



ВЛИЯНИЕ СЕЙСМОПЛОТНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХОВ МАНТИИ ПО ПРОФИЛЮ 1-СБ

Р.А. Бакеев, Ю.П. Стефанов, Е.А. Мельник[✉], В.Д. Суворов, Е.В. Павлов, А.С. Сальников

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

[✉]MelnikEA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6509-623X>

Аннотация. С использованием результатов сейсмоденситостного моделирования по профилю 1-СБ численно исследовано напряженно-деформированное состояние, возникающее под действием сил гравитации в земной коре Байкальской складчатой области. Показано, что основную роль в формировании неоднородностей напряженного состояния и его аномалий играют вариации мощности и глубины залегания слоев пород с разными физико-механическими свойствами.

Ключевые слова: упругопластическая деформация, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, сейсмический профиль 1-СБ

Финансирование: работа была выполнена в рамках государственного задания FWZZ-2022-0021 «Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики».

Для цитирования: Бакеев Р.А., Стефанов Ю.П., Мельник Е.А., Суворов В.Д., Павлов Е.В., Сальников А.С. Влияние сейсмоденситостных неоднородностей на напряженно-деформированное состояние земной коры и верхов мантии по профилю 1-СБ // Геофизические технологии. 2025. № 4. С. 30–41. doi:10.18303/2619-1563-2025-4-30.

THE EFFECT OF SEISMIC DENSITY IRREGULARITIES ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THE EARTH'S CRUST AND MANTLE TOPS ALONG THE PROFILE 1-SB

R.A. Bakeev, Yu.P. Stefanov, E.A. Melnik[✉], V.D. Suvorov, E.V. Pavlov, A.S. Salnikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

[✉]MelnikEA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6509-623X>

Abstract. Using the results of seismic density modeling on the 1-SB profile, the stress-strain state arising under the influence of gravity forces in the Earth's crust of the Baikal folded region was numerically studied. It has been shown that the main role in the formation of inhomogeneities of the stressed state and its anomalies is played by variations in the thickness and depth of layers of rocks with different physical and mechanical properties.

Keywords: elastic-plastic deformation, numerical modeling, stress-strain state, 1-SB seismic profile

Funding: The study was carried out within the framework of the project No. FWZZ-2022-0021 "Regional structure features of the Earth's crust and upper mantle of platform and folded areas of Siberia, their stress-strain state according to seismological, gravimetric and geomechanical data".

For citation: Bakeev R.A., Stefanov Yu.P., Melnik E.A., Suvorov V.D., Pavlov E.V., Salnikov A.S. The effect of seismic density irregularities on the stress-strain state of the Earth's crust and mantle tops along the profile 1-SB // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 4. P. 30–41. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-4-30.

ВВЕДЕНИЕ

В работе используются данные глубинных сейсмических зондирований вдоль профиля 1-СБ, длиной 1450 км, входящего в систему опорных региональных геофизических профилей Российской Федерации и протягивающегося в меридиональном направлении, пересекающего северную часть Центрально-Азиатского складчатого пояса с выходом на Сибирский кратон [Мельник, Суворов, 2018] (рис. 1). Расчет напряженного состояния осуществлялся в рамках упругопластической постановки.

