

УДК: 550.83.017

DOI: 10.47148/1609-364X-2021-2-47-52

## Выбор параметров обработки при решении 3D обратной задачи гравиразведки методом дискретного преобразования Фурье в ГИС ИНТЕГРО

© 2021 г. — Н.Н. Пиманова, В.А. Спиридонов

Отделение Геоинформатики ФГБУ «ВНИГНИ», Москва, Россия; nadja@geosys.ru

Поступила 21.05.2021 г.

Принята к печати 01.06.2021 г.

**Ключевые слова:** 3D плотностная модель, 3D моделирование, обратная задача гравиразведки, ГИС ИНТЕГРО.

**Аннотация:** В ГИС ИНТЕГРО для решения 3D обратной задачи гравиразведки создана программа, использующая дискретное преобразование Фурье. Результатом ее работы является 3D распределение эффективной плотности. Программа позволяет использовать расширенную параметризацию вида:  $f_{\alpha,\beta}(r;x)=f(r,z\alpha)|z|^{-\beta}$ . Меняя параметры  $\alpha$  — «множитель по глубине» и  $\beta$  — «экспонента при  $z$ », можно получать различные эквивалентные распределения эффективных плотностей и выбирать из них наиболее подходящее, исходя из априорной информации. Опыт решения 3D обратной задачи этим методом с разными величинами задаваемых параметров позволил рекомендовать оптимальные их значения. В качестве критерия выбора варианта решения из множества возможных предложено использовать сравнение их с данными сейсмических исследований ГСЗ и МОВ.

Для цитирования: Пиманова Н.Н., Спиридонов В.А. Выбор параметров обработки при решении 3D обратной задачи гравиразведки методом дискретного преобразования Фурье в ГИС ИНТЕГРО // Геоинформатика. — 2021. — № 2. — С. 47–52. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-2-47-52.

## Selection of processing parameters for solving the 3D inverse problem of gravity exploration by the discrete Fourier transform method in GIS INTEGRO

© 2021 — N. N. Pimanova, V. A. Spiridonov

Division of Geoinformatics, FSBI «All-Russian Research Geological Oil Institute», Moscow, Russia; nadja@geosys.ru

Received 21.05.2021

Accepted for publication 01.06.2021

**Key words:** 3D density model, 3D modeling, inverse problem of gravimetry, GIS INTEGRO.

**Abstract:** In GIS INTEGRO, a program using the discrete Fourier transform is created to solve the 3D inverse problem of gravimetry. The result of its work is a 3D distribution of the effective density. The program allows to use an extended parametrization of the form:  $f_{\alpha,\beta}(r;x)=f(r,z\alpha)|z|^{-\beta}$ . By changing the parameters  $\alpha$  — "depth multiplier" — and  $\beta$  — "exponent at  $z$ " — one can obtain various equivalent distributions of effective densities and choose the most appropriate one based on a priori information. The experience of solving the 3D inverse problem by this method with different set values of these parameters allowed us to recommend the optimal values. As a criterion for choosing a solution from a variety of possible solutions, it is proposed to use a comparison of them with the data of seismic studies of the DDS and the CCP.

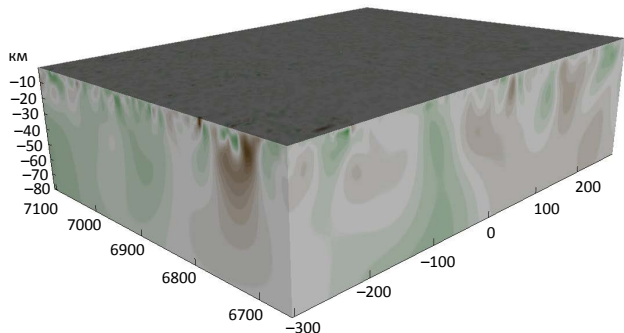
For citation: Pimanova N. N., Spiridonov V. A. Selection of processing parameters for solving the 3D inverse problem of gravity exploration by the discrete Fourier transform method to GIS INTEGRO. *Geoinformatika*. 2021;(2):47–52. DOI: 10.47148/1609-364X-2021-2-47-52. In Russ.

