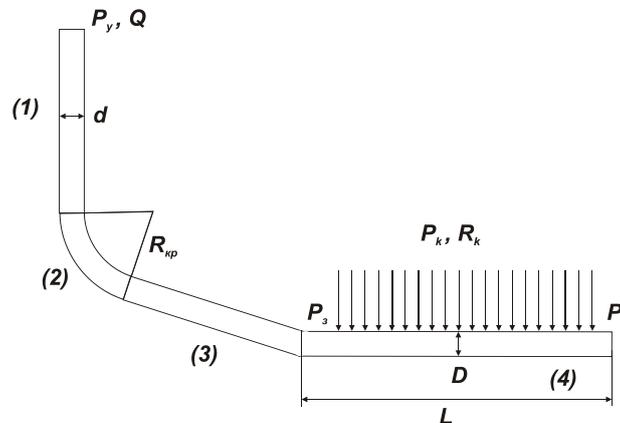


Рис. 1. Схема ствола скважины: 1, 2, 3, 4 – вертикальный, искривленный, наклонный, горизонтальный участки;  $P_y, Q$  – режимные параметры: давление на устье и дебит скважины;  $P_з, P_m, P_к$  – давление в начале ГС, в торцевом сечении и на контуре питания;  $R_{кр}, R_к$  – радиусы кривизны участка (2) и радиус контура питания;  $L, D$  – длина и диаметр ГС

Система (1, 2) замыкается условиями на торцевой границе скважины:

при  $l = L, Q = 0, P = P_m;$  (3)

Для расчета производительности ГС авторами составлена компьютерная модель, на выходе которой рассчитываются значения  $Q, P_з$  [2].

Для получения режимных параметров далее рассчитываются потери давления на участках 3, 2, 1, согласно [3].

$$P_y = \sqrt{(P_з^2 - \theta_n \cdot Q^2) / e^{2S_n}},$$
 (4)

где

$$S_n = 0,03415 \cdot \bar{\rho}_{cm} \cdot H / Z_{cp} \cdot T_{cp};$$

$H = H_1 + H_2 + H_3$  – общая глубина скважины;

$T_{cp}, Z_{cp}$  – средняя температура и коэффициент сверхсжимаемости газа;

$$\theta_n = 1,377 \cdot \lambda \cdot Z_{cp}^2 T_{cp}^2 (e^{2S_L} - 1) / d^5;$$

$$S_L = 0,03415 \bar{\rho}_{cm} \cdot L / Z_{cp} T_{cp};$$

$\bar{\rho}_{cm}$  – относительная плотность газа в стандартных условиях;  $L = L_1 + L_2 + L_3$  – общая длина участков 1 – 3;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления труб;  $d$  – диаметр НКТ.

#### Компьютерная модель

**Исходные данные.** Для решения системы дифференциальных уравнений (1, 2) используются следующие данные ГС:  $L$  – длина ГС, м;  $P_m$  – давление в торце ГС, МПа;  $h$  – толщина пласта, м;  $k_{гор}$  – проницаемость горизонтальная, мкм<sup>2</sup>;  $k_{верт}$  – проницаемость вертикальная, мкм<sup>2</sup>;  $\mu$  – вязкость, Па·с;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления ГС, б/р;  $\rho_{ам}$  – плотность газа в атмосферных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $P_{см} = 0,1$  МПа;  $T_{пл}$  – температура пласта, К;  $R_c, R_k$  – радиусы ГС и контура, м;  $Z$  – коэффициент сверхсжимаемости газа, б/р;  $d_c$  – диаметр частиц, м;  $\rho_c$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>.

Для определения  $P_y$  используются данные участков 1, 2, 3:  $H_1$  (м),  $H_2$  (м),  $H_3$  (м) – вертикальные проекции участков 1, 2, 3;  $Z_{cp}, T_{cp}$  – средние значения коэффициента сверхсжимаемости (б/р) и температуры, К,  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления труб, б/р;  $d$  – диаметр НКТ, мм;  $L_1, L_2, L_3$  – длины 1, 2, 3 участков, м.

