

УДК 550.834.072(470.53)

Д.В. Потехин, начальник отдела геологического моделирования, e-mail: Denis.Potekhin@pnn.lukoil.com;

И.С. Путилов, к.т.н., начальник центра сейсмических исследований филиала «ПермНИПИнефть»,

e-mail: putilov@permnipineft.com, филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми

## Количественное обоснование параметров многовариантного моделирования для повышения достоверности трехмерных геологических моделей нефтяных месторождений

Решается задача выбора оптимальных параметров для геологического моделирования на этапе создания кубов литологии. Получены более достоверные реализации геологической модели.

**Ключевые слова:** прогноз коллекторов, многовариантная модель, эффективные толщины.

Многовариантное трехмерное геологическое моделирование является технологией, позволяющей учитывать неопределенность наших знаний о месторождениях нефти. Для получения более достоверных многовариантных геологических моделей необходимо знание оптимальных параметров моделирования. Рассмотрим технологию количественного обоснования оптимальных параметров моделирования. Расчеты выполнены на примере отложений терригенного девона одного из месторождений нефти Пермского края, расположенного в пределах Бабкинской седловины. Отложения терригенного девона на месторождении вскрыты 12 скважинами. Все трехмерные вычисления выполнялись на базе программного комплекса трехмерного геологического моделирования IRAP RMS компании ROXAR.

Для оптимизации использованы параметры трехмерного геологического моделирования, задаваемые на этапе создания кубов литологии. Моделирование кубов литологии выполнено с использованием трендовой карты прогнозных эффективных толщин, полученной по данным сейсморазведки 3D [1, 2, 3]. Для моделирования кубов литологии использован метод кокрайкинга [4]. В качестве переменных параметров заданы латеральные ранги вариограмм  $R_x$  и  $R_y$ . Выбор латеральных

рангов для оптимизации обоснован их неоднозначным определением по результатам моделирования вариограмм. Интервал задаваемых рангов был выбран от 500 до 8000 м, исходя из размеров месторождения и расстояний между скважинами. При этом шаг квантования рангов – 500 м, а размер ячеек трехмерной сетки по площади – 50 x 50 м. Количество рассчитанных реализаций трехмерных моделей – 256.

Для оценки достоверности получаемых трехмерных геологических моделей было разработано три критерия, характеризующих достоверность с позиции соответствия сейсмическим прогнозам, подтверждаемости бурением и данными по добыче на месторождении.

### ПЕРВЫЙ КРИТЕРИЙ

оценивает качество каждой сгенерированной реализации трехмерной модели с использованием карт максимальных и минимальных эффективных толщин, полученных по данным прогноза сейсморазведки 3D [2]. Критерий отклонений толщин по данным 3D-сейсморазведки рассчитан по следующей формуле:

$$P_{og} = 100 \cdot (S_{min} / S + S_{max} S) / 2, \quad (1)$$

где  $S$  – общая площадь эффективных толщин модели,

$S_{min}$  – площадь эффективных толщин модели, меньше минимальных эффективных толщин по 3D-сейсморазведке,  $S_{max}$  – площадь эффективных толщин модели, больше максимальных эффективных толщин по 3D-сейсморазведке. Критерий позволяет оценить погрешность отклонения эффективных толщин каждой реализации куба литологии от прогнозируемых эффективных толщин по данным 3D-сейсморазведки. Рассчитанный критерий изменяется в диапазоне от 1 до 5%. Чем меньше  $P_{og}$ , тем более достоверна реализация модели.

### ВТОРОЙ КРИТЕРИЙ

оценки достоверности моделей рассчитан на основе кросс-валидационного отклонения эффективных толщин по следующей формуле:

$$D_{skv} = \sum (H_{ef} - H_{ef}^m) / n, \quad (2)$$

где  $D_{skv}$  – отклонение от истинного значения эффективной толщины коллектора;

$H_{ef}$  – истинное значение эффективных толщин по скважине;

$H_{ef}^m$  – модельное значение эффективных толщин, полученное после исключения данной скважины;

$n$  – количество скважин.

