*ISSN 1814-1196*
*Научный вестник НГТУ*
*том 78, № 1, 2020, с. 119–134*

*http://journals.nstu.ru/vestnik*
*Science Bulletin of the NSTU*
*Vol. 78, No. 1, 2020, pp. 119–134*

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS, COMPPUTER ENGINEERING AND CONTROL

УДК 550.8.053:519.2 DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-119-134

# Адаптация метода двойного крайгинга к структурным факторам геологической среды*

**В.В. ШЕСТАКОВ[a], О.М. ГЕРГЕТ[b]**

*634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Томский национальный исследовательский политехнический университет*

[a] *valeriy.shestakov@inbox.ru* [b] *gerget@tpu.ru*

На сегодняшний день модели параметров геологических сред применяются при решении множества задач, в число которых входят оконтуривание границ ловушек углеводородов, прослеживание миграции флюидов, определение состава горных пород и т. д. Методы построения этих моделей многочисленны и разнообразны: методы геостатистики, прямого пересчета, нейронные сети, сейсмическая инверсия и др. Все они обладают как своими преимуществами, так и недостатками. Модификация уже существующих методов и разработка новых нацелена на увеличение достоверности результата.

Распространенным недостатком существующих методов моделирования является игнорирование структурных особенностей геологической среды. Так, например, метод двойного крайгинга, рассматриваемый в этой работе, базируется на совместном использовании данных наземной сейсморазведки и геофизических исследований скважин (ГИС) и работает только в условиях предположения о горизонтально слоистом строении горных пород. Это предположение противоречит реальному поведению геометрии геологических пластов и приводит к существенному искажению результата. Устранить рассматриваемый недостаток можно с помощью адаптации метода к структурным факторам. В свою очередь, адаптацию возможно осуществить путем привлечения дополнительной информации в виде прослеженных отражающих горизонтов.

В работе приводится описание метода двойного крайгинга, а также рассматриваются возможные варианты адаптации метода к структурным факторам. Приводится три адаптивных алгоритма двойного крайгинга: первый базируется на модели среды с согласованной геометрией сейсмических границ, второй – на модели с несогласованной геометрией кровли и подошвы пласта; третий является универсальным и предполагает совместное использование первого и второго. Приводится анализ особенностей предлагаемых алгоритмов и рассматриваются способы ускорения их работы. Показаны результаты применения адаптивного метода на реальных материалах месторождений Западной Сибири.

**Ключевые слова:** объемная петрофизическая модель, геостатистика, крайгинг, адаптивный алгоритм, структурные факторы геологической среды, сейсморазведка, геофизические исследования скважин, сейсмический атрибут

* *Статья получена 11 декабря 2019 г.*

## ВВЕДЕНИЕ

Наиболее эффективным инструментом для разведки месторождений углеводородов на сегодняшний день является сейсморазведка. Все сейсморазведочные методы основаны на изучении упругих волн, искусственно возбуждаемых в геологической среде. Упругие волны, проходя через различные неоднородности, претерпевают процессы дифракции, преломления и отражения. В свою очередь, отраженные и преломленные волны, достигшие поверхности земли, регистрируются сейсмоприемниками в виде сейсмотрасс. Результатом обработки полученного набора сейсмотрасс являются 2D- или 3D-сейсмические (геофизические) поля, в дальнейшем используемые для решения обратных задач сейсморазведки [1, 2].

К числу обратных задач сейсморазведки относятся исследование строения земной коры, оценка перспектив нефтегазонасыщенности, картирование мелких ловушек нефти и газа, прогнозирование распространения коллекторов и др. [3, 4]. Отдельного внимания в рамках данной работы заслуживает задача построения объемных моделей параметров геологической среды. Необходимость построения таких моделей обусловлена тем, что некоторые параметры среды несут в себе важную информацию о местоположении коллекторов и миграции флюидов. Первичную информацию об этих параметрах получают с помощью методов геофизических исследований скважин (ГИС), позволяющих проводить детальные исследования горных пород вдоль ствола скважины [5]. Проблема заключается в том, что в большинстве случаев скважины бурятся по редкой неравномерной координатной сетке, а в соответствии с принципом равной достоверности [6] для полноценного описания изменчивости среды сеть измерений должна быть регулярной. Поэтому в последние годы активно развиваются методы объемного моделирования параметров среды.

В рамках рассматриваемой работы моделирование осуществлялось геостатистическим методом двойного крайгинга [7, 8], особенность которого заключается в использовании ковариационных функций сейсмических данных для оценки пространственной изменчивости параметров геологической среды. В простейшем случае расчет ковариационных функций может осуществляться в пределах некоторого скользящего глубинного окна, перемещающегося вдоль фиксированной глубинной отметки в соответствии с предположением о горизонтально-слоистом строении среды. Такой подход позволяет оценивать изменения ковариационных свойств в пространстве, однако не учитывает структурные особенности геологических пластов. Последнее приводит к существенным искажениям результата, так как характеристики сейсмических данных и параметров среды, в том числе и ковариационные, могут резко меняться при переходе от пласта к пласту. Исходя из этого алгоритм моделирования должен учитывать структурные особенности, т. е. должен быть адаптирован к структурным факторам.