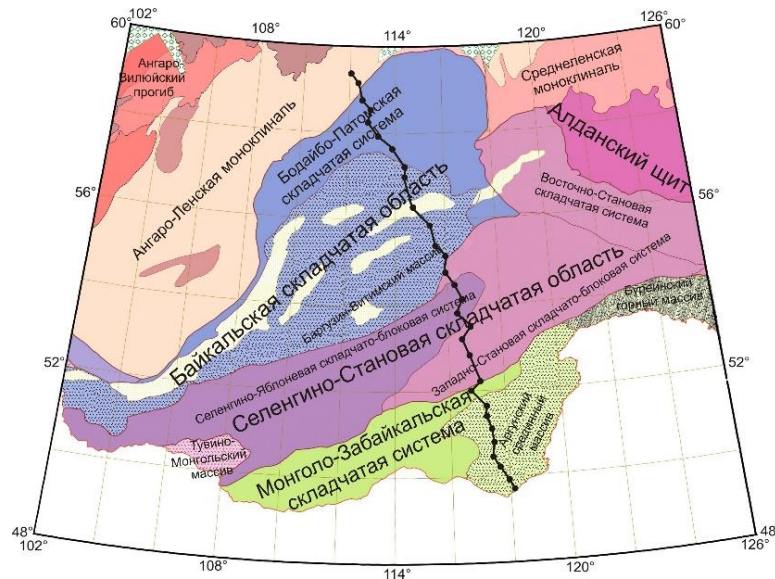


Рис. 1. Схема наблюдений ГСЗ (пункты взрыва – черные кружки) на фрагменте цифровой тектонической (геолого-структурной) карты России (2003 г.).

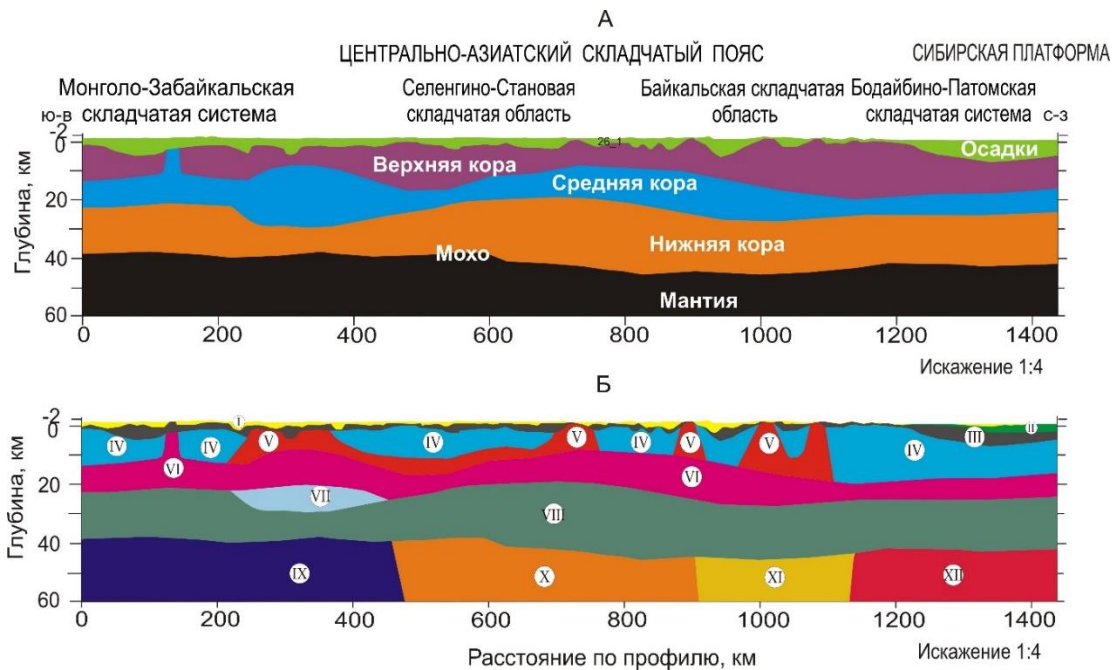


Рис. 2. Генерализованная сейсмоденситивная модель строения земной коры и верхов мантии по профилю 1-СБ (А) и геомеханическая модель с нумерованными блоками неоднородностей (Б), см. табл. 1.

На рисунке 2 показана генерализованная сейсмоплотностная модель строения земной коры и верхов мантии, где цветом выделены осадки, верхний, средний и нижний слой коры, а также верхняя часть мантии.