Получить информацию о 3D распределении плотностных источников в земной коре геофизики пытались с 70-х годов двадцатого века. В данном случае мы имеем в виду не определение параметров отдельных тел или границ, а построение 3D куба распределения плотности (рис. 1). Сначала использовалось статистическое зондирование, затем появились подходы, применяющие спектральные преобразования гравитационного поля [2, 4 и др.]. На этом этапе сложным вопросом применения этих методов являлась привязка полученного распределения источников к глубине. Для этого эмпирически были выведены соответствующие формулы.

При этом, если статистическое зондирование не является решением обратной задачи и дает возможность лишь для качественного анализа распо-

ложения источников, то спектральные методы позволяют получить 3D распределение эффективной плотности. Однако, зачастую пределы изменения рассчитанной эффективной плотности в результате превосходили «разумные» с точки зрения геологических представлений о составе пород и физических свойствах разных отделов земной коры. Поэтому для построения плотностных разрезов, получаемых как сумма эффективной плотности и регионального изменения плотности [5], описывающего ее градиентное изменение с глубиной, полученные эффективные плотности приходилось нормировать (то есть загонять в «разумные» пределы ее изменения. Чаще всего задавались пределы от 0,3 до -0,3 г/см<sup>3</sup>). Однако проблема нормировки 3D распределения эффективной плотности состоит в том, что резуль-

**Рис. 1.** Куб распределения эффективной плотности  
 Fig. 1. Effective density distribution cube



тат решения прямой задачи от него уже не будет соответствовать наблюдаемому полю.

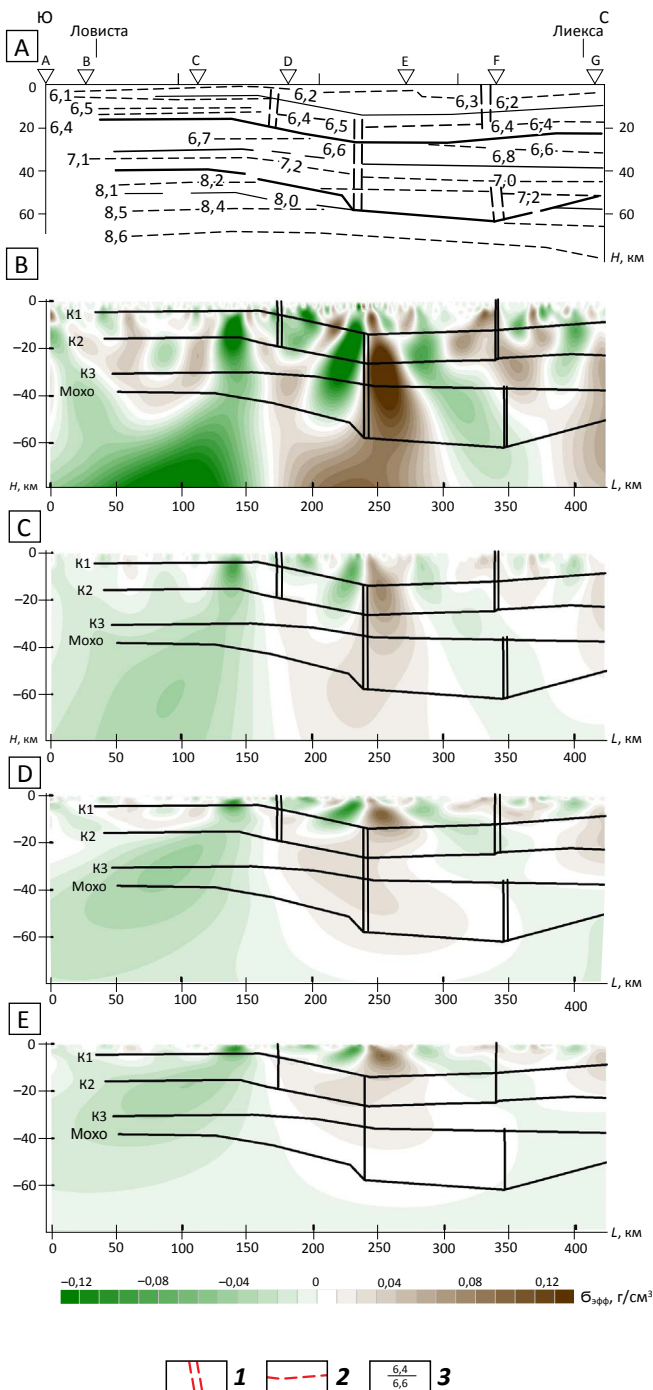
В ГИС ИНТЕГРО в настоящее время для решения 3D обратной задачи гравirazведки создана программа, использующая дискретное преобразование Фурье [1]. Результатом ее работы является 3D распределение эффективной плотности. Описываемый метод решения обратной задачи основывается на задании функции, определяющей распределение плотностей по глубинам. В оригинальной работе используется функция «Гаусса второго порядка» вида  $f(r,x) = e^{-r/z}$ . В ГИС INTEGRО программа использует расширенную параметризацию вида:  $f_{\alpha,\beta}(r,x) = f(r,z\alpha)|z|^{-\beta}$ . Изменение параметров  $\alpha$  — «множитель по глубине» и  $\beta$  — «экспонента при  $z$ » обуславливает множество эквивалентных решений, позволяющих в широком диапазоне варьировать рассчитанную глубину залегания аномалообразующих источников. «Множитель по глубине» поднимает низкочастотные компоненты распределения эффективной плотности вверх, «экспонента при  $z$ » — опускает вниз. Комбинируя разные значения этих параметров, можно построить много вариантов 3D распределений эффективных плотностей, каждое из которых при этом будет соответствовать наблюдаемому полю.