Целью данной работы является рассмотрение способов адаптации метода двойного крайгинга к структурным факторам. В работе приводится описание самого метода двойного крайгинга, а также описание трех адаптированных алгоритмов: для модели среды с согласованной геометрией сейсмических границ; для модели с несогласованной геометрией кровли и подошвы пласта; универсальный алгоритм, предполагающий совместное использование первого и второго. Адаптированный метод был апробирован на материалах ряда месторождений Томской, Иркутской и Новосибирской областей. В рамках данной работы приводятся результаты, полученные с использованием реальных данных одного из месторождений углеводородов Западной Сибири.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть в исследуемой зоне пробурено $N$ скважин в точках $(x_i, y_i)$, образующих нерегулярную сеть. В каждой скважине проведены измерения прогнозируемого параметра, представленные в виде кривых ГИС $f_i(z),\ i=\overline{1,N}$. Пусть также в исследуемой зоне проведены наземные сейсморазведочные работы, в результате которых на равномерной объемной сетке $(x, y, z)$ заданы значения некоторого сейсмического атрибута $S(x, y, z)$. Задача построения объемной модели параметра среды заключается в восстановлении значения параметра ГИС в каждой точке, в которой известно значение сейсмического атрибута.

В подобной постановке задачи, в условиях априорной неопределенности относительно структуры геологической среды, необходимо принять гипотезу о ее горизонтально-слоистом строении. Для устранения этой неопределенности можно привлечь результаты решения структурных задач, основанных на интерпретации данных сейсморазведки. Одной из таких задач является корреляция основных и реперных отражающих горизонтов (акустически выраженных границ пластов) $\tilde{Z}(x, y)$. Имея $K$ прослеженных отражающих горизонтов $\tilde{Z}_k(x, y),\ k=\overline{1,K}$, задачу построения объемной модели параметра среды можно переопределить с учетом наличия информации о структурных особенностях геологической среды. Задача построения объемной модели параметра среды заключается в восстановлении значения параметра ГИС в каждой точке, в которой известно значение сейсмического атрибута с учетом структурных факторов геологической среды, представленных в виде отражающих горизонтов.

## 2. МЕТОД ДВОЙНОГО КРАЙГИНГА

В соответствии с геостатистическим подходом модель параметра в точке прогноза может быть записана в виде взвешенной суммы известных значений этого же параметра (в рассматриваемом случае значений параметра, измеренных в стволах скважин) [9, 10]:

$$\hat{F}(x, y, z) = \sum_{i=1}^{N} w_i(x, y, z) f_i(z), \tag{1}$$

где $x, y, z$ – пространственные координаты, определяющие положение точки прогноза; $N$ – количество известных значений параметра; $w_i$ – весовая функкция $i$-го значения параметра. Численные значения весовых функций в выражении (1) определяются через систему линейных алгебраических уравнений следующего вида:

$$C^f(z)W(x, y, z) = C^F(x, y, z), \tag{2}$$

где $C^f(z)$ – матрица ковариационных функций $C_{ij}^f(z) = M[f_i(z)f_j(z)]$ значений параметра, измеренных в точках скважин; $W(x, y, z)$ – матрица весовых функций; $C^F(x, y, z)$ – матрица ковариационных функций $c_{ij}^f(x, y, z) = M[f_i(z)F(x, y, z)]$ известных значений параметра и значения параметра в точке прогноза.

В рамках разведки месторождений углеводородов, метод двойного крайгинга для оценки пространственной неоднородности предлагает использовать данные наземной сейсморазведки $S(x, y, z)$, обладающие густой сетью наблюдений в пределах исследуемой площади. По аналогии с (1) уравнение крайгинга записывается для сейсмических данных, известных в точках стволов скважин [7, 8]:

$$\hat{S}(x, y, z) = \sum_{i=1}^{N} w_i^0(x, y, z)S_i(z), \tag{3}$$

где $w_i^0(x, y, z)$ – весовая функция сейсмических данных $i$-й скважины; $S_i(z) = S(x_i, y_i, z)$ – значения сейсмических данных в точке $i$-й скважины; $\hat{S}(x, y, z)$ – прогнозируемое значение сейсмических данных.

Использование модели (3) возможно в предположении о схожести ковариационных свойств сейсмических данных $S(x, y, z)$ и ковариационных свойств прогнозируемого параметра $F(x, y, z)$ как свойств внутренней изменчивости среды. Благодаря этому предположению можно утверждать, что система (4) в произвольной точке $(x, y, z)$ будет эквивалентна системе, построенной на данных сейсморазведки [7, 8]:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{N} w_j^0(x,y,z)c_{ij}(z) + \mu(x,y,z) = c_{i0}(x,y,z), \quad i = \overline{1,N}, \\ \sum_{j=1}^{N} w_j^0(x,y,z) = 1, \end{cases} \tag{4}$$

где $c_{ij}(z) = M\left[S_i(z)S_j(z)\right]$ – значения ковариации сейсмических данных в точках скважин с координатами $(x_i, y_i)$ и $(x_j, y_j)$ на глубине $z$; $c_{i0}(x, y, z) = M\left[S_i(z)S(x, y, z)\right]$ – значения ковариации сейсмического атрибута в точках скважин и в точке прогноза; $\mu(x, y, z)$ – множитель Лагранжа. Или в матричной форме [9]

$$C(z)W^0(x, y, z) = C^0(x, y, z).$$

Сейсмическое поле $S(x, y, z)$ является неоднородным и нестационарным процессом. Ранее было показано, что $S(x, y, z)$ также является импульсным случайным процессом, который в пределах длины волны $\lambda$ можно считать локально стационарным [12]. Поэтому оценку ковариации можно получить путем осреднения в скользящем глубинном окне:

$$c_{ij}(z) = M\left[S(x_i, y_i, z)S(x_j, y_j, z)\right] = \frac{1}{\lambda}\int\limits_{z-\lambda/2}^{z+\lambda/2} S(x_i, y_i, \tau)S(x_j, y_j, \tau)d\tau, \quad (5)$$

где $\lambda$ – половина периода колебания сейсмической волны.

