

## ЛИТЕРАТУРА

1. Амелин И. Д., Сургучев М. Л., Давыдов А. В. Прогноз разработки нефтяных залежей на поздней стадии. — М.: Недра, 1994. — 308 с.
2. Лысенко В. Д. Проектирование разработки нефтяных месторождений. — М.: Недра, 1987. — 247 с.
3. Шурубор Ю. В. Системно-структурный подход: точка зрения инженера-разработчика нефтяных и газовых месторождений // Автоматизация, телемеханизация и

связь в нефтяной промышленности. — 1966. — № 6-7. — С. 11—17.

4. Шурубор Ю. В., Мордвинов В. А., Гудков Е. П. Ретро-спективно-перспективное укрупненное имитационное моделирование разработки нефтяных залежей // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ: Сб. тр. Междунар. науч. конф. В 7 томах. Секции 1, 4. — СПб.: Санкт-Петербургский гос. технолог. ин-т (техн. ун-т), 2000. — Т. 1. — С. 118—121.

УДК 553.98.001

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТРУКТУРНОГО ПЛАНА ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА КОСВЕННЫХ ДАННЫХ

В. В. Малышев

(ОАО «Саратовнефтегеофизика»)

Основные аспекты методики, геологические закономерности развития и взаимосвязей структурного плана глубокозалегающих отложений с показателями верхней части разреза осадочного чехла, на которых основывается разработанный автором метод прогноза структурного плана глубокопогруженных отложений по комплексу структурных и палеоструктурных показателей верхней части разреза, подробно изложены в работе [3]. В связи с этим в настоящей статье лишь кратко остановимся на данных вопросах и перейдем непосредственно к рассмотрению темы, вынесенной в заголовок.

Суть метода состоит в использовании для выявления структурных планов глубокозалегающих нефтегазоносных комплексов накопленной информации по гораздо более детально изученной верхней части разреза, которая пока не находит должного применения в практике геолого-разведочных работ. Подобный подход основывается на выраженности структурного плана глубоких горизонтов, представляющих собой объект целевого прогнозирования, в структурных и палеоструктурных показателях верхней части разреза.

В качестве объекта исследования автором выбрана терригенная толща девона Саратовского Правобережья, являющаяся перспективным нефтегазопроисковым объектом, тектоника которого изучена крайне слабо [4]. С целью прогнозирования характера залегания целевых горизонтов (кровли пласта V воробьевского горизонта и терригенной толщи девона) были проанализированы корреляционные взаимосвязи между структурно-мощностными показателями мезозойской части разреза (абсолютными отметками сеноманского, альбского, батского ярусов; толщиной пород между кровлями маастрихтского и кампанского, кампанского и сантонского, сантонского и туронского, туронского и сеноманского, сеноманского и альбского, альбского и апт-

ского ярусов) и структурными планами исследуемых отложений.

Между рядом перечисленных показателей и характером залегания исследуемых поверхностей были найдены статистические зависимости, позволяющие использовать их в определенных сочетаниях для прогнозирования глубин залегания девонских поверхностей. Наличие этих зависимостей объясняется выраженностью структурного плана терригенной толщи девона в структурных и палеоструктурных показателях мезозойской части разреза, которые унаследовали древние структуроформирующие движения [1—3, 5].

После изучения корреляционных взаимосвязей, т. е. анализа характера и степени выраженности структурного плана целевых горизонтов в структурных и палеоструктурных показателях верхней части разреза, по ним составляют прогнозные модели (регрессионные уравнения). Среди них выделяют оптимальное уравнение, т. е. имеющее минимальные абсолютную и среднеквадратичную ошибки прогнозирования и наибольший коэффициент детерминации. Заключительным этапом является расчет по составленному регрессионному уравнению абсолютных глубин залегания целевых горизонтов и построение структурных карт с использованием всего фонда глубоких и структурных скважин, имеющегося на исследуемой территории, а не только скважин, непосредственно вскрывших изучаемые отложения, число которых крайне мало для уверенных структурных построений.

Таким образом, основную идею метода можно охарактеризовать как вовлечение в структурные построения по глубокозалегающим нефтегазоносным комплексам всего имеющегося фонда скважин, как глубокого, так и структурного бурения.

Критерий применимости данного метода определяется тем, что практически все типы структур,

кроме погребенных однофазного формирования, составляющих в Нижневолжской нефтегазоносной области менее 10 %, находят отражение в структуре и (или) палеоструктуре верхней части осадочной оболочки [1]. Следовательно, установленные закономерности формирования и истории развития локальных структур дают теоретическое обоснование для использования структурно-мощностных характеристик мезозойской части разреза при прогнозировании геометрии глубокозалегающих структурных неоднородностей терригенной толщи девона Саратовского Правобережья.