Для дальнейшей интерпретации наиболее подходящий вариант решения обратной задачи выбирается исходя из априорной информации. В качестве таковой можно использовать сейсмические разрезы, например, по профилям ГСЗ, имеющимся на площади работ [3].

Вопрос выбора величины параметров «множитель по глубине» и «экспонента при  $z$ » является очень важным, так как от этого существенно меняется рассчитанная глубина залегания аномалообразующих объектов и их плотность. На рисунке 2 приведены сечения 3D распределений эффективной плотности до глубины 80 км по профилю ГСЗ «Балтик» (Северное Приладожье) со следующими вариантами значений параметров «множитель по глубине» и «экспонента при  $z$ »: 1 и 0, 1 и 3, 3 и 1, 3 и 3. На разрезах эффективной плотности видно, что при значениях параметров, равных соответственно 0 и 1, высококонтрастные источники распространены

**Рис. 2.** Сейсмический разрез по профилю ГСЗ «Балтик» (А) и сечения 3D распределений эффективной плотности при задании различных величин для параметров «множитель по глубине» и «экспонента при  $z$ »: 1, 0 (В); 1,3 (С); 3, 1 (D); 3, 3 (Е)

Fig. 2. Cross sections of 3D distributions of effective density on the DSS "Baltic" profile when specifying different combinations of the parameters "depth factor" and "exponent at  $z$ ": 1, 0 (A); 1.3 (B); 3, 1 (C); 3, 3 (D)



1 — тектонические нарушения      1 — tectonic disturbance  
 2 — сейсмические границы      2 — seismic horizons  
 3 — скорость  $V_p$                       3 — speed  $V_p$



ны по всей глубине. При этом наблюдается сильная плотностная неоднородность пород нижней коры и верхней мантии. При увеличении значений задаваемых параметров (соответственно равных 1 и 3, 3 и 1, 3 и 3), получаемые аномалии эффективной плотности поджимаются кверху, а интенсивность эффективной плотности источников падает. Это приводит к более однородному распределению плотности в нижней части земной коры и разумным пределам изменения плотности в целом по разрезу.