В случае, когда сейсмические данные известны в точке прогноза, правая часть системы (4) может быть получена и моделирование ковариационных свойств не требуется. В результате для осуществления оценки параметра среды в точке $(x, y, z)$ вместо выражения (1) может быть использовано выражение следующего вида:

$$\hat{F}(x, y, z) = \sum_{i=1}^{N} w_i^0(x, y, z) f_i(z). \quad (6)$$

Таким образом, в соответствии с выражением (6) оценка значения параметра среды $\hat{F}(x, y, z)$ может быть осуществлена с использованием численных значений весовых функций $w_i^0(x, y, z)$, полученных по сейсмическим данным.

## 3. АДАПТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (УЧЕТ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ)

Анализируя выражения (3) и (6), можно сделать вывод, что они действительны лишь в рамках модели горизонтально-слоистой среды, позволяющей проводить анализ свойств среды и сейсмических атрибутов в одинаковых диапазонах глубин $z$. На практике при моделировании на больших удалениях это предположение нарушается, так как геологическая среда имеет сложное строение и характеризуется нелинейной геометрией границ, зачастую осложненное разрывными нарушениями [11]. Отсюда обязательным условием практического применения любого метода пространственного анализа геолого-геофизических данных является его адаптация к структурным факторам, примером которых являются отражающие горизонты.

Необходимость адаптации метода двойного крайгинга к структурным факторам геологической среды требует коррекции выражений (3) и (6) с учетом положения и толщины пластов [13]. В простейшем случае имеется оценка одного горизонта $\tilde{Z}(x, y)$ в предположении согласованной геометрии и пространственной неизменности мощности всех пластов. Соответственно, выражения (3) и (6) для такого случая преобразуется к виду

$$\widehat{F}(x, y, z) = \sum_{i=1}^{N} w_i^0(x, y, z) f_i\left(Z_i(x, y, z)\right), \tag{7}$$

$$\widehat{S}(x, y, z) = \sum_{i=1}^{N} w_i^0(x, y, z) S_i\left(Z_i(x, y, z)\right), \tag{8}$$

где $Z_i(x, y, z) = \tilde{Z}(x_i, y_i) + z - \tilde{Z}(x, y)$ – глубина с учетом поправки относительно горизонта в точке прогноза и в точке $(x_i, y_i)$. При этом коэффициенты основной матрицы системы (4) могут быть вычислены по следующей формуле (рис. 1):

$$c_{ij}(x, y, z) = \frac{1}{\lambda} \int_{\lambda/2}^{\lambda/2} S_i\left(\tau + Z_i(x, y, z)\right) S_j\left(\tau + Z_j(x, y, z)\right) d\tau, \tag{9}$$

а коэффициенты правой части соответственно

$$c_{0i}(x, y, z) = \frac{1}{\lambda} \int_{\lambda/2}^{\lambda/2} S_i\left(\tau + Z_0(x, y, z)\right) S_j\left(\tau + Z_j(x, y, z)\right) d\tau. \tag{10}$$

Адаптация согласно (9) приводит к тому, что для каждой отдельно взятой точки прогноза будет существовать своя уникальная ковариационная матрица $C(x, y, z)$. В итоге в каждой точке прогноза необходимо осуществлять анализ обусловленности основной матрицы системы, что приводит к существенному увеличению времени моделирования.

Для уменьшения времени моделирования из набора всех $(x, y, z)$ рассмотрим выборку, каждый элемент которой удовлетворяет уравнению поверхности, согласованной с горизонтом $z(x, y, z) = \tilde{Z}(x, y) + \Delta z$. Значение $Z_i(x, y, z)$ для любого элемента этой выборки оказывается не зависящим от местоположения точки прогноза $x, y$:

$$Z_i(x, y, z) = \tilde{Z}(x_i, y_i) + \left(\tilde{Z}(x, y) - \tilde{Z}(x, y) + \Delta z\right) = \tilde{Z}(x_i, y_i) + \Delta z = z(\Delta z).$$

Коэффициенты матриц системы (4) при этом оказываются равными:

$$c_{ij}(\Delta z) = \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda/2}^{\lambda/2} S_i\left(\tau + \tilde{Z}(x_i, y_i) + \Delta z\right) S_j\left(\tau + \tilde{Z}(x_j, y_j) + \Delta z\right) d\tau. \tag{11}$$

$$c_{0i}(x, y, \Delta z) = \frac{1}{\lambda} \int_{\lambda/2}^{\lambda/2} S\left(x, y, \tau + \tilde{Z}(x, y) + \Delta z\right) S_i\left(\tau + Z_i(\Delta z) + \Delta z\right) d\tau. \tag{12}$$

Принимая во внимание выражения (10) и (11), система (4) и выражение (7) могут быть переписаны в следующем виде:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{N} w_j^0(x,\ y,\ \Delta z)c_{ij}(\Delta z)+\mu(x,\ y,\ \Delta z)=c_{i0}(x,\ y,\ \Delta z), \quad i=\overline{1,N}, \\ \sum_{j=1}^{N} w_j^0(x,\ y,\ \Delta z)=1; \end{cases} \tag{13}$$

$$\widehat{F}\left(x,\ y,\ \tilde{Z}(x_i,\ y_i)+\Delta z\right)=\sum_{i=1}^{N} w_i^0(x,\ y,\ \Delta z)f_i(z(\Delta z)), \tag{14}$$

Как видно из выражения (13), основная матрица новой системы зависит лишь от значения $\Delta z$ и не зависит от пространственных координат точки прогноза. Это позволяет оптимизировать адаптированный алгоритм таким образом, чтобы формирование и анализ основной матрицы осуществлялись единожды относительно заданного значения $\Delta z$ .