Перейдем к рассмотрению технологической схемы прогнозирования структурных планов глубокопогруженных поверхностей по комплексу косвенных данных.

В качестве основного инструмента исследований был выбран регрессионный анализ, что определяется особенностями решаемой геологической задачи – количественное прогнозирование структурного плана глубокозалегающих поверхностей по комплексу косвенных данных (структурным и палеоструктурным показателям верхней части разреза).

Регрессионный анализ нашел широкое применение при решении различных геологических задач: при комплексной интерпретации промыслово-геофизических данных в задачах нефтегазовой геологии (М.М. Элланский), геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий (Г.И. Каратаев), математическом моделировании земной коры по геологической и геофизической информации (Ю.П. Белов, Б.Е. Большаков), картировании геологических характеристик (В.И. Аронов, М.А. Романова, В.М. Омелин и др.), геохимических поисках по первичным ореолам (А.А. Беус, А.П. Соловов, С.В. Григорян), анализе пространственных геологических закономерностей (И.И. Боровко), оценке запасов минерального сырья (А.М. Марголин) и др.

В нашем случае решаемую задачу регрессионного анализа можно сформулировать следующим образом: в некоторой области  $D$  по данным прямых исследований в  $N$  точках определены геологические параметры и некоторый набор косвенных признаков. Требуется построить уравнение, которое позволило бы, используя набор косвенных признаков, осуществить прогноз прямых в  $(N + P)$  точках области  $D$ . В данном случае предсказываются абсолютные глубины залегания прогнозируемой структурной поверхности в  $P$  точках области  $D$  на основе информации, полученной из анализа структурных и палеоструктурных показателей верхней части разреза и других косвенных признаков.

В соответствии с работой В.Я. Воробьева [1] для решения этой задачи выделим несколько этапов.

1. На этапе постановки задачи четко определяются объект прогноза и показатели, влияющие на прогнозируемый параметр.

2. Экономический анализ факторов для выяснения возможности замены некоторых показателей, определяемых с большими экономическими затратами, другими, определяемыми с меньшими затратами.

3. Сбор фактического материала и изучение простых моделей, включая схематическое, описательное представление о процессе, с построением на основе описательной модели формальной схемы процесса, состоящей в установлении основных характеристик и параметров системы, перечислении зависимых показателей, выявлении связи между ними.

4. Окончательным этапом является построение математической модели процесса – системы уравнений, связывающих характер процесса с параметрами системы.

В целом при прогнозировании геологического объекта или его параметров требуется по косвенным данным построить описывающую его функцию  $Y = f(Z_i)$  измеряемых параметров по экспериментальным данным и оценить погрешность предсказания по косвенным данным.

При этом следует иметь в виду, что косвенные признаки определены на всех  $N$  объектах, а прямые – только на некоторых. Ставится задача прогноза прямых признаков на основании предположения о возможности связи множества  $\{Y_i\}$  с множеством  $\{Z_j\}$ . Количественная связь элементов этих множеств в ряде случаев не может быть аппроксимирована простыми линейными моделями, поэтому необходимо анализировать и нелинейные модели.

Показатели из множества  $\{Z_j\}$  могут быть на некоторых объектах не определены, следовательно, целесообразно предусмотреть возможность их восстановления. Восстановлению подлежат те  $Z_j$ , которые оказались информативными и входят в уравнение прогноза. Процесс осуществляется на основе использования корреляционных взаимосвязей между элементами множества  $\{Z_j\}$ .

Применение регрессионного анализа дает положительные результаты только в случае учета всех его особенностей и ограничений, что отражено в предложенной методике, включающей ряд последовательно выполняемых процедур:

1. Районирование территории по типам корреляционных зависимостей. Методика районирования сводилась к следующему.

На первом этапе анализируемое множество точек, в которых определены значения прогнозируемой характеристики, разбивали на ряд “элементарных” подмножеств, соответствующих отдельным площадям и структурным объектам на изучаемой территории. Для подмножеств определяли относящиеся к этим выборкам статистики: дисперсия ( $S^2$ ) и стандартное отклонение ( $S$ ) по формулам (Девис Дж., 1977)

$$S^2 = \frac{SS_x}{n-1},$$

$$\text{где } SS_x = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n};$$

$$S = \sqrt{S^2}.$$

На втором этапе для устранения из совокупностей отдельных измерений, оказывающих недопустимо большое влияние на среднее значение, использовали критерий Шовене. Согласно этому критерию измерение должно быть отброшено, если оно дает такое отклонение от среднего значения, что вероятность появления таких же или еще больших отклонений будет меньше  $0,5/n$ , где  $n$  — число измерений. Таким образом, измерение  $x$  должно быть отброшено, если

$$|x - \bar{x}| > \tilde{x},$$

где  $\tilde{x}$  определяется уравнением

$$1 - P_{\tilde{x}} = 1 - \frac{a}{\sqrt{\pi}} \int_{-\tilde{x}}^{+\tilde{x}} \exp(-a^2 x^2) dx = 0,5n.$$

Здесь  $a$  — так называемая мера точности, определяемая из соотношения

$$a = \sqrt{1/2m\delta^2},$$

где  $m$  — число элементарных ошибок измерения;  $\delta$  — величина элементарной ошибки.