**Реализация расчета.** Методом численного моделирования воспроизводится сложная зависимость

$$P_y \{ P_z [ Q(L, D, P_m) ] \} \quad (5)$$

при следующих ограничениях:  $\Delta P_{max}$  – предельно допустимая депрессия на пласт, обеспечивающая безводную эксплуатацию и неразрушение коллектора;  $P_{y, min}$  – минимальное допустимое давление на устье скважины, необходимое для подачи газа через систему сборных коллекторов;  $V_{II}(P)$  – скорость потока газа в ГС, необходимая для выноса твердых частиц.

Ограничения, определяющие допустимые величины параметров:

$$\left. \begin{aligned} P_k > P_m > P_z \geq P_k - \Delta P_{max} \\ P_y \geq P_{y, min}, \quad V(P) \geq V_{II}(P) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Параметры конструкций  $L, D$  задаются дискретно:

$$L = 100; 300; 500; 700; \quad D = 0,1; 0,15; 0,2,$$

также возможны варианты задания промежуточных значений.

Для заданной пары параметров  $L_i, D_i$  выполняется  $n$  шагов расчета зависимости (5) путем перебора параметра  $P_m$  с шагом  $\Delta P_m$  по формуле:

$$P_m = P_k - i \cdot \Delta P_m, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Количество шагов наращивается до тех пор, пока выполняются ограничения (6). Сначала шаг  $\Delta P_m$  выбирается произвольно, соразмерно общему падению давления на ГС. Если количество шагов, дающих допустимые значения  $P_z, P_y$  недостаточно, то выполняется кратное дробление  $\Delta P_m$ , т. е.  $\Delta P_m/2, \Delta P_m/3 \dots$

В результате для заданной пары  $L_i, D_i$  определяется не менее 3-х точек в системе координат ( $P_y, Q$ ), соответствующих допустимому режиму эксплуатации скважины. Расчеты допустимых режимов производятся для всех задаваемых конструкций. Получаемая в результате диаграмма дает область режимных параметров на дискретном множестве конструкций, что позволяет выбрать наиболее рациональный вариант. Диаграмма может быть рассчитана для любых конкретных условий проводки ГС, свойств продуктивного пласта и позволит выполнить обоснованный проект ГС с наиболее эффективной конструкцией.

**Пример расчета.** Основные параметры выполненных расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты расчётов**

L= 600, D=0,1					
$P_T, \text{МПа}$	$P_z, \text{МПа}$	$P_y, \text{МПа}$	$Q, \text{т, м}^3/\text{сут}$	$L_T, \text{м}$	$\Delta P$
9,500	9,450	8,50	430,804	528	0,05
9,300	9,200	8,26	602,726	548	0,1
9,000	8,780	7,90	859,701	564	0,22
8,700	8,320	7,50	1115,144	572	0,38
8,500	7,990	7,18	1284,324	576	0,51
L= 600, D=0,15					
9,500	9,500	8,53	420,440	437	0
9,300	9,290	8,35	583,070	484	0,01
9,000	8,980	8,07	821,013	518	0,02
8,700	8,670	7,79	1051,706	537	0,03
8,500	8,460	7,60	1201,445	546	0,04
8,300	8,250	7,41	1347,924	552	0,05

Продолжение табл. 1

L= 600, D=0,2					
9,500	9,500	8,54	418,998	311	0
9,300	9,300	8,36	580,665	393	0
9,000	9,000	8,09	816,796	455	0
8,500	8,490	7,63	1193,330	503	0,01
8,300	8,290	7,45	1337,980	515	0,01
8,000	7,990	7,18	1548,653	528	0,01
L= 900, D= 0,1					
$P_T, \text{МПа}$	$P_3, \text{МПа}$	$P_y, \text{МПа}$	$Q, \text{ т.м}^3/\text{сут}$	$L_r, \text{м}$	$\Delta P, \text{МПа}$
9,700	9,640	8,66	401,892	780	0,06
9,500	9,310	8,37	685,353	828	0,19
9,300	8,920	8,01	981,191	848	0,38
9,000	8,150	7,32	1447,996	864	0,85
L= 900, D= 0,15					
9,500	9,480	8,52	633,912	737	0,02
9,000	8,940	8,03	1243,940	818	0,06
8,700	8,600	7,72	1597,953	837	0,1
8,500	8,360	7,51	18,28,796	846	0,14
8,300	8,120	7,29	2055,419	852	0,18
L= 900, D= 0,2					
9,500	9,500	8,54	629,074	611	0
9,000	8,990	8,08	1227,392	755	0,01
8,700	8,680	7,80	1571,503	789	0,02
8,500	8,480	7,62	1794,688	803	0,02
8,300	8,270	7,43	2012,870	815	0,03