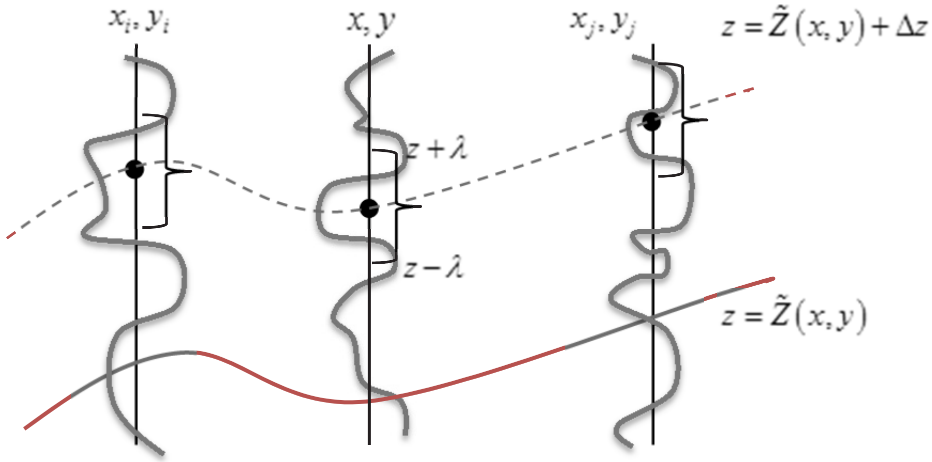



*Рис. 1.* Выбор интервалов оценки ковариационных функций, случай для модели с согласованной геометрией пластов

*Fig. 1.* The intervals choice for covariance functions evaluating, models with consistent reservoir geometry

Ниже приведен алгоритм двойного крайгинга для модели среды с согласованной геометрией границ.

1. Выбор значения $\Delta z$ .

2. Расчет коэффициентов основной матрицы системы (13) в соответствии с формулой (9).

3. Проверка основной матрицы системы (13) на обусловленность.

4. Фиксация координат $x$, $y$ текущей точки прогноза.

5. Расчет коэффициентов правой части системы (13) в соответствии с формулой (10).

6. Решение СЛАУ (13).

7. Расчет прогнозного значения параметра в соответствии с формулой (14).

8. Если расчет осуществлен не для всех *x*, *y*, возврат к пункту 4.

9. Если текущее значение $\Delta z$ не превышает заданных пределов, возврат к пункту 1, иначе – конец алгоритма.

В случае, когда границы пластов не согласованны, для описания структурных факторов среды необходима оценка по меньшей мере двух горизонтов, $\tilde{Z}_1(x, y)$ и $\tilde{Z}_2(x, y)$ (рис. 2). Рассмотрим выборку точек, удовлетворяющих следующему условию:

$$\tilde{Z}_1(x, y) \le \mathrm{z} \le \tilde{Z}_2(x, y). \tag{15}$$

Тогда значения ковариации переопределим в виде

$$c_{ij}(x, y, z) = \frac{1}{\lambda} \int\limits_{\lambda/2}^{\lambda/2} S_i\left(\tau + Z_i(x, y, z)\right) S_j\left(\tau + Z_j(x, y, z)\right) d\tau, \tag{16}$$

$$c_{0i}(x, y, z) = \frac{1}{\lambda} \int\limits_{\lambda/2}^{\lambda/2} S\left(x, y, \tau + Z(x, y, z)\right) S_i\left(\tau + Z_i(x, y, z)\right) d\tau,$$

где $$Z_i(x, y, z) = \tilde{Z}_1(x_i, y_i) + \partial z(x, y, z)\left(\tilde{Z}_2(x_i, y_i) - \tilde{Z}_1(x_i, y_i)\right),$$

$$\partial z(x, y, z) = \frac{z - \tilde{Z}_1(x, y)}{\tilde{Z}_2(x, y) - \tilde{Z}_1(x, y)},$$

$\partial z$ – коэффициент пропорциональности.

Как и в случае с (9), адаптация с использованием выражения (16) приводит к тому, что для каждой отдельно взятой точки прогноза будет существовать своя уникальная ковариационная матрица $C(x, y, z)$. Это, в свою очередь, приведет к существенному увеличению времени моделирования. Для предотвращения последнего рассмотрим ситуацию, когда коэффициент пропорциональности не зависит от координат точки прогноза, т. е. равен некоторой постоянной величине в пределах [0,1]:

$$Z_i(\partial z) = \tilde{Z}_2(x_i, y_i) + \partial z\left(\tilde{Z}_1(x_i, y_i) - \tilde{Z}_2(x_i, y_i)\right) = z(\partial z).$$

В таком случае коэффициенты матриц системы (4) оказываются равными:

$$c_{ij}(\partial z) = \frac{1}{\lambda} \int\limits_{\lambda/2}^{\lambda/2} S_i\left(\tau + Z_i(\partial z)\right) S_j\left(\tau + Z_j(\partial z)\right) d\tau, \tag{17}$$

$$c_{0i}(x, y, \partial z) = \frac{1}{\lambda} \int\limits_{\lambda/2}^{\lambda/2} S\left(x, y, \tau + Z_0(x, y, \partial z)\right) S_i\left(\tau + Z_i(\partial z)\right) d\tau, \tag{18}$$

где

$$Z_0(x, y, \partial z) = \tilde{Z}_1(x, y) + \partial z\left(\tilde{Z}_2(x, y) - \tilde{Z}_1(x, y)\right) = z(\partial z).$$