В соответствии с такой геометрией каждый блок имеет свои упругие и прочностные характеристики, представленные в табл. 1. Кроме того, согласно представлениям о распределении реологических свойств [Гольдин и др., 2006; Ребецкий, 2007; Вигон, 2011], были учтены изменения прочности с глубиной в выделенных интервалах ее роста и снижения. Заметим, что использование упругопластической модели означает мгновенное ограничение интенсивности касательных напряжений значением эффективной прочности τ^* (11), тогда как вязкой реологии соответствует время релаксации. Очевидно, что в случае квазистационарного процесса различия исчезают. Графики зависимости прочности с глубиной для трех вертикальных сечений представлены на рис. 3.

Таблица 1

Параметры модели по блокам

Блоки		Плотность ρ , г/см ³	Модуль сжатия, K , ГПа	Модуль сдвига, ГПа	γ , МПа	α
I	Осадки	2.36	0.293	0.205	5	0.4
II		2.59	0.376	0.264	25	0.5
III		2.69	0.496	0.33	25	0.5
IV	Верхняя кора	2.75	0.528	0.346	30	0.35
V		2.76	0.573	0.366	40	0.4
VI	Средняя кора	2.78	0.6	0.377	50	0.4
VII		2.83	0.647	0.398	20	0.4
VIII	Нижняя кора	2.87	0.693	0.418	25	0.3
IX	Мантия	3.48	1.299	0.867	50	0.5
X		3.36	1.232	0.771	50	0.4
XI		3.21	1.124	0.66	50	0.4
XII		3.34	1.208	0.737	10	0.4

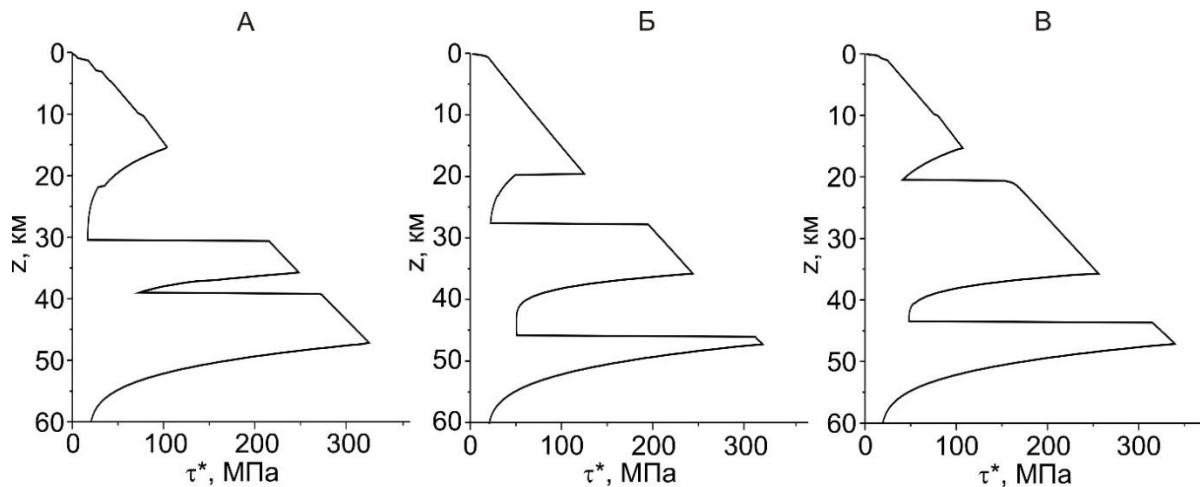


Рис. 3. Графики изменения прочности τ^* с глубиной вдоль профиля на отметках: 350 км (А), 725 км (Б), 1100 км (В).

Для получения наиболее полного представления о напряженном состоянии, возникающем в рассмотренной области земной коры под действием гравитации, были выполнены расчеты для упругой и упруго-псевдопластической моделей. В упругом случае параметры, характеризующие прочность среды, были приняты достаточно большими, чтобы предел прочности не достигался.

