



## ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ КИНЕМАТИКИ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН В ЗАДАЧЕ УЧЕТА ПОВЕРХНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Г.Д. Горелик, А.П. Сысоев

*Национальный минерально-сырьевой университет “Горный”*

*199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, 2, Россия; e-mail: gleb.gorelik@yandex.ru, sysoev-50@mail.ru*

При обработке наземных сейсмических наблюдений метода отраженных волн верхняя часть разреза описывается слоем, ограниченным дневной поверхностью и линией приведения. При компенсации верхней части разреза статическими поправками предполагается, что скорость в слое равна нулю, и влияние этого объекта на кинематику отраженных волн описывается только временной мощностью слоя. Это допущение приводит к искажениям скоростей суммирования с последующим влиянием на результаты решения обратной кинематической задачи. Рассмотрено частное решение задачи компенсации верхней части разреза при истинном значении скорости первого слоя. Эффективность решения иллюстрируется результатами математического моделирования.

*Верхняя часть разреза, компенсация переменного рельефа, искажения скоростей суммирования, обработка данных метода общей глубинной точки*

### TWO-LAYER MODELING FOR CORRECTION OF NEAR-SURFACE HETEROGENEITY IN SEISMIC REFLECTION METHOD

G.D. Gorelik, A.P. Sysoev

*National Mineral Resources University (University of Mines)*

*199106, Saint-Petersburg, 21 Line, 2, Russia; e-mail: gleb.gorelik@yandex.ru, sysoev-50@mail.ru*

In processing of surface observations in the seismic reflection method, a near surface is described as a layer bounded by a daylight surface and a datum. If the near surface is compensated by static corrections, one assumes that the velocity in the layer is equal to zero and its influence on reflected waves kinematics is described by layer time thickness only. Such simplification of the model results in stacking velocity distortion with subsequent effect on inverse kinematic problem solution. In this paper, we consider a particular solution of the near-surface compensation problem for true near-surface velocity. The solution effectiveness has been confirmed by mathematical modeling results.

*Nearsurface, variable relief, stacking velocity, CDP data processing*

### ВВЕДЕНИЕ

При анализе кинематики отраженных волн предполагается, что наблюдения получены на горизонтальной плоскости и скоростная модель среды определена непосредственно от уровня наблюдений. Но для наземных сейсмических исследований необходимо учитывать структурно скоростную неоднородность верхней части разреза (ВЧР), основными элементами которой являются зона малых скоростей (ЗМС) и изменяющийся по линиям наблюдений рельеф дневной поверхности.

При обработке сейсмических данных годограф общей глубинной точки (ОГТ) описывается гиперболой. Неоднородность ВЧР приводит к отклонению времен регистрации отраженных волн от гиперболы, что является препятствием для оценки кинематических параметров и синфазного суммирования отраженных волн.

Значительный перепад скорости на подошве ЗМС определяет простую геометрию (субвертикальность) падающих и восходящих лучей при пересечении ЗМС (рис. 1, а).

Наблюденное временное поле представляется суммой двух составляющих – нормального поля отраженных волн, определенного от линии приведения (ЛП), и статических поправок  $\tau = a(x-l/2) + b(x+l/2)$  – временных задержек,

определенных для каждой трассы в пунктах взрыва  $a(x)$  и приема  $b(x)$ :

$$t(x, l) = \sqrt{t_0^2(x) + (l/v_c)^2} + \tau(x, l).$$

Здесь  $x$  – координата срединной точки,  $l$  – удаление приемник–источник,  $t_0$  – вертикальное время отраженной волны от линии приведения,  $v_c$  – скорость ОГТ, измеренная по годографу ОГТ от ЛП после ввода статических поправок. Пересчет поля на линию приведения выполняется сдвигом трасс по времени на величину статических поправок.

Если неоднородность ВЧР включает переменный рельеф дневной поверхности, то интервал разреза между дневной поверхностью и линией приведения, кроме ЗМС, представлен отложениями, скорость в которых сопоставима со скоростью подстилающих отложений. В этом случае условие вертикальности лучей выполняется только для малых удалений ПП–ПВ. Для удалений, сопоставимых с глубиной отражающей границы, угол выхода близок к 30–40°, поэтому “статическая” и “лучевая” временные задержки существенно различаются, и при пересчете волнового поля на линию приведения необходимо учитывать преломление лучей на линии приведения (см. рис. 1, б).