С учетом выражений (19) и (20) система (4) и выражение (7) преобразуются к следующему виду:

$$\begin{cases} \sum\limits_{j=1}^{N} w_j^0(x,\ y,\ \partial z)c_{ij}(\partial z) + \mu(x,\ y,\ \partial z) = c_{i0}(x,\ y,\ \partial z), \quad i = \overline{1, N}, \\ \sum\limits_{j=1}^{N} w_j^0(x,\ y,\ \partial z) = 1; \end{cases} \tag{19}$$

$$\widehat{F}(x,\ y,\ z) = \sum_{i=1}^{N} w_i^0(x,\ y,\ \partial z) f_i(Z_i(\partial z)), \tag{20}$$

где

$$z = \partial z\left(\tilde{Z}_2(x,\ y) - \tilde{Z}_1(x,\ y)\right) + \tilde{Z}_1(x,\ y).$$

Как видно из (20), основная матрица системы не зависит от пространственных координат точки прогноза, ввиду чего может быть единожды определена для фиксированного значения коэффициента пропорциональности $\partial z$.

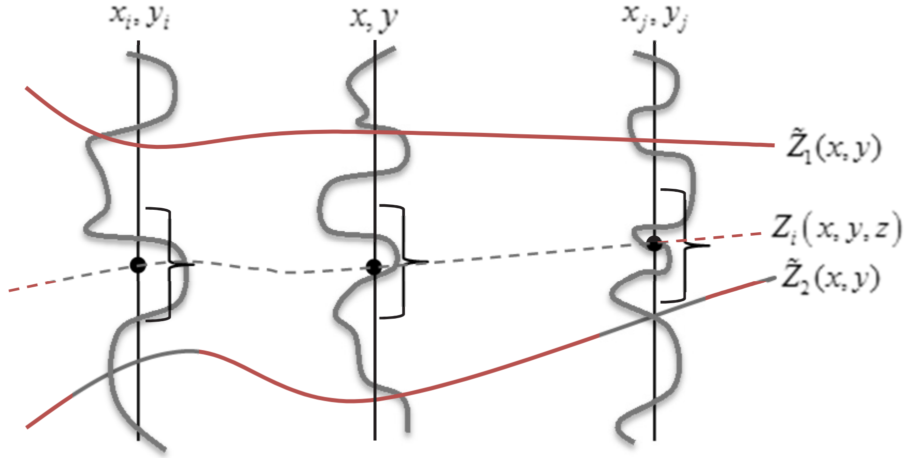



*Рис. 2.* Выбор интервалов оценки ковариационных функций, случай для модели с несогласованной геометрией кровли и подошвы пласта

*Fig. 2.* The intervals choice for covariance functions evaluating, model with inconsistent roof and bottom geometry

Ниже приведен алгоритм двойного крайгинга для модели среды с несогласованной геометрией кровли и подошвы пласта.

1. Выбор значения $\partial z = 0$.
2. Расчет коэффициентов основной матрицы системы (19) в соответствии с формулой (17).
3. Проверка основной матрицы системы (19) на обусловленность.
4. Фиксация координат $x$, $y$ текущей точки прогноза.
5. Расчет коэффициентов правой части системы (19) в соответствии с формулой (18).
6. Решение СЛАУ (19).

7. Расчет прогнозного значения параметра в соответствии с формулой (20).

8. Если расчет осуществлен не для всех $x$, $y$, возврат к пункту 4.

9. Если текущее значение $\partial z$ не превышает заданных пределов [0,1] – выбор следующего значения $\partial z$ и возврат к пункту 3. Иначе – конец алгоритма.

Алгоритм для модели с несогласованной геометрией кровли и подошвы возможно применить лишь в случае, когда выполняется условие (15), т. е. когда точка прогноза находится между двумя горизонтами. В случаях, если $\tilde{Z}_1(x, y) \geq \mathrm{z}$ или $\tilde{Z}_2(x, y) \leq \mathrm{z}$, целесообразно применять алгоритм для модели с согласованной геометрией пластов. Также условие (15) видоизменится в случае, если имеется оценка $K$ отражающих горизонтов:

$$\tilde{Z}_k(x, y) \leq z \leq \tilde{Z}_{k+1}(x, y), \; k = \overline{1, K}. \tag{21}$$

Учитывая одновременно возможность соблюдения условия $\tilde{Z}_1(x, y) \geq z$ или $\tilde{Z}_2(x, y) \leq z$, а также возможность наличия более чем двух горизонтов, предлагаемые алгоритмы адаптации не являются универсальными, т. е. их использование возможно лишь при соблюдении установленных условий. Ввиду этого становится необходимой реализация универсального алгоритма адаптации. Реализовать такой алгоритм можно путем совместного использования алгоритма для модели с согласованной геометрией границ и алгоритма с несогласованной геометрией кровли и подошвы (рис. 3).