Для получения кросс-валидационного критерия  $D_{skv}$  для каждого из 256 соотношений рангов вариограмм  $R_x, R_y$  дополнительно рассчитаны 12 вариантов кубов литологии в соответствии с количеством скважин. В итоге для получения критерия  $D_{skv}$  дополнительно рассчитано 3072 реализации кубов литологии. Диапазон изменения рассчитанного критерия – от 0,5 до 1 м. Меньшим значениям соответствуют модели с лучшими прогнозами эффективных толщин.

### ТРЕТИЙ КРИТЕРИЙ

основан на оценке вариантов моделей с учетом извлекаемых запасов нефти в условном радиусе дренирования работающих скважин. В области дренирования запасов по скважинам, в которых ведется добыча, рассчитывается накопленная добыча нефти и сопоставляется с результатами моделирования в пределах радиуса дренажа. Скважины, по которым выполняется расчет, должны иметь исторический дебит нефти, на основе которого выполняется прогноз всей накопленной добычи нефти. На месторождении по пласту выполняются расчеты на основе разницы между начальными извлекаемыми запасами нефти в пределах радиуса дренирования и суммарной прогнозной добычи нефти.

$$Q_{dr} = |Q_n - Q_{sum}|, \quad (3)$$

где  $Q_{dr}$  – разница между начальными извлекаемыми запасами нефти и суммарной прогнозной добычей нефти;  $Q_{sum}$  – суммарная прогнозная добыча нефти по скважинам;  $Q_n$  – начальные извлекаемые запасы нефти в пределах радиуса дренажа. Диапазон изменения значений  $Q_{dr}$  – от 0 до 4%. Минимальные значения  $Q_{dr}$  соответствуют более достоверным реализациям моделей.

Для оценки основных ограничений построено соотношение между критериями процента отклонений эффективных толщин по данным 3D-сейсморазведки ( $P_{og}$ ) и отклонением эффективной толщины по скважинам ( $D_{skv}$ ) (рис. 1). Анализ соотношения критериев позволил выделить 15 различных зависимостей. Почти все выделенные зависимости являются прямыми, кроме № 9, 10 (табл.),

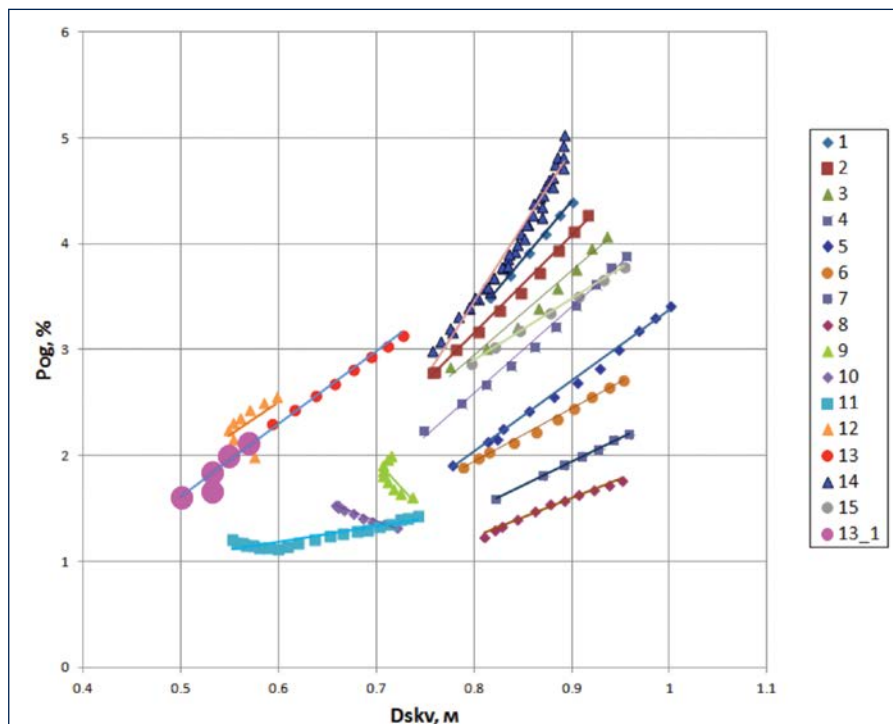


Рис. 1. Соотношение процента отклонений толщин по данным 3D-сейсморазведки ( $P_{og}$ ) от отклонения эффективной толщины по скважинам ( $D_{skv}$ ). Условные обозначения: 1–15 – реализации моделей, соответствующие выделенным зависимостям, 13\_1 – наиболее достоверные реализации модели