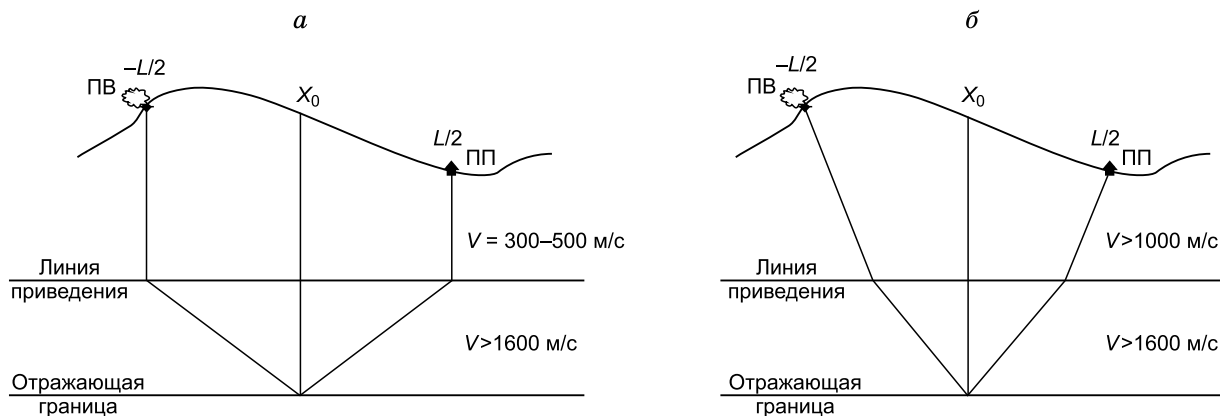


Рис. 1. Модель неоднородности ЗМС без учета (а) и с учетом (б) преломления лучей на границе ЗМС.

Анализ искажений скорости суммирования при компенсации рельефа статическими поправками впервые выполнен в работах [Сысоев, Янивец, 2004; Сысоев, 2011].

### КОМПЕНСАЦИЯ ПЕРЕМЕННОГО РЕЛЬЕФА СТАТИЧЕСКИМИ ПОПРАВКАМИ

Введем дополнительные параметры волнового поля:  $t_r$ ,  $v_r$  – вертикальное время и эффективная скорость отраженной волны до ввода статических поправок, т. е. параметры годографа, измеренные от линии наблюдения (ЛН).

Без потери общности предположим, что рельеф описывается наклонной прямой линией. Тогда для всех трасс ОГТ определена постоянная суммарная статическая поправка  $\tau$ . Примем, что величина поправки положительна при пересчете поля вверх, тогда

$$t_0 = t_r + \tau. \quad (1)$$

Сдвиг трасс на постоянную величину не изменяет кривизну годографов. Используя известное выражение для предельной эффективной скорости, выразим условие равенства кривизны в виде

$$v_c^2 t_0 = v_r^2 t_r \Rightarrow v_c^2 t_0 = v_r^2 (t_0 - \tau). \quad (2)$$

Формула (2) описывает преобразование скоростей отраженных волн при компенсации рельефа статическими поправками. Проиллюстрируем результат такого преобразования на примере математического моделирования.

Задана слоисто-однородная модель с горизонтальными границами раздела и наклонным рельефом дневной поверхности с перепадом высот 200 м (рис. 2), скорости слоев составляют 2500, 4000, 4500, 5500 м/с.

Приемники и источники расположены на поверхности наблюдений. Шаг между пунктами возбуждения 100 м, между пунктами приема – 50 м. Число каналов в сейсмограмме 121, система наблюдения центральная.

Компенсируем влияние рельефа дневной поверхности вводом статических поправок до линии приведения, расположенной на уровне 200 м. В результате вертикальные времена пробега волн  $t_0$  на суммарном временном разрезе в соответствии с моделью горизонтальных отражающих границ восстанавливаются (рис. 3) до постоянных значений вдоль профиля.

Скорости отраженных волн (рис. 4, а) после ввода статических поправок изменяются вдоль профиля в широком диапазоне для всех отражающих горизонтов. Использование этих скоростей для оценки “эффективных” глубин  $h = vt_0 / 2$  приводит к значительным искажениям данного параметра модели (см. рис. 4, б). При увеличении альтитуды рельефа увеличиваются расчетные значения глубины отражающих горизонтов. Диапазоны изменения значений скоростей и глубин вдоль профиля приведены в табл. 1.