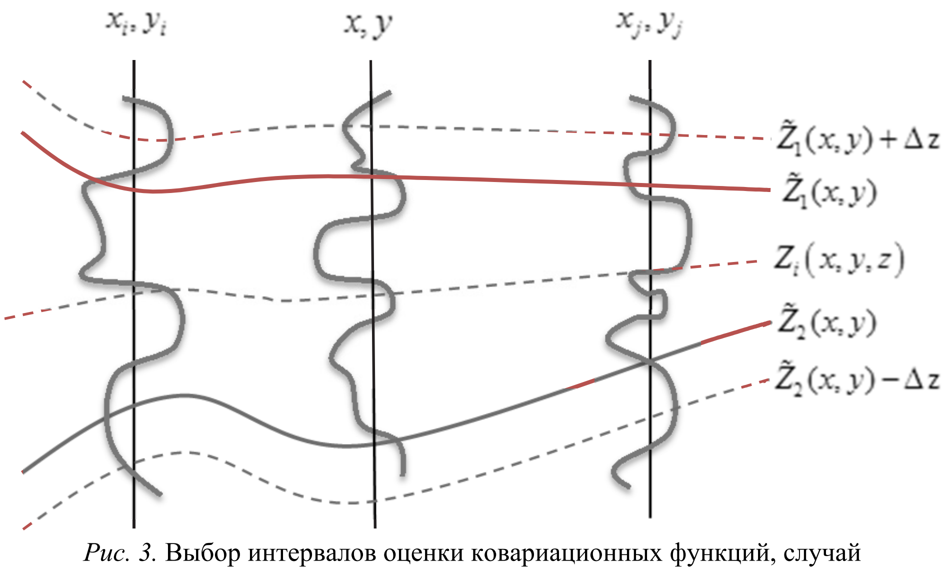



*Рис. 3.* Выбор интервалов оценки ковариационных функций, случай для универсального алгоритма

*Fig. 3.* The intervals choice for covariance functions evaluating, case for a universal algorithm

Универсальный алгоритм двойного крайгинга следующий.

1. Фиксация координат точки прогноза $(x, y, z)$.

2. Если $\tilde{Z}_1(x, y) \geq \mathrm{z}$ или $\tilde{Z}_K(x, y) \leq \mathrm{z}$, тогда расчет прогнозного значения с использованием алгоритма для модели с согласованной геометрией

границ; иначе, если выполняется условие (21), тогда расчет прогнозного значения с использованием алгоритма с несогласованной геометрией кровли и подошвы.

3. Если расчет осуществлен не для всех $(x, y, z)$, возврат к пункту 1.

В результате предлагается три алгоритма двойного крайгинга, адаптированных к структурным факторам. Первый алгоритм базируется на модели геологической среды с согласованной геометрией границ и может быть использован при наличии информации лишь об одном отражающем горизонте. Второй алгоритм базируется на модели с несогласованной геометрией кровли и подошвы и наиболее достоверно отражает структурные факторы реальной геологической среды. Третий алгоритм позволяет осуществлять адаптацию с использованием нескольких отражающих горизонтов и предполагает совместное использование первого и второго алгоритмов. Скорость работы предлагаемых алгоритмов оптимизирована за счет независимости основных матриц систем (13) и (19) от пространственных координат точки прогноза.

## 4. ПРИМЕР НА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Апробация адаптированного метода двойного крайгинга осуществлялась на данных сейсморазведки и геофизических исследований скважин ряда месторождений Томской, Иркутской и Новосибирской областей. В рамках рассматриваемого раздела приводится пример, основанный на данных реального месторождения углеводородов Западной Сибири.

В качестве исходных данных для моделирования использовались куб сейсмического атрибута; значения параметра Aps, полученные методом каротажа потенциалов собственной поляризации шести скважин; отражающий горизонт, полученный относительно подошвы баженовской свиты в результате процедуры «корреляция по переходу через ноль» (рис. 4) [14, 15].

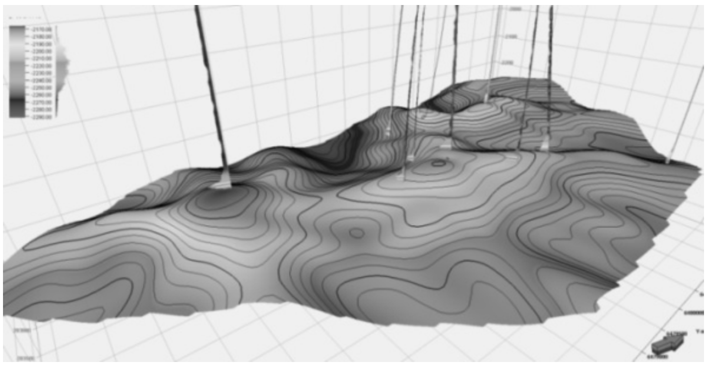


*Рис. 4.* Отражающий горизонт, построенный относительно подошвы баженовской свиты

*Fig. 4.* Reflecting horizon, built relative to the bazhenov suite bottom

Первоначально моделирование осуществлялось с использованием алгоритма без адаптации, т. е. с использованием алгоритма для горизонтально слоистой среды. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

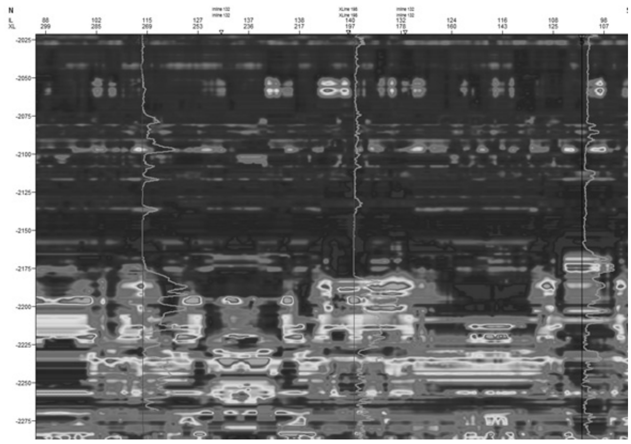
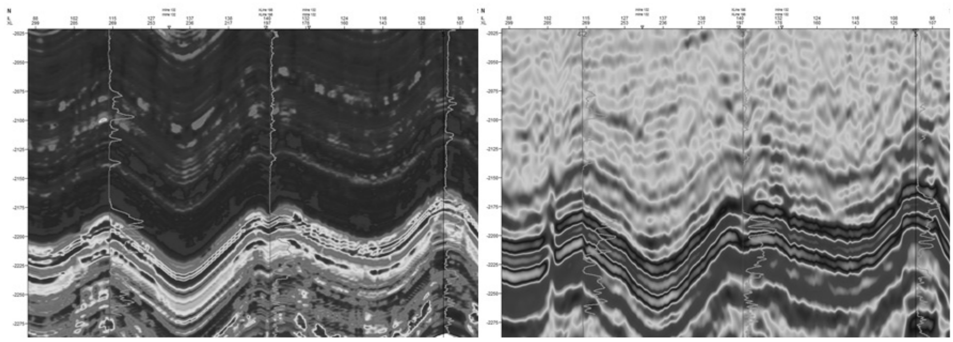