Неоднородное распределение напряжений является следствием неоднородности вещественного состава с различными механическими характеристиками. В упругом случае в значения вертикальной компоненты напряжений наибольший вклад вносят параметры плотности и криволинейность границ раздела. На горизонтальную компоненту дополнительное влияние оказывает коэффициент Пуассона. В упруго-псевдопластической модели значительное влияние оказывает необратимая деформация, изменение которой определяется прочностью. Построенные распределения таких параметров позволяют выявить области повышенных и пониженных напряжений, определяющих зоны возможного развития деформационных процессов в соответствии со структурой изучаемой области.

Неоднородность исследуемой области, наряду с ее геометрией и нагрузкой, определяет характер распределения напряжений. При огромной разнице напряжений вблизи поверхности и на глубине десятков километров такая неоднородность оказывается слишком малой для визуального восприятия. Поэтому аномалии напряженного состояния представляются в виде разности между их значениями в каждой расчетной точке области и реперной величине на правой границе профиля, относящейся к Сибирской платформе: $\bar{A}(i, j) = A(i, j) - A(n, j)$.

Для представления некоторых результатов рассчитывались послойные аномалии в виде отклонения значений параметров состояния в каждой расчетной ячейке от их средней величины на заданной глубине, т. е. $\bar{A}(i, j) = A(i, j) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A(i, j)$, $A(i, j)$ – значение параметра в ячейках (i, j) , n – количество расчетных ячеек вдоль профиля.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Расчет напряженно-деформированного состояния фрагмента земной коры и верхов мантии выполнен с помощью численного моделирования. Для этого решалась система уравнений механики для исследуемой области земной коры с учетом неоднородности ее строения. Система уравнений содержит уравнения движения и неразрывности, которая замыкается определяющими соотношениями упруго-псевдопластической среды:

$$\sigma_{ij,j} + \rho F_i = \rho \frac{du_i}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho u_{i,j} = 0, \quad (2)$$

где ρ – плотность среды, u_i – компоненты вектора скорости, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, F_i – массовые силы. Скорость деформации определяется соотношениями:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (3)$$

Предполагая, что скорости деформации состоят из суммы упругой и псевдопластической части, запишем:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p. \quad (4)$$

Такое разложение в рамках механических аналогий означает последовательное соединение упругого и псевдопластического элементов. В этом случае уравнение упругости можно записать в форме

$$\dot{\sigma}_{ij} = \lambda(\dot{\theta} - \dot{\theta}^p)\delta_{ij} + 2\mu(\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^p), \quad (5)$$

где λ и μ – коэффициенты Ламе, σ_{ij} и $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компоненты тензора напряжений и тензора скорости деформаций, $\dot{\theta} = \dot{\varepsilon}_{kk}$ – скорость объемной деформации, δ_{ij} – символ Кронекера.

Для осуществления расчетов соотношения для давления (среднего напряжения) и девиатора напряжений записываются отдельными уравнениями, поэтому воспользуемся разложением тензоров напряжений и деформаций на шаровую и девиаторную части:

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + s_{ij}, \quad (6)$$

где $P = -\sigma_{kk}/3$ – среднее давление; s_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений.

Уравнения для расчета напряжений запишем в форме гипопругости:

$$\frac{Ds_{ij}}{Dt} = 2\mu \left(\dot{\varepsilon}_{ij}^e - \frac{1}{3}\dot{\varepsilon}_{kk}^e \delta_{ij} \right), \quad (7)$$

$$\frac{Ds_{ij}}{Dt} = \dot{s}_{ij} - s_{ik}\dot{\omega}_{jk} - s_{jk}\dot{\omega}_{ik},$$

$$\dot{P} = -K\frac{\dot{V}}{V}, \quad (8)$$

где K и μ – модули сжатия и сдвига. Уравнения гипопругости необходимы для учета деформации и поворота ячеек расчетной сетки при переходе от одного к другому шагу расчетов. Для этого будем использовать производную Яумана. Скорости поворота $\dot{\omega}_{ij}$ определяются при помощи уравнения

$$\dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} - u_{j,i}). \quad (9)$$