Результаты математического моделирования подтверждают, что при компенсации переменного рельефа дневной поверхности статическими поправками возникают

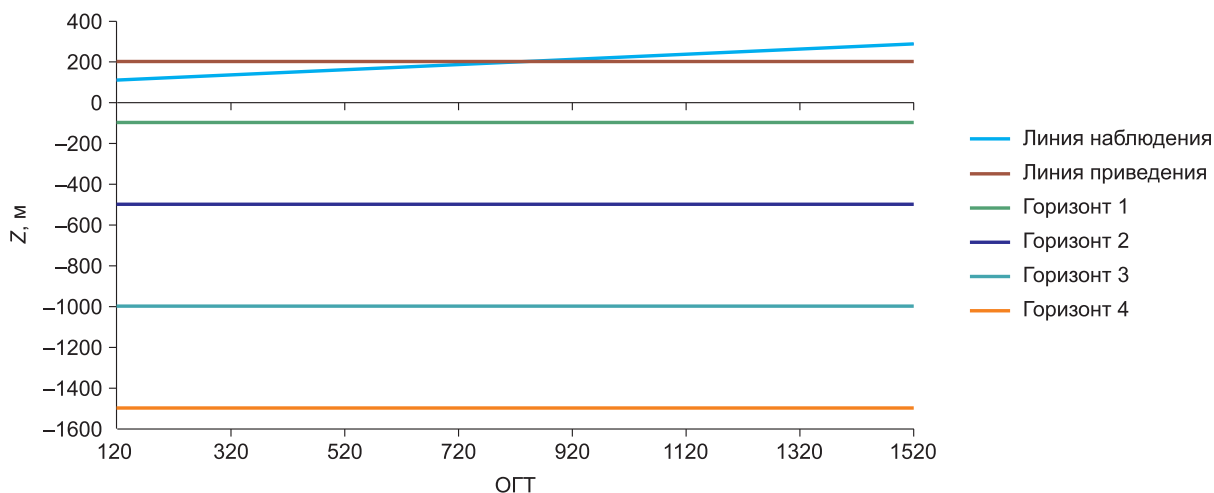


Рис. 2. Модель среды с наклонным рельефом дневной поверхности.

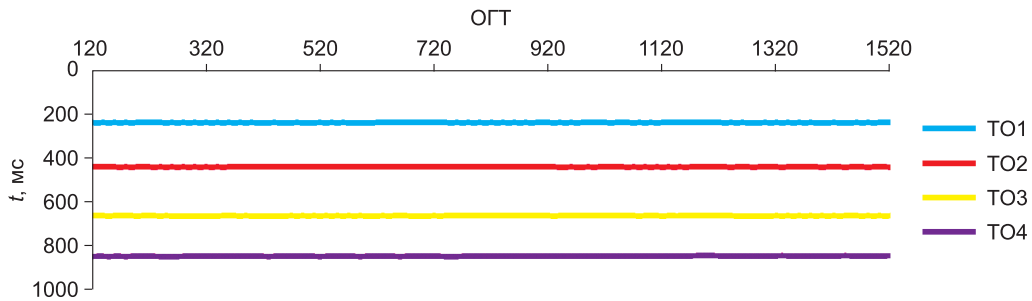


Рис. 3. Графики вертикальных времен после ввода статических поправок.