Примечание:  $P_m$  – давление в торце ГС, МПа;  $P_3$  – давление на забое, МПа;  $P_y$  – давление на устье скважины, МПа;  $Q$  – дебит скважины, тыс. м<sup>3</sup>/сут;  $L$  – длина ГС, м;  $L_r$  – рабочая длина ГС, м;  $\Delta P$  – разница давлений  $P_T - P_3$ , МПа

Представленные на рис. 2 и 3 зависимости соответствуют безопасному режиму эксплуатации ГС.

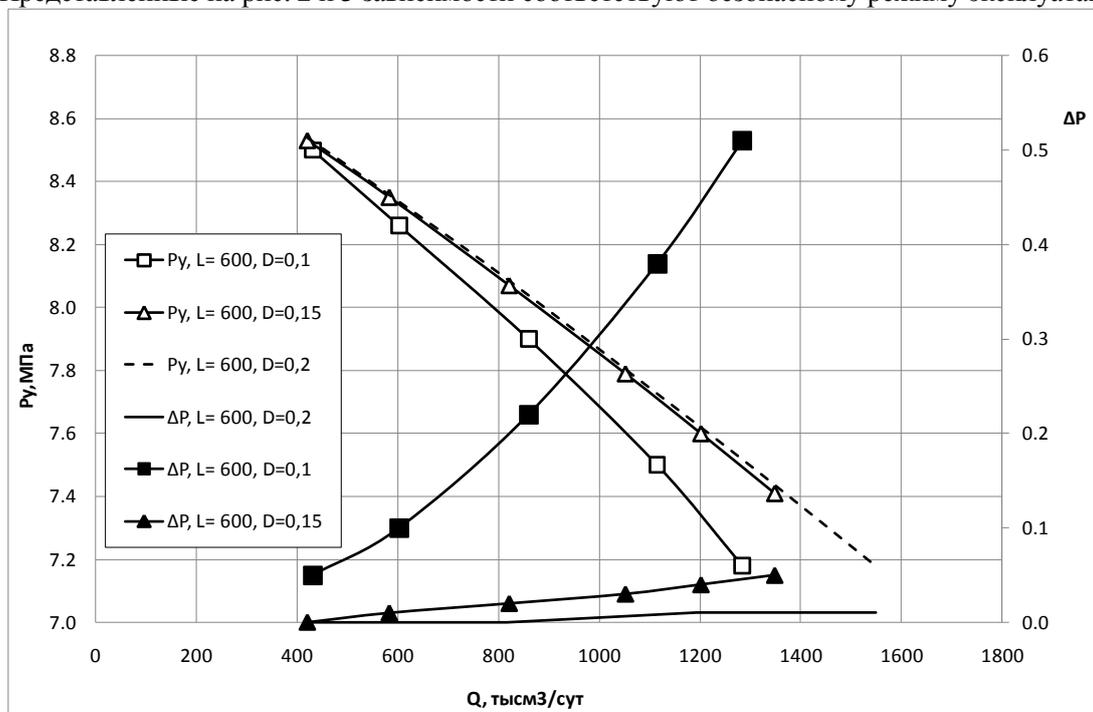


Рис. 2. График зависимости  $P_y$  от  $Q$  и потерь  $\Delta P$  на ГС для :  $L= 600$  м,  $D= 0.1$  м,  $D= 0.15$  м,  $D= 0.2$  м

Так, для предлагаемых конкретных условий, допустим желаемый режим эксплуатации:  $P_y = 8$  МПа,  $Q = 1000$  тыс.м<sup>3</sup>/сут., потери давления в ГС менее 0.1 МПа.