Проанализировав эти разрезы совместно с сейсмическими границами, полученными по данным ГСЗ (рис. 2), можно отметить, что оптимальным выбором величины параметров «множитель по глубине» и «экспонента при z» является вариант со значениями соответственно 3 и 1. Отметим, что неплохое согласование с глубинами сейсмических границ дает и вариант с параметрами 3 и 3.

В указанных вариантах расчета сейсмические границы хорошо согласуются с границами плотностных неоднородностей. Видно, что наиболее контрастные плотностные неоднородности расположены в верхней коре до поверхности К1 с учетом резкого погружения этой границы на север.

В нижней же части земной коры и верхней мантии в этих вариантах картируются крупные блоки, скачок плотности между которыми достаточно умеренный и согласуется с сейсмическими и общегеологическими данными о распределении скоростей и составе пород в нижних частях земной коры.

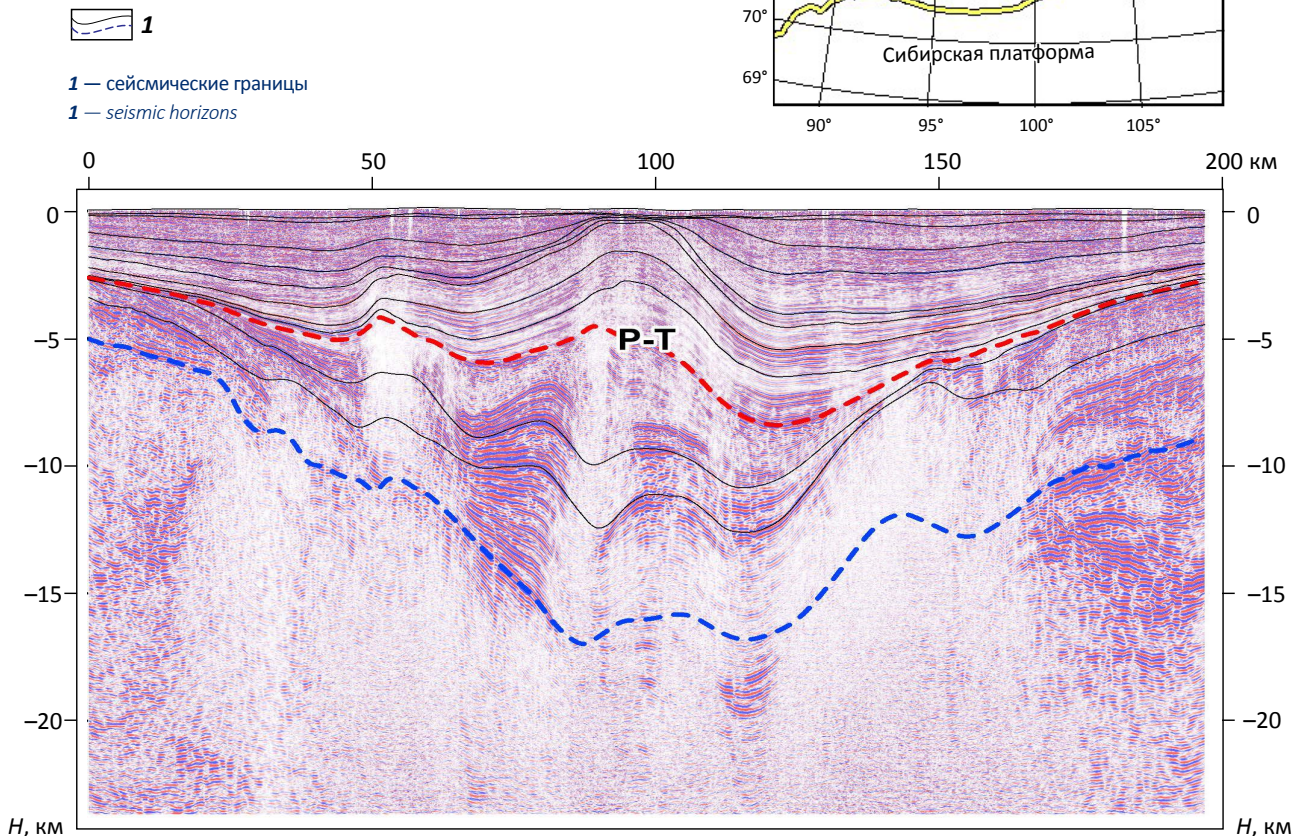
Аналогичный анализ был проведен для сейсмических разрезов ГСЗ по профилям, расположенным в некоторых других регионах. Оказалось, что оптимальные параметры решения обратной задачи равные 3 и 1, (а также 3 и 3), определенные для профиля ГСЗ «Балтик» устойчиво приводят к интерпретируемым вариантам плотностного разреза и в случае других регионов.