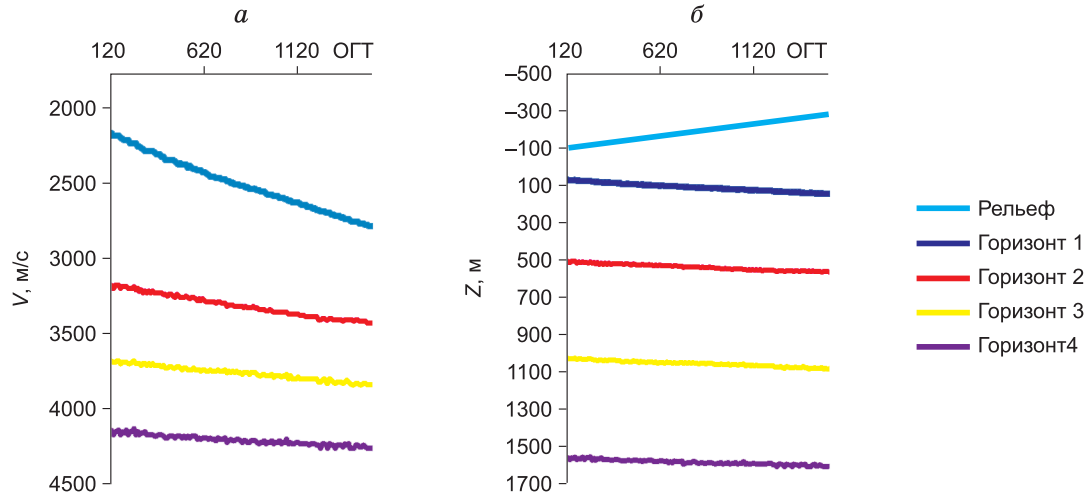


Рис. 4. Графики горизонтальных скоростей (а) и “эффективных” глубин (б) отражений при компенсации рельефа статическими поправками.

Таблица 1

| Горизонт | $ v_{\max} - v_{\min} $ , м/с | $ h_{\max} - h_{\min} $ , м |
|----------|-------------------------------|-----------------------------|
| 1        | 620                           | 74                          |
| 2        | 250                           | 59                          |
| 3        | 160                           | 53                          |
| 4        | 120                           | 42                          |

искажения эффективных скоростей и глубин отраженных волн, пропорциональные изменению альтитуды поверхности наблюдения.

#### ДВУХСЛОЙНАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Модель среды, описывающую задачу компенсации рельефа, представим двумя слоями, ограниченными линиями наблюдения и приведения и отражающей границей. Следует рассмотреть два варианта модели. В первом случае ЛП расположена выше линии наблюдения (рис. 5, а), во втором – ниже (см. рис. 5, б). Введем параметры модели:  $v_1, \tau$  – скорость и двойное вертикальное время слоя, ограниченного ЛП и ЛН. Параметр  $\tau$  представляет величину суммарной статической поправки. Эти два параметра считаем заданными априори;  $t_0, v_0$  – вертикальное время и эффективная скорость отраженной волны в предположении, что наблюдения выполнены на линии приведения;

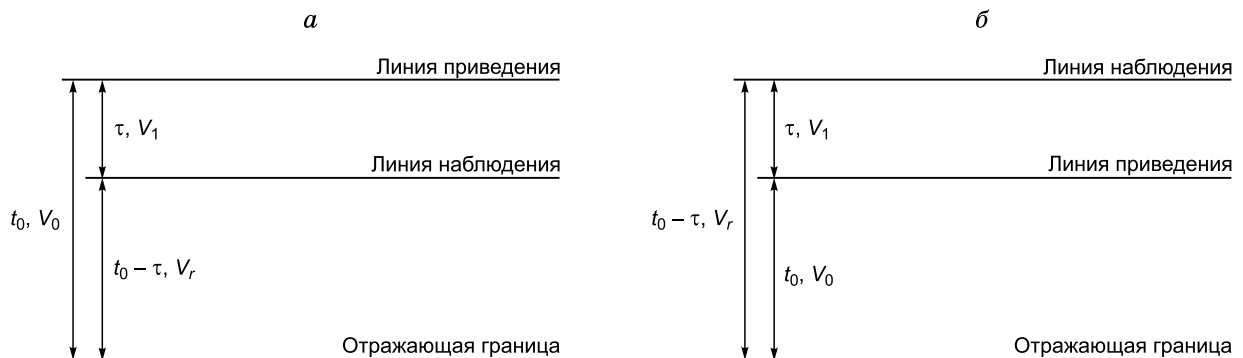


Рис. 5. Два варианта выбора линии приведения.

$(t_0 - \tau), v_r$  – вертикальное время и эффективная скорость отраженной волны в предположении, что регистрация выполнена на линии наблюдения.

Известно [Бляс, 2005], что эффективные скорости многослойной среды для удаления источник–приемник менее 0.8 глубины отражающего горизонта удовлетворительно описываются уравнением среднеквадратичной скорости. Используем его для связи параметров двухслойной модели:

$$v_r^2(t_0 - \tau) = v_0^2 t_0 + v_1^2 \tau. \quad (3)$$

Уравнение (3) является основой для скоростного анализа и суммирования отраженных волн для модели среды, в которой неоднородность ВЧР описана определенной скоростью и временной мощностью [Сысоев, 2011].