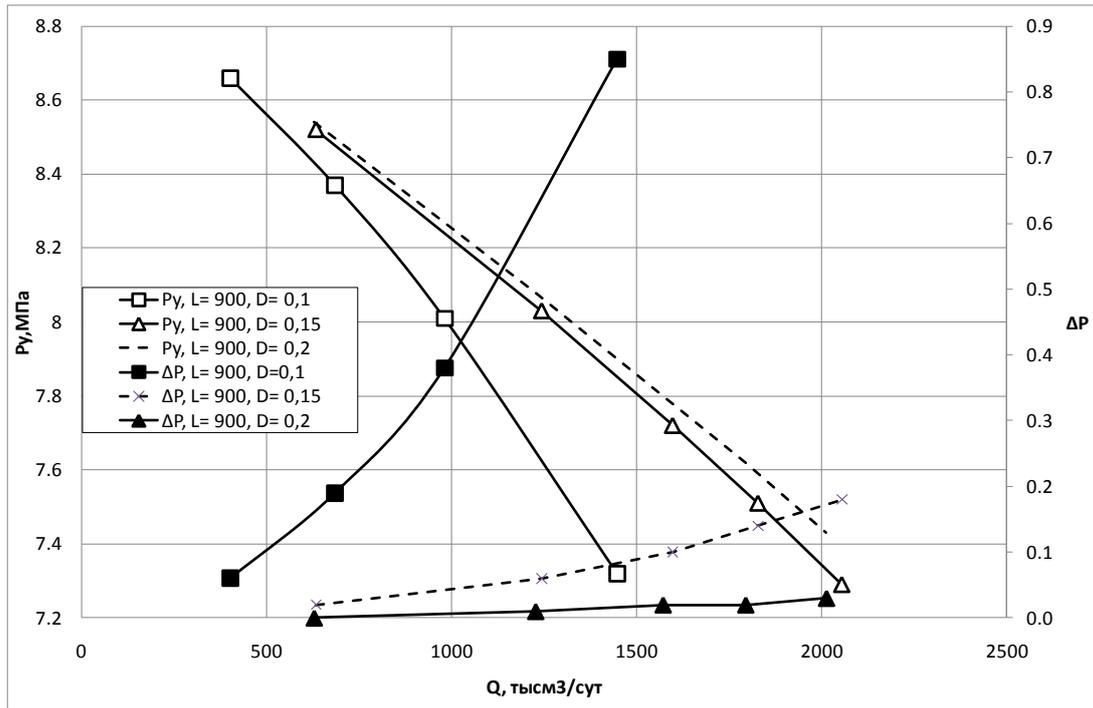


Рис. 3. График зависимости  $P_y$  от  $Q$  и потерь  $\Delta P$  на ГС для :  $L=900$  м,  $D=0.1$  м,  $D=0.15$  м,  $D=0.2$  м

Выбор конструкции выполняется с использованием рассчитанной диаграммы по следующему алгоритму:

1) считываем с графиков для  $P_y = 8$  МПа данные расчетов, содержащих дебиты в интервале  $800 \leq Q \leq 1310$ , т.е. для конструкции:  $L=600$  м и  $L=900$  м (табл. 2):

Таблица 2

L=600			L=900м:		
D= 0.1	Q=800	$\Delta P=0.2$	D= 0.1	Q=100	$\Delta P=0.38$
D= 0.15	Q=890	$\Delta P=0.02$	D= 0.15	Q=1300	$\Delta P=0.07$
D= 0.2	Q=890	$\Delta P=0.005$	D= 0.2	Q=1310	$\Delta P=0.01$

2) выбираем предпочтительный диаметр  $D=0.15$  по условию  $\Delta P < 0.1$  МПа;

3) выполняем интерполяцию длины ГС по условию  $Q=1000$  тыс.м<sup>3</sup>/сут:

$$\frac{L - 600}{1000 - 890} = \frac{600 - 900}{890 - 1300} \text{ или } L=680\text{м};$$

4) аналогично выполняем интерполяцию  $\Delta P$  для длины 680 м:

$$\frac{\Delta P - 0.02}{680 - 600} = \frac{0.02 - 0.07}{600 - 900} \text{ или } \Delta P=0.33.$$

В результате получаем следующую конструкцию, безопасную в эксплуатации:

$$L=680\text{м } D=0.015,$$

при этом выполнены условия желаемого режима:

$$P_y = 8 \text{ МПа, } Q = 1000 \text{ тыс.м}^3/\text{сут, } \Delta P < 0.1.$$

Допускается дальнейшее уточнение путем проведения расчетов с данной конструкцией и последующей интерпретацией.