*Рис. 5.* Вертикальный срез горизонтально-слоистой модели параметра Aps

*Fig. 5.* Vertical slice of the Aps horizontally layered model

Очевидно, что полученная модель не отражает в себе структурные особенности реального геологического объекта, в чем можно убедиться исходя из сложного нелинейного поведения отражающего горизонта (см. рис. 4). Для сохранения геометрических особенностей пластов и получения более достоверного результата целесообразно использовать алгоритм, адаптированный к структурным факторам. На рис. 6, *а* приводятся результаты моделирования параметра Aps с использованием алгоритма для модели с согласованной геометрией границ.



*а* *б*

*Рис. 6.* Вертикальный срез:

*а* – модели с согласованной геометрией границ параметра Aps; *б* – куба сейсмического атрибута

*Fig. 6.* Vertical slice:

*a* – Aps model with a consistent geometry; *b* – seismic attribute cube

На рис. 6, *б* в качестве примера представлен вертикальный срез куба сейсмического атрибута. Сопоставляя рис. 6, *а* и *б*, можно с уверенностью заявить, что структурные особенности пластов, прослеживаемых в полученной модели Aps, повторяют структурные особенности соответствующих пластов, прослеживаемых по сейсмическим данным. Отсюда можно сделать вывод, что предлагаемый алгоритм адаптации является эффективным и может быть применен для решения реальных практических задач.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены вопросы адаптации метода двойного крайгинга к структурным факторам геологической среды. Приведено описание самого метода крайгинга, а также описание трех алгоритмов адаптации. Первый алгоритм применяется в случае, если имеется информация лишь об одном горизонте. Результатом его работы является модель параметров среды с согласованной геометрией пластов. Второй алгоритм основан на предположении, что геометрия кровли и подошвы пластов не согласованы, ввиду чего требует использования информации как минимум о двух горизонтах. Применение второго алгоритма возможно лишь в том случае, когда точка прогноза находится между двумя горизонтами, что является существенным ограничением. Это ограничение предлагается преодолеть с помощью универсального алгоритма, базирующегося на одновременном использовании первого и второго алгоритмов. Универсальный алгоритм предполагает возможность использования информации о более чем двух отражающих горизонтах. Скорость работы предлагаемых алгоритмов оптимизирована за счет независимости основных матриц систем (13) и (19) от пространственных координат точки прогноза. В работе приводятся и анализируются результаты моделирования с использованием адаптированного алгоритма по материалам реального месторождения углеводородов Западной Сибири.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воскресенский Ю.Н.* Полевая геофизика. – М.: Недра, 2010. – 479 с.

2. *Ермаков А.П.* Введение в сейсморазведку. – Тверь: ГЕРС, 2012. – 160 с.

3. Сейсморазведка: справочник геофизика / под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. – М.: Недра, 1981. – 464 с.

4. *Кузнецов В.И.* Элементы объемной (3D) сейсморазведки. – 2-е изд., изм. – Уфа: Информреклама, 2012. – 272 с.

5. *Косков В.Н., Косков Б.В.* Геофизические исследования скважин и интерпретация данных ГИС. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2007. – 304 с.

6. *Кобранова В.Н.* Петрофизика: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. – 392 с.

7. *Шестаков В.В., Степанов Д.Ю.* Влияние репрезентативности исходных данных на результаты моделирования методом двойного крайгинга // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 1. – С. 88–97. – DOI: 10.18799/24131830/2019/1/53.

8. *Shestakov V.V., Sysolyatina G.A., Stepanov D.Yu.* Three-dimensional models of geoenvironmental parameters // Advances in Computer Science Research. – 2016. – Vol. 51: Information technologies in science, management, social sphere and medicine (ITSMSSM 2016). – P. 126–129 p.

9. *Matheron G.* Traité de géostatistique appliquée. – Paris: Editions BGRM, 1962. – 460 p.

10. *Ковалевский Е.В.* Геологическое моделирование на основе геостатистики. – EAGE, 2011. – 117 с.

11. *Демьянов В.В., Савельева Е.А.* Геостатистика: теория и практика. – М.: Наука, 2010. – 328 с.

12. *Степанов Д.Ю., Яппарова Е.А.* Разрешающая способность и параметры веерной фильтрации при обработке сейсмических волновых полей // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312, № 5. – С. 17–22.

13. *Widrow B.*, *Stearns S.D.* Adaptive signal processing. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985. – 496 p.

14. *Кунин Н.Я.* Подготовка структур к глубокому бурению для поисков залежей нефти и газа. – М.: Недра, 1981. – 304 с.

15. Вычислительные математика и техника в разведочной геофизике: справочник геофизика / под ред. В.И. Дмитриева. – М.: Недра, 1982. – 222 с.