которые являются обратными, и им соответствуют отрицательные коэффициенты корреляции. Наиболее достоверные решения описаны зависимостью № 13. Она имеет схожий угловой коэффициент и свободный член с обобщен-

ной зависимостью № 0 (табл.). Значения, попадающие на зависимость № 13, соответствуют наиболее достоверным вариантам трехмерных моделей. Подобным образом были проанализированы и другие соотношения критериев,

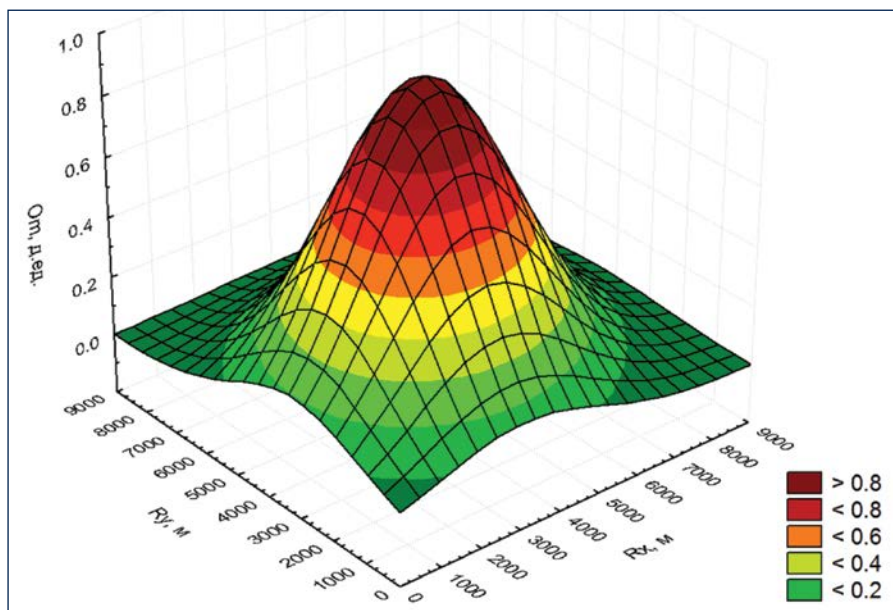


Рис. 2. Модель обобщенного критерия достоверности  $O_m$  в зависимости от рангов вариограмм  $R_x$  и  $R_y$  с нанесенными линиями равного отклика

Таблица. Зависимости, выделяемые по соотношению критериев  $P_{og}$  и  $D_{skv}$

№	Уравнения регрессии	Коэффициент корреляции, r	Уровень значимости, p
0	$P_{og} = 5,1993 D_{skv} - 1,3676$	0,57	0,00000
1	$P_{og} = 10,8555 D_{skv} - 5,3701$	0,99	0,00000
2	$P_{og} = 9,2401 D_{skv} - 4,2427$	0,99	0,00000
3	$P_{og} = 8,0034 D_{skv} - 3,4586$	0,98	0,00000
4	$P_{og} = 8,116 D_{skv} - 3,9048$	0,99	0,00000
5	$P_{og} = 6,7264 D_{skv} - 3,3442$	0,99	0,00000
6	$P_{og} = 5,0262 D_{skv} - 2,0796$	0,99	0,00000
7	$P_{og} = 4,5339 D_{skv} - 2,1381$	0,99	0,00000
8	$P_{og} = 3,6792 D_{skv} - 1,7113$	0,99	0,00000
9	$P_{og} = -9,9786 D_{skv} + 8,9404$	-0,69	0,00000
10	$P_{og} = -3,5333 D_{skv} + 3,8549$	-0,98	0,00000
11	$P_{og} = 1,4379 D_{skv} + 0,3245$	0,91	0,00000
12	$P_{og} = 6,2316 D_{skv} - 1,2358$	0,52	0,00000
13	<b><math>P_{og} = 6,8248 D_{skv} - 1,796</math></b>	<b>0,99</b>	<b>0,00000</b>
14	$P_{og} = 14,3484 D_{skv} - 8,0302$	0,98	0,00000
15	$P_{og} = 5,7809 D_{skv} - 1,7231$	0,99	0,00000