Интересно было проанализировать варианты решения 3D обратной задачи, полученные при разных значениях параметров совместно с сейсмическими данными МОВ ОГТ, которые, помимо отслеживаемых картируемых сейсмических границ, отражают особенности структуры земной коры.

На рис. 3. приведен сейсмический разрез по одному из сейсмических профилей (601), пересекающему Енисей-Хатангский прогиб. Видно, что на разрезе наряду с сейсмическими границами,

Рис. 3. Сейсмический разрез по профилю 601, пересекающему Енисей-Хатангский прогиб

Fig. 3. Seismic section along the profile 601 crossing the Yenisei-Khatanga trough



картирующими слои осадочной толщи прогиба, выделяются почти «прозрачные» области с малым количеством отражений и области с повышенной контрастностью. Основные аномалообразующие объекты в этом районе приурочены к кристаллическому фундаменту, однако и осадочную толщу пронизывает большое количество интрузивных образований основного/ультраосновного и кислого состава, не выходящих за пределы отложений верхнего триаса — юры. Пермо-триасовые траппы в прогибе сохранились лишь в наиболее прогнуженных местах, а в пределах валлообразных поднятий были подвергнуты предъюрскому региональному размыву.

Разрезы эффективной плотности по этому профилю (до глубины 25 км), полученные для вариантов решения обратной задачи с разной величиной параметров «множитель по глубине» и «экспонента при z», характеризуются, как и в случае профиля ГСЗ «Балтик», различным положением и интенсивностью аномалообразующих источников (рис. 4). На первый взгляд кажется, что, в той или иной мере, каждый из них находит свое отражение в положении многочисленных границ сейсмического разреза. Однако, при более внимательном анализе этих вариантов совместно с «структурой» глубинного сейсмического разреза оказывается, что наиболее интерпретируемым также является вариант решения обратной задачи с параметрами 3, 1 (рис. 5 А).