Примем, что скорость первого слоя равна нулю ( $v_1 = 0$ ). Тогда уравнение (3) приводится к структуре уравнения (2):

$$v_r^2(t_0 - \tau) = v_0^2 t_0. \quad (4)$$

Отсюда следует, что ввод статических поправок соответствует включению в модель среды слоя с отличной от нуля временной мощностью и нулевой скоростью.

#### КОРРЕКЦИЯ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ ПОСЛЕ ВВОДА СТАТИЧЕСКИХ ПОПРАВОК

Выше показано, что при компенсации рельефа статическими поправками значения эффективных скоростей отраженных волн имеют недопустимые с практической точки зрения искажения. Тем не менее по результатам стандартной обработки получен скоростной разрез, известны статические поправки и, соответственно, известна скорость слоя, которая использовалась для расчета поправок. Покажем, что этих данных достаточно для решения задачи коррекции кинематики волнового поля.

Пусть дано волновое поле с введенными статическими поправками и определены кинематические параметры, полученные по результатам стандартной обработки, включая  $v_c(t_0)$  – скорости суммирования,  $\tau$  – значения суммарных статических поправок ПВ+ПП,  $v_1$  – скорость в слое между ЛП и рельефом дневной поверхности. После ввода статических поправок время наступления сейсмического события (отражения) на линии приведения определяется уравнением годографа

$$t_c(l) = \sqrt{t_0^2 + (l/v_c)^2}. \quad (5)$$

При заданных значениях  $t_0, v_c$  по формулам (1), (2) можно рассчитать параметры годографа от линии наблюдения:

$$t_r = t_0 - \tau; \quad v_r^2 = v_c^2 t_0 / (t_0 - \tau). \quad (6)$$

В этом преобразовании выполнен пересчет скорости на линию наблюдения с нулевым значением скорости первого слоя ( $v_1 = 0$ ). Далее, используя уравнение среднеквадратичной скорости (5), выполняем обратный пересчет на ЛП, но уже с истинным значением скорости первого слоя:

$$v_0^2 = (v_r^2(t_0 - \tau) - v_1^2 \tau) / t_0 = v_c^2 - v_1^2 \tau / t_0. \quad (7)$$

Время сейсмического события после пересчета определяется двумя параметрами годографа  $t_0, v_0$ :

$$t(1) = \sqrt{t_0^2 + (l/v_0)^2} = \sqrt{t_0^2 + l^2 t_0 / (v_c^2 t_0 - v_1^2 \tau)}. \quad (8)$$

В результате выполненных преобразований для любого значения вертикального времени  $t_0$ , измеряемого от линии приведения, определены два значения скорости:  $v_c$  – измеренное после ввода статических поправок и редуцированное –  $v_0$ . Последнее значение описывает результат пересчета на линию наблюдения с использованием уравнения среднеквадратичной скорости.

Разность времен годографов (1) и (8) определяет величину корректирующей поправки

$$d_t(l) = \sqrt{t_0^2 + (l/v_c)^2} - \sqrt{t_0^2 + l^2 t_0 / (v_c^2 t_0 - v_1^2 \tau)}, \quad (9)$$

реализующей пересчет волнового поля с введенными статическими поправками к кинематическому способу компенсации рельефа дневной поверхности.

Для верификации полученных результатов выполнена дополнительная обработка модельного профиля. На вход программы поступали трассы с введенными статическими поправками и результаты скоростного анализа. После выполнения корректирующего преобразования (9) повторно выполнен скоростной анализ. Графики скоростей по горизонтам (рис. 6, а) имеют небольшой линейный тренд. На рис. 6, б представлены графики эффективных глубин. Здесь также сохраняется линейный тренд, диапазоны изменения расчетных скоростей и глубин, характеризующие погрешность расчетных параметров, представлены в табл. 2.