в результате также были определены наиболее оптимальные зависимости:

$$Q_{dr} = 5240,4 D_{skv} - 2486,3, r = 0,95, t_p > t_t, \quad (4)$$

$$Q_{dr} = 0,0012 P_{og} + 1,5109, r = 0,97, t_p > t_t, \quad (5)$$

где  $t_p$  – расчетный критерий Стьюдента;  $t_t$  – теоретический критерий Стьюдента. Наилучшие варианты трехмерных геологических моделей, выделяемые по

этим зависимостям, соответствуют выделенным по зависимости № 13 из таблицы.

Для создания единого критерия оценки достоверности трехмерных моделей все индивидуальные критерии были нормализованы. При этом нормализованные значения всех индивидуальных критериев находятся в диапазоне от 0 до 1. Увеличение нормализованных критериев соответствует повышению

достоверности трехмерных геологических моделей.

Обобщение индивидуальных критериев оценки достоверности выполнено по следующей формуле:

$$O_o = D_{skv}^n \cdot Q_{dr}^n \cdot P_{og}^n, \quad (6)$$

где  $D_{skv}^n$  – нормализованный критерий  $D_{skv}$ ;

$P_{og}^n$  – нормализованный критерий  $P_{og}$ ;

$Q_{dr}^n$  – нормализованный критерий  $Q_{dr}$ .

Используя многомерный регрессионный анализ, получили математическую модель обобщенного критерия достоверности для выбора оптимальных рангов вариограмм  $R_x$  и  $R_y$ :

$$O_m = -0,020646968 + 0,000055 \cdot R_x + 0,000063 \cdot R_y + 0,000000003 R_x \cdot R_y - 0,000000009 \cdot R_x^2 - 0,00000001 \cdot R_y^2$$

$$F_p/F_t = 8,4, p < 0,0000, \quad (7)$$

где  $F_p/F_t$  – отношение расчетного критерия Фишера к теоретическому.

Сопоставление расчетных значений  $O_m$  с фактическими  $O_o$  показывает их высокую сходимость ( $r = 0,77$ ).

В графическом виде математическая модель обобщенного критерия достоверности для выбора рангов представлена на рисунке 2. Максимальные значения



обобщенного критерия достоверности указывают на наиболее оптимальные варианты геологической модели при рангах вариограмм по  $R_x$  – от 4000 до 5000 и по  $R_y$  – от 4000 до 6000 м. Линии равных значений  $O_m$  ограничивают области с одним уровнем оптимального решения. Отметим, что реализации трехмерных геологических моделей, выделяемые по  $O_m$ , также описываются зависимостями (4), (5) и № 13 из таблицы. Таким образом, разными способами получен один набор оптимальных реализаций трехмерных моделей. Оценка запасов нефти по всем 256 реализациям трехмерных геологических моделей показала, что интервал изменения начальных геологических запасов нефти составляет 23%. При оценке моделей, выбранных по обобщенному критерию  $O_m$ , размах запасов сократился до 6%.

Для изучения влияния индивидуальных критериев достоверности геологических моделей на запасы построены три уравнения регрессии:

$$Q=3577-193P_{og}, r=-0,98, t_p > t_t, \quad (8)$$

$$Q=3291,6-0,1554Q_{dr}, r=-0,73, t_p > t_t, \quad (9)$$

$$Q=3795,9-912,91D_{skv}, r=-0,47, t_p > t_t. \quad (10)$$

Все полученные зависимости являются статистически значимыми и показывают снижение запасов от всего множества вариантов с применением каждого из разработанных критериев. Взаимосвязь между  $P_{og}$  и запасами самая тесная ( $r = -0,98$ ), что подчеркивает высокую роль сейсмических прогнозов для получения достоверных трехмерных геологических моделей.