На третьем этапе выполняли анализ прогнозируемых и используемых для прогноза показателей на соответствие нормальному распределению. Закон нормального распределения наиболее часто встречается при изучении различных природных явлений и содержит только одну произвольную постоянную. Стремясь к простоте, часто полагают, что все совокупности подчиняются нормальному закону, хотя это не всегда правомерно. Большинство же статистических критериев определения однородности выборок основано на предположении, что выборки характеризуются нормальным распределением. Поэтому "элементарные" выборки, определенные на первом этапе, и некоторые комбинации их объединения подвергали анализу на соответствие нормальному распределению. Анализ проводили с использованием  $\chi^2$ -критерия (критерия Пирсона) по формулам:

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S};$$

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(O_j - E_j)^2}{E_j},$$

где  $O_j$  — число наблюдений в  $j$ -м классе;  $E_j$  — ожидаемое число наблюдений в этом классе;  $k$  — число различных классов (или интервалов).

Сопоставление полученных для выборок значений  $\chi^2$ -распределения (с числом степеней свободы  $v = k - 3$ ) позволяет судить о соответствии или несоответствии данного распределения нормальному

закону. Уровень значимости  $\alpha$  при использовании как этого критерия, так и остальных, брали равным 0,05.

Задачей четвертого этапа было выяснение возможной принадлежности двух выборок к одной и той же генеральной совокупности, т. е. объединение некоторых «элементарных» выборок. Эти исследования выполняли путем анализа выборок на соответствие  $F$ -критерию (критерий Фишера) и  $t$ -критерию (критерий Стьюдента).

$F$ -критерий позволяет по равенству дисперсий выборок судить о возможности отнесения анализируемых массивов совокупностей значений к единой совокупности. Его вычисляют по формуле (Дементьев Л.Ф., Жданов М.А., Кирсанов А.Н., 1977)

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2 |2|}$$

при числе степеней свободы критического распределения

$$v_1 = n_1 - 1; v_2 = n_2 - 1.$$

$t$ -критерий применяется лишь при соответствии рассматриваемых выборок  $\chi^2$ -критерию и  $F$ -критерию и дает возможность проверить гипотезу о равенстве средних значений двух выборок, т. е. об их однородности. Выражение для  $t$ -критерия имеет вид:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}},$$

где  $S_p$  — оценка стандартного отклонения совокупности, полученная по двум объединенным выборкам, вычисляется по формуле

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}.$$

Число степеней свободы критического значения  $t$ -критерия определяется выражением

$$v = n_1 + n_2 - 2.$$

Таким образом, районирование территории осуществляется на основе объективных критериев.

**2. Выявление информативных косвенных показателей на основе анализа их корреляционных взаимосвязей с прогнозируемыми характеристиками.** Для последующего анализа использовали косвенные показатели, имеющие значимые корреляционные связи с искомыми характеристиками (при 5%-м уровне значимости).

**3. Расчет коэффициентов регрессионных уравнений методом наименьших квадратов** осуществляется по выборкам, удовлетворяющим рассмотренным выше критериям. Метод наименьших квадратов дает наиболее вероятные значения для коэффициентов уравнения принятого вида, но не позволяет определить наилучшую форму уравнения (линейную, квадратичную и т. д.), поэтому, выполняя расчет линейных уравнений, необходимо решать задачу проверки статистической гипотезы о

соответствии регрессионной модели анализируемой совокупности.