Сравнивая результаты, представленные в таблицах, можно заключить, что в результате коррекции получен практически значимый результат, поскольку оценки по-

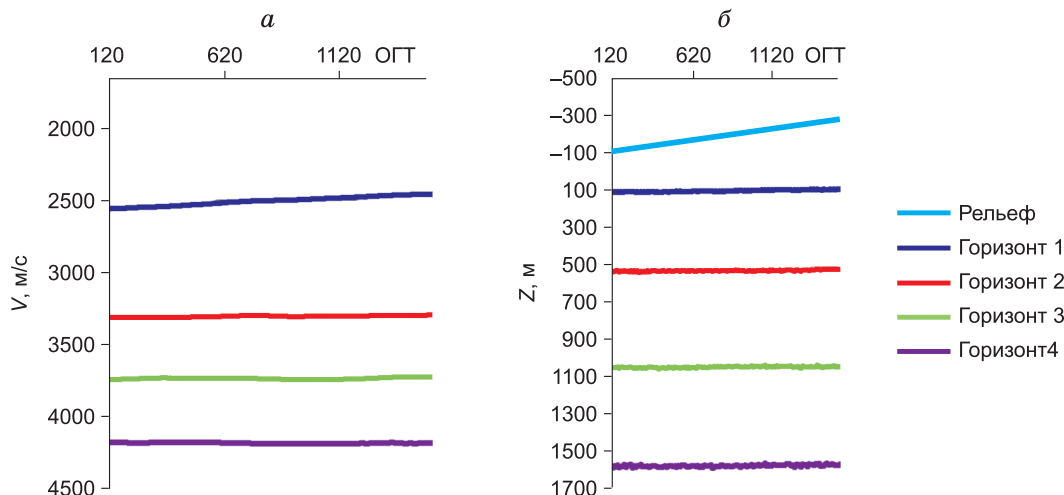


Рис. 6. Графики горизонтальных скоростей (а) и “эффективных” глубин (б) отражений после коррекции скоростной модели.

Таблица 2

| Горизонт | $ v_{\max} - v_{\min} $ , М/с | $ h_{\max} - h_{\min} $ , М |
|----------|-------------------------------|-----------------------------|
| 1        | 100                           | 15                          |
| 2        | 17                            | 7                           |
| 3        | 17                            | 10                          |
| 4        | 11                            | 7                           |

грешности расчета “эффективных” глубин уменьшены в 5 раз. Следует отметить, что скоростной анализ отражений выполнен в диапазоне удалений, ограниченном растяжением сигнала 30 %. Максимальная погрешность оценки глубин получена для первого горизонта на времени  $\sim 0.2$  с, что объясняется низкой кратностью суммирования.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами рассмотрена задача компенсации рельефа дневной поверхности с использованием двухслойной модели среды.

Показано, что компенсация неоднородности ВЧР статическими поправками представляет собой вариант решения этой задачи с условием равенства нулю скорости первого слоя, описывающего верхнюю часть разреза.

Рассмотрена задача компенсации рельефа с реальным значением скорости первого слоя. Предложен способ решения этой задачи с использованием скоростной модели, полученной после стандартной обработки, когда компенсация рельефа выполняется статическими поправками, и известных аналитических формул определения скоростей отраженных волн.

Опробование предложенного алгоритма на численной модели показывает, что сравнительно со способом статических поправок погрешность оценивания скорости суммирования и эффективной глубины отраженных волн снижается в 5 раз.

#### Литература

- Бляс Э.А.** Новый взгляд на скорости ОГТ в слоистых латерально-неоднородных средах: аналитическое и численное исследование // Технологии сейсморазведки. 2005. № 3. С. 7–25.
- Сысоев А.П.** Прикладные задачи компенсации неоднородности верхней части разреза при обработке и интерпретации сейсмических данных. Новосибирск, 2011. 90 с.
- Сысоев А.П., Янивец Р.Б.** Влияние рельефа на оценки кинематических параметров отраженных волн // Геофизический вестник. 2004. № 12. С. 10–15.

*Поступила 1 июня 2015 г.,  
в окончательном варианте – 8 июля 2015 г.*

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

**ГОРЕЛИК Глеб Дмитриевич** – аспирант кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки МПИ Национального минерально-сырьевого университета “Горный” (Санкт-Петербург). E-mail: gleb.gorelik@yandex.ru

**СЫСОЕВ Анатолий Петрович** – доктор технических наук, профессор кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки МПИ Национального минерально-сырьевого университета “Горный” (Санкт-Петербург). E-mail: sysoev-50@mail.ru