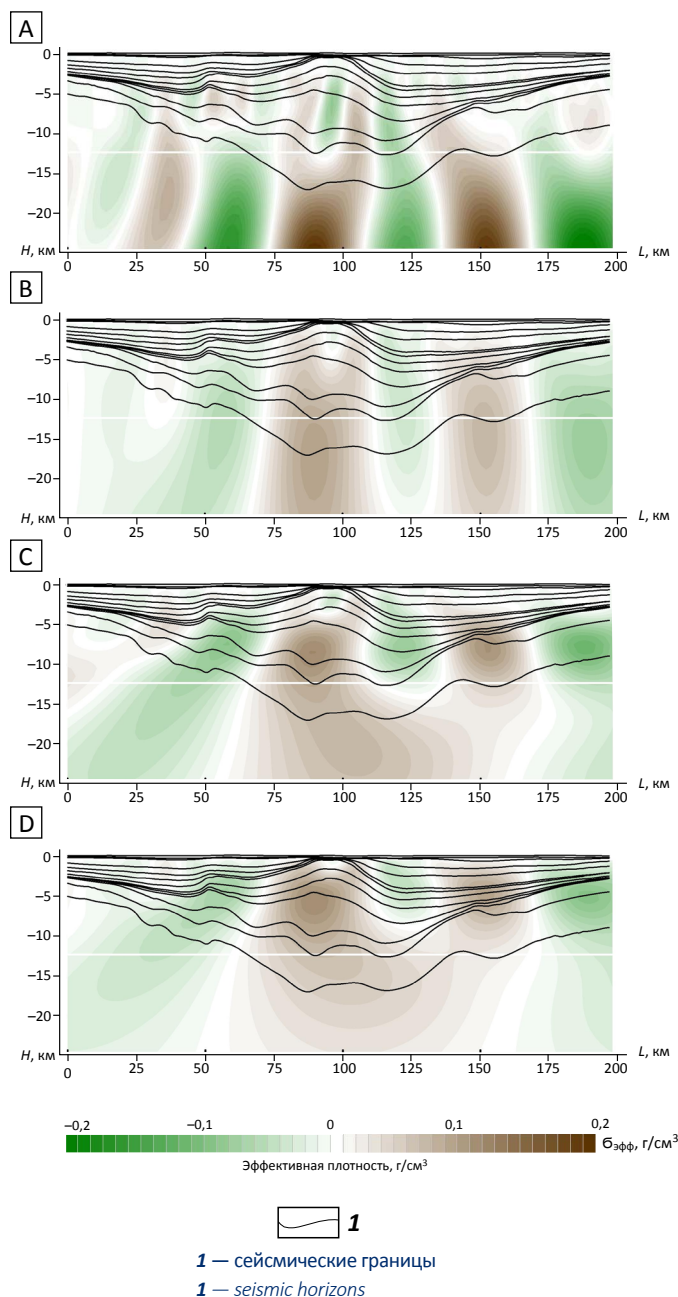
С одной стороны, на нем плотностные неоднородности хорошо ограничиваются сейсмическими границами кровли перми-триаса (Р-Т) и фундамента, а с другой стороны, положительные и отрицательные аномалии плотностного разреза совмещаются с «прозрачными» и «контрастными» участками сейсмического разреза, картирующими интрузивные тела разного состава. Таким образом, положение аномалий эффективной плотности для этого варианта решения обратной задачи вполне согласуется с данными о распространении магматизма в разрезе Енисей–Хатангского прогиба. Повышение плотности в низах центральной части разреза также согласуется с представлениями о базификации земной коры под наиболее прогнутой частью прогиба.

Для сравнения на рис.5 В приведен другой вариант, где сейсмический разрез совмещен с сечением 3D распределения эффективной плотности, полученным при решении обратной задачи с параметрами «множитель по глубине» и «экспонента при z», равными соответственно 3 и 3. Видно, как в восточной части разреза область повышенной плотности, вероятно связанная с проявлениями основного и ультраосновного магматизма, существенно поднялась выше границы отложений перми-триаса. А вверху центральной части за счет поднятия источников в этом варианте решения обратной задачи практически исчезли области повышенной плотности, обрамляющие валлообразное поднятие и связанные с внедрением даек основного и ультраосновного состава.

Таким образом, сопоставление вариантов решения 3D обратной задачи гравиразведки мето-

**Рис. 4.** Сечения 3D распределений эффективной плотности по профилю 601, пересекающему Енисей–Хатангский прогиб, при задании различных сочетаний величины параметров «множитель по глубине» и «экспонента при z»: 1, 0 (А); 1, 3 (В); 3, 1 (С); 3, 3 (D)

*Fig. 4. Cross Sections of 3D effective density distributions along the profile 601 crossing the Yenisei–Khatanga trough, when setting various combinations of the parameters "depth multiplier" and "exponent at z": 1, 0 (A); 1, 3 (B); 3, 1 (C); 3, 3 (D)*