В качестве условия развития необратимой деформации будем использовать уравнение модели Друккера–Прагера [Николаевский, 1971; Друккер, Прагер, 1975; Стефанов, 2002]:

$$f = \tau - \alpha P - Y, \quad (10)$$

где Y и α – параметры модели, которые имеют смысл аналогичный когезии и внутреннего трения, $\tau = (s_{ij}s_{ij}/2)^{1/2}$ – интенсивность касательных напряжений (второй инвариант девиатора напряжений). Соответственно, эффективная прочность среды определяется выражением:

$$\tau^* = \alpha P + Y. \quad (11)$$

Приращения компонент тензора псевдопластической деформации определялись с помощью соотношения теории пластического течения:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (12)$$

где $g(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0$ – пластический потенциал, $d\lambda$ определяется в ходе деформирования из условия пластичности. Неассоциированный закон течения, который используется для расчета необратимой деформации горных пород, предполагает наличие независимого уравнения пластического потенциала и, соответственно, дополнительного параметра, описывающего дилатансию среды. Наиболее простой и удобной формой для пластического потенциала является уравнение

$$g = \tau - \beta p, \quad (13)$$

где β – коэффициент дилатансии. Выражение для расчета приращений необратимой деформации при использовании такого уравнения можно записать в виде:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \left(\beta \delta_{ij} + \frac{s_{ij}}{2\tau} \right). \quad (14)$$

Таким образом, для расчета напряженно-деформированного состояния за пределом упругости используется неассоциированный закон течения, как было предложено в работе [Николаевский, 1971]. Развитие и варианты применения данного закона были рассмотрены в статьях [Николаевский, 1971; Vermeer, de Borst, 1984; Гарагаш, Николаевский, 1989; Стефанов, 2002].

Система уравнений решается с помощью конечно-разностного метода второго порядка [Wilkins, 1999]. Некоторые особенности используемого подхода численного моделирования и алгоритмы расчета напряженно-деформированного состояния при развитии необратимой псевдопластической деформации изложены в работах [Стефанов, 2002; Stefanov et al., 2011; Стефанов, Бакеев, 2015]. Расчеты осуществлялись в 2D постановке плоской деформации. Граничными условиями являлись отсутствие вертикальных перемещений на нижней границе, горизонтальных перемещений на боковых границах и отсутствие напряжений на верхней свободной поверхности. На внутренних границах раздела сред использовались условия полного механического контакта, означающие непрерывность смещений и напряжений. Начальные условия соответствовали ненапряженному и недеформированному состоянию.

При моделировании использовано принятое в механике правило знаков, при котором отрицательные напряжения соответствуют сжатию, а положительные – растяжению. При расчете давления предполагается знак минус, следовательно, для давления положительные значения соответствуют сжатию, а отрицательные – растяжению.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХОВ МАНТИИ ПО ПРОФИЛЮ 1-СБ

Рассмотрим напряженное состояние, возникающее под действием гравитации при упругом поведении слоисто-однородной модели среды, показанной на рис. 4 в виде послойных отклонений от средних значений.

В распределении остаточного давления наиболее низкий уровень его значений (около $-(10-15$ МПа) присутствует во всех слоях коры на участке Сибирской платформы, начиная с отметки примерно 1150 км, а наиболее повышенный до $+(5-10$ МПа) на участке Монголо-Забайкальской складчатой системы (0–200 км, рис. 2, А, 4, А). Такое распределение давления неизбежно найдет отражение в прочности пород, в соответствии с ее эффективными значениями. Наибольший интерес представляет горизонтальная компонента напряжений, т.к. ее пониженный уровень означает наименьшее горизонтальное сжатие (рис. 4, Б). Выделяются аномалии напряженного состояния вблизи послойных границ, в первую очередь в областях повышения и понижения глубины границ раздела, изменения

мощности слоев. Можно отметить, что наиболее обширные области во всех слоях коры с положительными значениями (красный цвет) возникают под Байкальской складчатой областью с отметки около 900 км на профиле. В этой зоне вертикальные напряжения также минимальны в мантии, как и на правом фланге с отметки 1200 км по всей глубине (рис. 4, В).