Подобную гипотезу можно проверить с помощью  $\omega^2$  и  $v^2$ -критериев или путем дисперсионного анализа совокупности. В разработанном методе используется последний способ. Он заключается в определении величин: общей суммы квадратов ( $SS_y$ ) переменной  $y$ , суммы квадратов отклонений ( $SS_R$ ) вычисленных прогнозных значений  $\hat{y}_i$  от среднего значения  $\bar{y}$ , остаточной суммы квадратов ( $SS_D$ ), среднего квадрата линейной регрессии ( $MS_R$ ), среднего квадрата отклонения или дисперсии прогноза ( $MS_D$ ), отношения  $MS_R/MS_D$  и сравнения полученного отношения с величиной критического  $F$ -распределения при числе степеней свободы  $v_1 = m - 1$ ;  $v_2 = n - 2$ , где  $m$  — число постоянных коэффициентов в уравнении регрессии,  $n$  — число точек в выборке. Если полученное отношение средних квадратов  $MS_R/MS_D$  не превышает критическое, то дисперсия относительно линии регрессии мало отличается от дисперсии, полученной по наблюдениям, т. е. использование регрессионного уравнения недостаточно эффективно. В этом случае целесообразно искать путем перебора другой вид зависимости, дающей меньшую дисперсию прогноза.

Искомые зависимости между геолого-геофизическими параметрами не всегда успешно аппроксимируются линейными моделями первого порядка, поэтому на практике зачастую используют полиномиальные модели второго (вида  $y = a + bx + cx^2$ ) и более высоких порядков, функции гиперболического, степенного и логарифмического типов. При этом основная трудность выбора оптимальной модели заключается в том, что если вид искомой зависимости заранее неизвестен, то поиск ее уравнения путем простого перебора функций неэффективен, а расчеты весьма трудоемки, так как уже модель третьего порядка оказывается очень сложной и включает большое число членов. В связи с этим обычно прибегают к составлению моделей не выше второго порядка.

Качество приближения регрессиями значений поправок оценивали по среднеквадратичным отклонениям исходных данных от линии регрессии ( $\sigma$ ) и по значениям коэффициента детерминации ( $R^2$ ). Он равен квадрату выборочного коэффициента корреляции Пирсона ( $R$ ) и является отношением суммы квадратов, обусловленных регрессией, к общей сумме квадратов откликов, скорректированной на среднее. Коэффициент  $R^2$  измеряется в процентах и показывает долю общего разброса  $Y$  относительно среднего значения, объясняемую регрессией. Чем ближе значение  $R^2$  к 100 %, тем лучше подобранная модель описывает данные эксперимента.

Для повышения точности и достоверности результатов применяют метод пошаговой регрессии, позволяющий автоматически выбрать те переменные, которые существенно влияют на отклик.

Данный метод состоит в том, что на каждом шаге в модель включают либо исключают какую-либо независимую переменную, после чего полученный результат анализируют на предмет статистической значимости.

Расчеты, выполненные в процессе прогноза структурного плана терригенной толщи девона Правобережья Саратовской области, показали, что добавление в регрессионное уравнение члена второго порядка или совсем не улучшало, или лишь незначительно улучшало качество аппроксимации. Это позволило предположить, что несоответствие в некоторых случаях линейной регрессии первого порядка  $F$ -критерию объясняется не столько неудачно выбранной регрессионной моделью, сколько большим разбросом и недостаточным количеством наблюдённых значений. Поэтому при дальнейших исследованиях связи выражались в виде линейных уравнений первого порядка.

**4. Вычисление по регрессионным уравнениям значений прогнозируемых характеристик (в нашем случае кровли терригенной толщи девона и пласта V воробьевского горизонта) для каждой выделенной зоны в раздельности. Построение прогнозных структурных карт целевых горизонтов.**

Заключительным этапом прогноза является выдача рекомендаций по дальнейшим направлениям геолого-разведочных работ.

Вновь подчеркнем, что разработанная методика и технология прогноза структурного плана глубокопогруженных отложений по комплексу структурных и палеоструктурных показателей верхней части разреза позволяют повысить достоверность структурных построений за счет вовлечения в них всего фонда как глубоких, так и структурных скважин и оптимизировать процесс геолого-разведочных работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев В.Я. Информативность методов прогнозирования платформенных структур. — Л.: Недра, 1991. — 272 с.
2. Грачевский М.М., Дубовский И.Т., Ротенфельд В.М. О соотношении палеоструктурных планов девона и нижнего мела в Саратовско-Волгоградском Поволжье // Геология нефти и газа. — 1963. — № 7. — С. 34—37.
3. Малышев В.В. Методика прогноза структурного плана глубокопогруженных отложений по комплексу структурных и палеоструктурных показателей верхней части разреза (на примере терригенной толщи девона Саратовского Правобережья): Автореф. дис... канд. геол.-минерал. наук. — М., 2001.
4. Малышев В.В. Перспективы нефтегазоносности девона Правобережья Саратовской области // Геология нефти и газа. — 2001. — № 2. — С. 13—17.
5. Шафиро Я.Ш. О прогнозировании погребенных структур терригенного девона Волгоградского Поволжья // Геология нефти и газа. — 1968. — № 11. — С. 26—38.