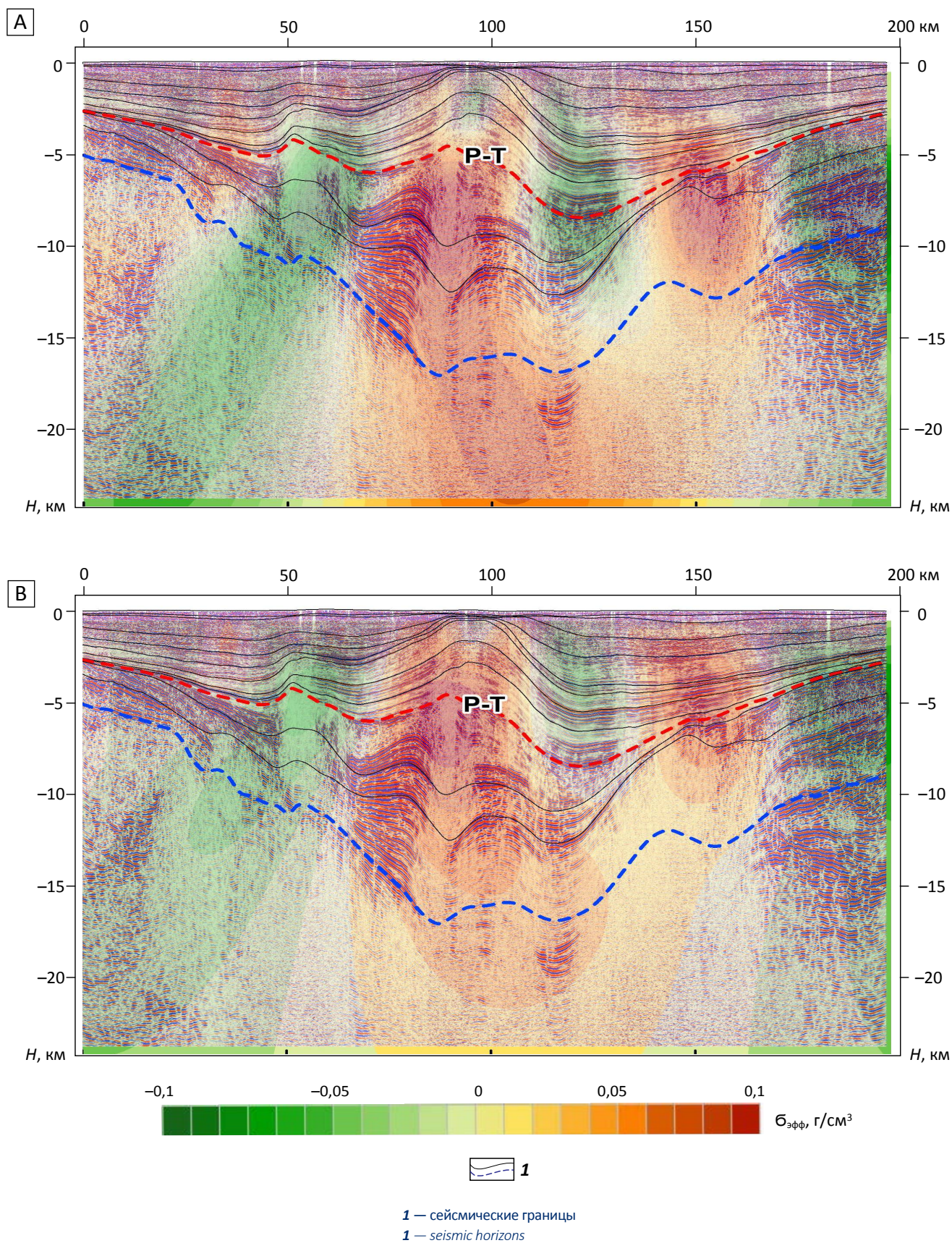


дом дискретного преобразования Фурье с разной величиной задаваемых параметров «множитель по глубине» и «экспонента при z» с сейсмическими разрезами, полученными как по профилям ГСЗ, так и МОВ ОГТ, позволило рекомендовать задание их равными соответственно 3 и 1. Такие параметры показали свою оптимальность в разных регионах при изучении как всей толщи земной коры, так и ее верхней части.