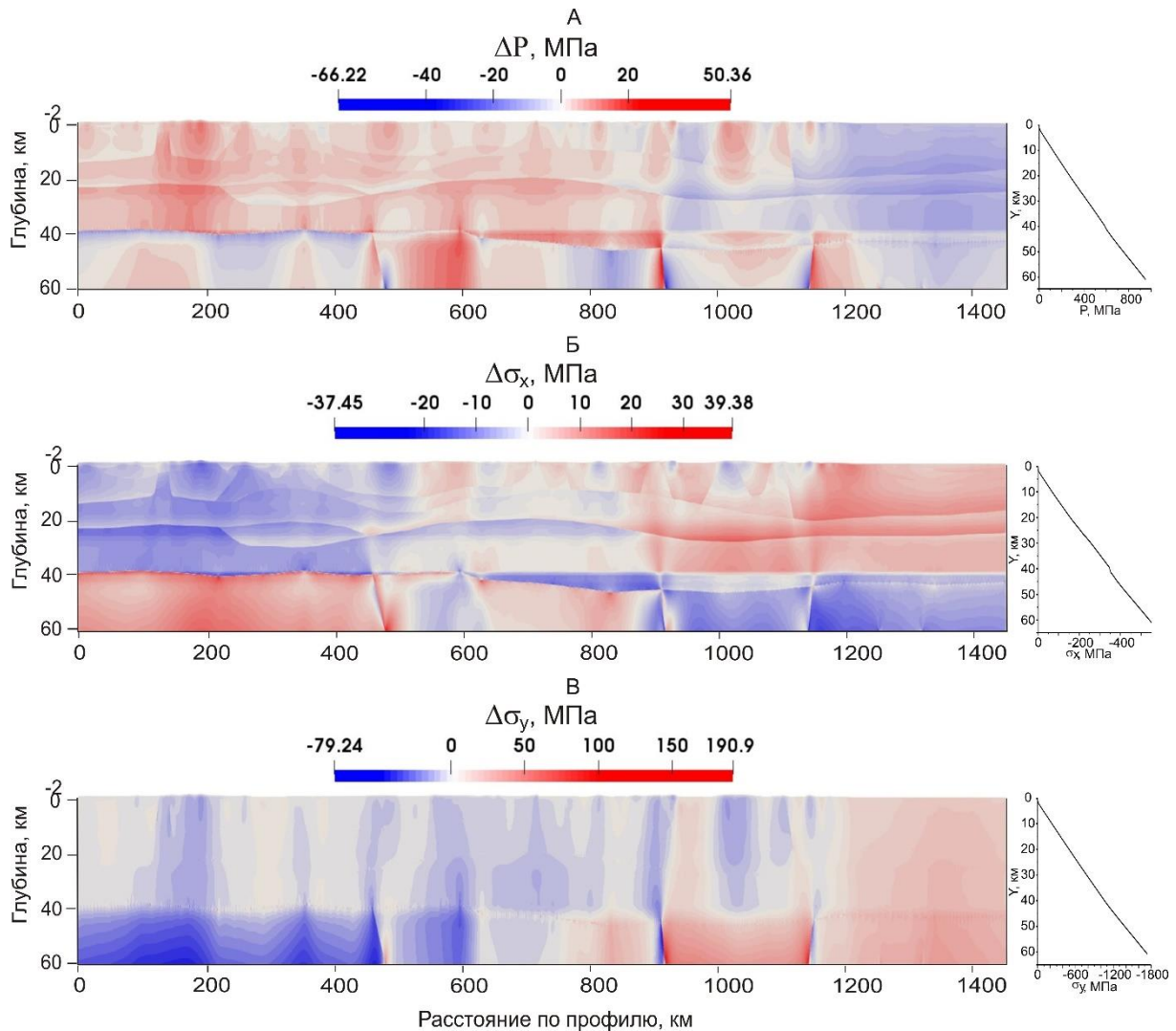


Рис. 4. Распределения послонных аномалий среднего давления (А), горизонтальной (Б) и вертикальной (В) компонент напряжений при упругой постановке. Справа показаны графики изменения средних напряжений с глубиной.

При учете возможности развития необратимой деформации конфигурация зон несколько изменилась (рис. 5). Данные распределения представлены в виде отклонений значений параметров относительно правой границы профиля, соответствующей Сибирской платформе.

Резко проявилось влияние рельефа межслойных границ. В зонах выпуклостей, с их минимальной глубиной, выделяется пониженный уровень давления и, соответственно, повышенный уровень горизонтальной компоненты сжимающих напряжений. В противоположность, в зонах вогнутостей межслойных границ с повышенной глубиной, наблюдается пониженное сжатие как по давлению, так и по горизонтальной компоненте напряжений. При этом область с минимальным сжатием, охватывающим все глубины, расположена в окрестности Муйской впадины на участке 900–1100 км, расширяясь с глубиной до отметок от 750 до 1100 км в мантии (см. рис. 5, Б). Таким образом, расположение наиболее

разреженной зоны близко к полученному в рамках упругой постановки задачи. Здесь же расположена область разрежения в мантии вертикальных напряжений. Пониженные вертикальные напряжения по всей глубине наблюдаются в области Бодайбино-Патомской складчатой системы (см. рис. 5, В). Необратимая деформация сосредоточена на участках пониженной прочности, соответствующих реологической расслоенности. Области с наибольшей необратимой деформацией расположены в первую очередь в межслоевых впадинах, областях с вогнутыми границами. Здесь можно выделить участок от 600 до 120 км, где имеется обширная область с необратимой деформацией в нижней коре (см. рис. 5, Г).