В результате проделанной работы решена задача научного обоснования параметров многовариантного трехмерного геологического моделирования и выбрано множество наиболее достоверных реализаций трехмерной модели месторождения нефти. Установлено снижение неопределенности в оценке запасов для месторождения за счет выбора более достоверных реализаций геологических моделей. Описанный подход реализован [5, 6] в программном комплексе IRAP RMS компании ROXAR и подана заявка на патент. На сегодняшний день совершенствование данного подхода продолжается. Программно реализованная технология на базе IRAP RMS позволяет получать более достоверные трехмерные геологические модели для подсчета запасов и проектирования разработки.

#### Литература:

1. Путилов И.С. Авторское свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2013610410. Многовариантный прогноз коллекторов на основе теории нечетких множеств, 9 января 2013 г. Россия.
2. Путилов И.С. Многовариантный прогноз коллекторов по данным 3D-сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 1. – С. 59–64.
3. Путилов И.С. Совершенствование комплексного прогноза коллекторов по данным сейсморазведки 3D и исследований скважин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2013. – № 3. – С. 33–37.
4. Дюбрюл О. Использование геостатистики для включения в геологическую модель сейсмических данных. – М.: EAGE, 2002. – 296 с.
5. Путилов И.С., Потехин Д.В. Авторское свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2013661302. Многовариантное геологическое 3D-моделирование с контролем качества реализаций по сейсмическим данным, 5 декабря 2013 г. Россия.
6. Путилов И.С., Потехин Д.В. Разработка технологии многовариантного 3D-моделирования с контролем качества реализаций по сейсмическим данным // Материалы научно-практической конференции «Теория и практика нефтяной геофизики». – Пермь, 2013. – С. 122–124.

**D.V. Potekhin**, Head of the Geological Modelling Department, e-mail: Denis.Potekhin@pnn.lukoil.com; **I.S. Putilov**, Cand.Sc. (Engineering), Head of the Seismic Studies Center of PermNIPIneft branch, e-mail: putilov@permnipineft.com, PermNIPIneft branch of LUKOIL-Engineering LLC in Perm

### Selection optimal settings of multivariate modeling to improve the reliability of 3D geological models of oil fields

*Selecting the optimal settings for geological modelling at the stage of creating the cubes of lithology. Received more accurate realization of the geological model.*

**Keywords:** collector prognosis, geologic-geophysical model, petroleum reservoir.

#### References:

1. Putilov I.S. Author's certificate of official registration of the computer software No. 2013610410. Multivariate forecast of reservoirs based on the fuzzy sets theory, January 9, 2013. Russia.
2. Putilov I.S. Multivariate forecast of reservoirs based on 3D seismic data // Seismic technologies. – 2013. – No. 1. – P. 59–64.
3. Putilov I.S. Sovershenstvovanie kompleksnogo prognoza kolektorov po dannym seismorazvedki 3D i issledovaniy skvazhin (Improvement of reservoirs all-round forecast based on 3D seismic data and well surveying) // Oil and gas fields geology, geophysics and development. – 2013. – No. 3. – P. 33–37.
4. Dubreuil O. Ispol'zovanie geostatistiki dlya vklyucheniya v geologicheskuyu model' seismicheskikh dannykh (Use of geostatistics for inclusion in the geological model of seismic data). – Moscow: EAGE, 2002. – 296 p.
5. Putilov I.S., Potekhin D.V. Author's certificate of official registration of the computer software No. 2013661302. Multivariate geological 3D modelling with implementations quality control based on seismic data, December 05, 2013. Russia.
6. Putilov I.S., Potekhin D.V. Razrabotka tekhnologii mnogovariantnogo 3D-modelirovaniya s kontrolom kachestva realizatsyi po seismicheskim dannym (Development of multivariate geological 3D modelling technology with implementations quality control based on seismic data) // Materials of the research-to-practice conference «Theory and practice of petroleum geophysics». – Perm, 2013. – P. 122–124.