**Рис. 5.** Сопоставление сейсмического разреза по профилю 601 с разрезами эффективной плотности, полученными при решении обратной задачи гравиразведки с параметрами: А — 3 и 1; В — 3 и 3

*Fig. 5.* Comparison of the seismic section on the profile 601 with the sections of the effective density obtained by solving the inverse problem of gravity exploration with the parameters: А — 3 and 1; В — 3 and 3



## Литература

1. Мицын С.В. О численной реализации спектрального метода решения обратной задачи гравиразведки // Геоинформатика. – 2018. – № 3. – С. 89–97.
2. Кобрунов А.И., Варфоломеев В.А. Об одном методе  $\epsilon$ -эквивалентных перераспределений и его использовании при интерпретации гравитационных полей // Физика Земли. – 1981. – № 10. – С. 25–44.
3. Пиманова Н.Н., Спиридонов В.А., Шаров Н.В., Мицын С.В. Трехмерное плотностное моделирование земной коры юго-восточной части Фенно-Скандинавского щита в ГИС INTEGR0 // Геоинформатика. – 2019. – № 1. – С. 24–35.
4. Приезжев И.И. Построение распределений физических параметров среды по данным гравиразведки, магнитометрии и сейсмо-разведки // Геофизика. – 2005. – № 3. – С. 46–51.
5. Спиридонов В.А., Пиманова Н.Н., Финкельштейн М.Я. Технология построения плотностной 3D-модели земной коры в ГИС INTEGR0 // Геоинформатика. – 2020. – № 4. – С. 38–51.

## References

1. Mitsyn S.V. On numeric implementation of spectral method of gravimetry inverse problem. *Geoinformatika*. 2018;3:89–97 [In Russian].
2. Kobrunov A.I., Varfolomeev V.A. On a method of  $\epsilon$ -equivalent redistributions and its use in the interpretation of gravitational fields. *Physics of the Solid Earth*. 1981;10:25–44 [In Russian].
3. Pimanova N.N., Spiridonov V.A., Sharov N.V., Mitsyn S.V. 3D density crustal modeling for the south-eastern FENNOSCANDIAN shield with a help of GIS INTEGR0. *Geoinformatika*. 2019;1:24–35 [In Russian].
4. Priezhev I.I. Construction of distributions of physical parameters of the environment based on gravity, magnetometry, and seismic data. *The Russian Geophysics Journal*. 2005;3:46–51 [In Russian].
5. Spiridonov V.A., Pimanova N.N., Finkelstein M.Ya. Technology for constructing a 3D density model of the Earth's crust in the INTEGR0 GIS. *Geoinformatika*. 2020;4:38–51 [In Russian].

## Информация об авторах

### Пиманова Надежда Николаевна

Кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Отделение Геоинформатики ФГБУ «ВНИГНИ»  
117105, Москва, Варшавское ш., д. 8  
E-mail: nadja@geosys.ru

### Спиридонов Виктор Альбертович

Кандидат технических наук,  
заведующий сектором компьютерных технологий  
3D-моделирования геолого-геофизических объектов  
Отделение Геоинформатики ФГБУ «ВНИГНИ»  
117105, Москва, Варшавское ш., д. 8  
E-mail: victor@geosys.ru  
ORCID ID: 0000-0002-9421-555X

## Information about authors

### Nadezhda N. Pimanova

Candidate of Technical Sciences,  
Leading Researcher  
Division of Geoinformatics,  
FSBI «All-Russian Research Geological Oil Institute»  
8 Varshavskoye sh., Moscow, 117105, Russia  
E-mail: nadja@geosys.ru.

### Viktor A. Spiridonov

Candidate of Technical Sciences,  
Head of Sector of computer technologies for 3D modeling  
of geological and geophysical objects  
Division of Geoinformatics,  
FSBI «All-Russian Research Geological Oil Institute»  
8 Varshavskoye sh., Moscow, 117105, Russia  
E-mail: victor@geosys.ru  
ORCID ID: 0000-0002-9421-555X