*Шестаков Валерий Владимирович*, аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – геостатистика, построение объемных моделей параметров геологической среды. E-mail: valeriy.shestakov@inbox.ru

*Гергет Ольга Михайловна*, профессор отделения информационных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета. Научные интересы: математические моделирование, системный анализ, нейронные сети, генетические алгоритмы, логико-вероятностные подходы, система принятия решения. E-mail: gerget@tpu.ru

*Shestakov Valeriy V.*, graduate student in the Tomsk Polytechnic University. His main research field is geostatistics and building volumetric models of the geological environment parameters. E-mail: valeriy.shestakov@inbox.ru

*Gerget Ol'ga M.*, professor at the Information Technology Department in the Tomsk Polytechnic University. Her research interests include mathematical modeling, systems analysis, neural networks, genetic algorithms, logical and probabilistic approaches, decision-making system. E-mail: gerget@tpu.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-119-134

## ***The adaptation of the double kriging method to the geological environment structural factors****

*V.V. SHESTAKOV*[a], *O.M. GERGET*[b]

*Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation*

[a] *valeriy.shestakov@inbox.ru* [b] *gerget@tpu.ru*

**Abstract**

Today, models of the geological environments parameters are used to solve many problems, including: contouring the hydrocarbon traps boundaries, tracking fluid migration, determining rock composition, etc. The methods for constructing these models are numerous and diverse: methods of geostatistics, direct recalculation, neural networks, seismic inversion, etc. All of them have both their advantages and disadvantages. Modification of existing methods and development of new ones is aimed at increasing the result reliability.

A common drawback of existing modeling methods is the neglect of the geological environment structural features. For example, the double kriging method, considered in this paper,

* *Received 11 December 2019.*

is based on the joint use of seismic exploration and geological well logging (GWL) data and works only under the assumption of a horizontally layered rock structure. This assumption contradicts the actual behavior of the geological formations geometry and leads to a significant distortion of the result. It is possible to eliminate this drawback by adapting the method to structural factors. In turn, adaptation can be accomplished by attracting additional information in the form of traced reflecting horizons.

The paper describes the double kriging method, and also considers possible options for adapting the method to structural factors. Three adaptive double kriging algorithms are presented: the first is based on a model with consistent seismic boundaries geometry; the second is based on a model with inconsistent roof and bottom geometry; the third is universal and involves the sharing of the first and second. The proposed algorithms features analysis is given and ways to accelerate their work are considered. The results of applying the adaptive method on real materials of deposits in Western Siberia are presented.

**Keywords:** Volumetric petrophysical model, geostatistics, kriging, adaptive algorithm, structural factors, seismic exploration, geological well logging, seismic attribute

## REFERENCES

1. Voskresenskii Yu.N. *Polevaya geofizika* [Field geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 2010. 479 p.

2. Ermakov A.P. *Vvedenie v seismorazvedku* [Introduction to seismic exploration]. Tver, GERS Publ., 2012. 160 p.

3. Gurvich I.I., Nomokonov V.P., eds. *Seismorazvedka: spravochnik geofizika* [Seismic exploration. Reference book of geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 464 p.

4. Kuznetsov V.I. *Elementy ob"emnoi (3D) seismorazvedki* [Elements of three-dimensional (3D) seismic survey]. 2nd ed. Ufa, Informreklama Publ., 2012. 272 p.

5. Koskov V.N., Koskov B.V. *Geofizicheskie issledovaniya skvazhin i interpretatsiya dannykh GIS* [Geophysical borehole investigations and data interpretation]. Perm, Perm State Technical University Publ., 2007. 304 p.

6. Kobranova V.N. *Petrofizika* [Petrophysics]. 2nd ed. Moscow, Nedra Publ., 1986. 392 p.

7. Shestakov V.V., Stepanov D.Yu. Vliyanie reprezentativnosti iskhodnykh dannykh na rezul'taty modelirovaniya metodom dvoinogo kraiginga [Influence of initial data representation on the results of simulation by double kriging method]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Enineering*, 2019, no. 1, pp. 88–97. DOI: 10.18799/24131830/2019/1/53.

8. Shestakov V.V., Sysolyatina G.A., Stepanov D.Yu. Three-dimensional models of geoenvironmental parameters. *Advances in computer science research*, 2016, vol. 51. Information technologies in science, management, social sphere and medicine (ITSMSSM 2016), pp. 126–129.

9. Matheron G. *Traité de géostatistique appliquée*. Paris, Editions BGRM, 1962. 460 p.

10. Kovalevskii E.V. *Geologicheskoe modelirovanie na osnove geostatistiki* [Geological modelling on the base of geostatistics]. EAGE, 2011. 117 p.

11. Dem'yanov V.V., Savel'eva E.A. *Geostatistika: teoriya i praktika* [Geostatistics: theory and practice]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 328 p.

12. Stepanov D.Yu., Yapparova E.A. Razreshayushchaya sposobnost' i parametry veernoi fil'tratsii pri obrabotke seismicheskikh volnovykh polei [Fan filtering resolution and parameters at development of seismic wave fields]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 5, pp. 17–22.

13. Widrow B., Stearns S.D. *Adaptive signal processing*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1985. 496 p.

14. Kunin N.Ya. *Podgotovka struktur k glubokomu bureniyu dlya poiskov zalezhei nefti i gaza* [Preparing structures for deep drilling to search for oil and gas deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 304 p.

15. Dmitriev V.I., ed. *Vychislitel'nye matematika i tekhnika v razvedochnoi geofizike: spravochnik geofizika* [Computational mathematics and engineering in exploration Geophysics. Handbook of Geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 222 p.

Для цитирования:

*Шестаков В.В., Гергет О.М.* Адаптация метода двойного крайгинга к структурным факторам геологической среды // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 1 (78). – С. 119–134. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-119-134.

For citation:

Shestakov V.V., Gerget O.M. Adaptatsiya metoda dvoinogo kraiginga k strukturnym faktoram geologicheskoi sredy [The adaptation of the double kriging method to the geological environment structural factors]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 1 (78), pp. 119–134. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-119-134.