Таким образом, предлагаемые в настоящей работе диаграммы наглядно представляют области безопасных режимов для искомых конструкций и позволяют выбрать оптимальную конструкцию для эксплуатации ГС при режимах, необходимых по технологическим условиям.

#### Литература

1. Алиев З. С., Шермет В. В. Определение производительности горизонтальных скважин, вскрывших газовые и газоконденсатные пласты. М.: Недра. 1995. Щелкачев В. Н. Разработка нефтесодержащих пластов при упругом режиме. М.: Гостоптехиздат, 1959, 467 с.

2. Тагиров К. М., Коршунова Л. Г., Тагиров О. О., Хандзель А. В. Проблемы эксплуатации многозабойных и горизонтальных скважин на газовых и газоконденсатных месторождениях и ПХГ // Вестник Сев-КавГТУ. 2012. № 4 (33).

3. Инструкция по комплексному исследованию газовых и газоконденсатных пластов и скважин / под ред. Г. А. Зотова, З. С. Алиева. М.: Недра, 1980. 301 с.

УДК 911.37

**Белозеров Виталий Семенович, Черкасов Александр Александрович,  
Чихичин Василий Васильевич**

## **АТЛАС РАССЕЛЕНИЯ НАРОДОВ РОССИИ: ПОДХОДЫ И ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ<sup>1</sup>**

*В статье аргументируется актуальность создания Атласа расселения народов России, определяются подходы, принципы и методы его разработки, описывается структура и содержание аналитических материалов.*

*Ключевые слова: географический атлас, картографирование этнических процессов, территориальный анализ расселения народов, геоинформационные технологии.*

**Belozyorov Vitaly S., Cherkasov Alexander A., Chikhichin Vasily V.**

**ATLAS OF SETTLING THE PEOPLES OF RUSSIA: APPROACHES AND FEATURES OF**

*The paper argues the relevance of the peoples of Russia Atlas of the settlement are defined approaches, principles and methods of design, structure, and content analysis.*

*Key words: Geographical Atlas, mapping ethnic processes, spatial analysis of resettlement of peoples, GIS technology.*

На территории Российской Федерации проживает в настоящее время более 190 народов<sup>2</sup>. Такое этническое многообразие, безусловно, является огромным достоянием нашей страны. Оно сформировано исторически, обусловлено целым рядом природных, социальных, культурных и экономических факторов, влияет на национальную безопасность и повседневную жизнь каждого гражданина России. К сожалению, размышления о многонациональном составе населения вызывают не только позитивное и вполне обоснованное чувство гордости, но и тревоги, связанные с проблемами межэтнического взаимоотношения.

На эту тему уже довольно много сказано и написано как в научных, так и в правленческих кругах. Но действенный механизм конструктивного межкультурного диалога так и не выработан. Вполне очевидно, что важнейшим элементом государственной политики в этой области должно быть научное, а значит максимально объективное, изучение этнических процессов с разных точек зрения, в том числе под пристальным взглядом географа и картографа, которые не просто словесно и визуально подскажут, где живет тот или иной народ, но и помогут решить более серьезные и практико ориентированные задачи, а именно:

- выявление закономерностей и факторов расселения по территории страны того или иного этноса;
- определение наиболее многонациональных территорий, причем не только на уровне региона, но и на уровне отдельно взятого населенного пункта, что поможет выявить очаги и предупредить возможные этнические конфликты;
- оценка влияния этнического фактора на демографические и миграционные процессы;
- изучение этнических миграций, степени приживаемости населения на той или иной территории;
- понимание, какой образ жизни преобладает у того или иного народа в зависимости от того, где преимущественно живут его представители – в городской или сельской местности;
- прогнозирование пространственного изменения центра расселения этносов, что даст возможность планирования более эффективной региональной этнической политики.

Все вышеперечисленное давно и успешно выполняется российскими географами, но чаще всего в жанрах, не всегда легко воспринимаемых аудиторией – в виде научных статей и моногра-

<sup>1</sup> Исследование проведено в рамках государственного задания «Социально-экономическая адаптация и интеграция этнических мигрантов в региональные российские сообщества». № 6.8606.2013

<sup>2</sup> По данным Всероссийской переписи населения 2010 г.