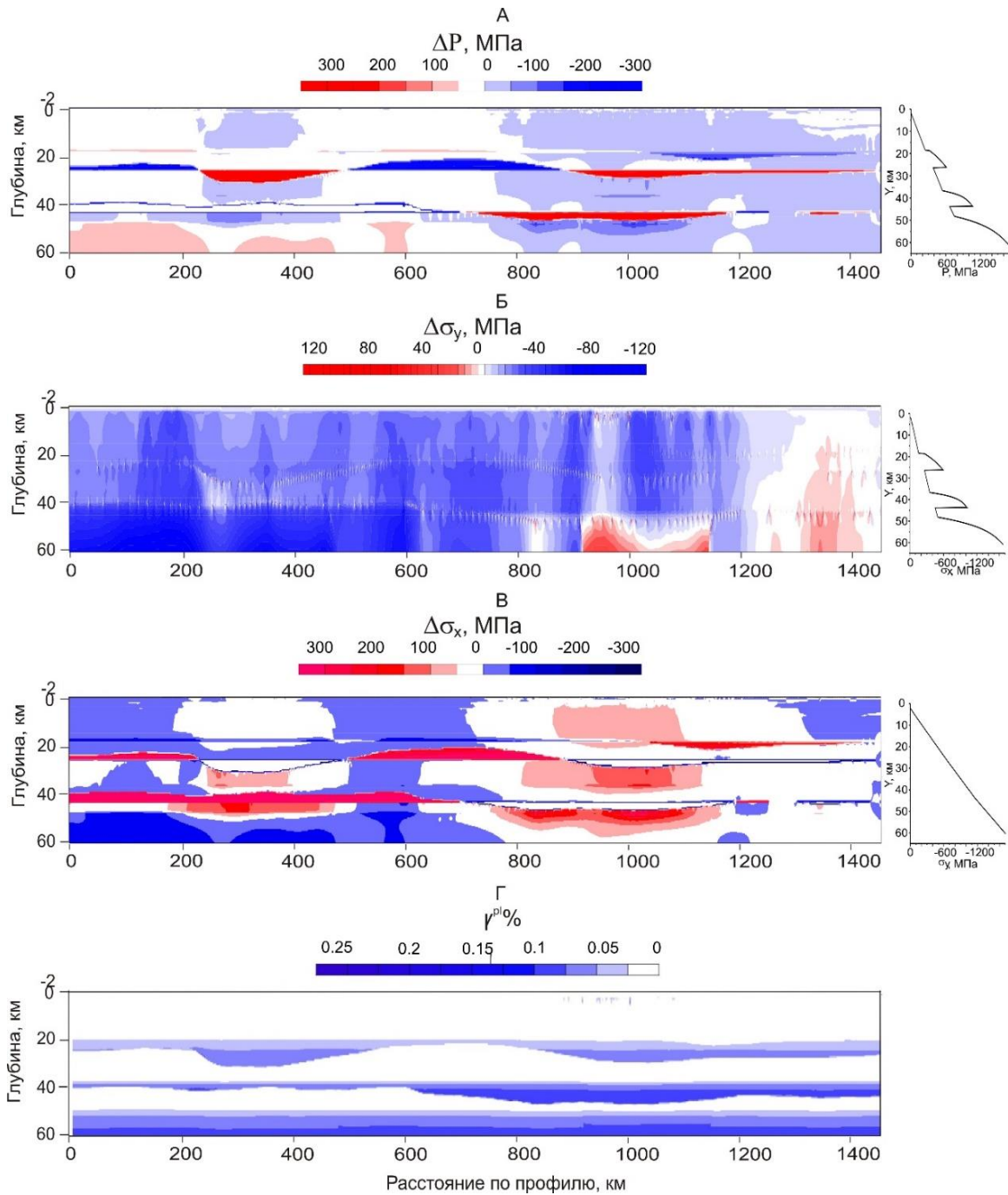


Рис. 5. Распределения аномалий относительно правой границы профиля среднего давления (А), горизонтальной (Б), вертикальной (В) компонент напряжений и необратимой деформации (Г) при гравитационной нагрузке. Справа показаны графики изменения напряжений с глубиной на реперной границе.

Таким образом, максимальные значения аномалий горизонтальной компоненты напряжений существенно превышают аномалии вертикальной компоненты. Зоны разрежения (красные) горизонтальных напряжений располагаются под Муйской впадиной Байкальской складчатой области во всех слоях наиболее прочных участков коры. Отличительной особенностью является наличие зоны разрежений, начиная с небольших глубин в верхней и средней коре. Положительные значения аномалий наблюдаются над нижней и верхней корой.

Наличие области пониженного уровня горизонтального сжатия соответствует сейсмичности региона. В этих зонах развиваются основные очаги необратимой деформации. Остальные зоны разрежения расположены на больших глубинах и сосредоточены на участках нижней коры и верхней части мантии. Выделяется участок на между 200 и 400 км профиля. Данные аномалии имеют большую величину и проявляются над границами Мохо и средней коры. Аномалии вертикальных напряжений расположены в мантии в области между Байкало-Муйской зоной и Бодайбо-Патомской системой, а также в области Сибирской платформы, начиная с глубины 15–20 км.

Таким образом, расчеты, проведенные как в упругой постановке, так и с учетом необратимой деформации, показывают, что наиболее критическим участком в плане развития необратимой деформации и разломообразования является область в районе Муйской впадины, которая имеет повышенную сейсмичность. Вариации аномалий вертикальных и горизонтальных напряжений над межслойными границами коры, рассчитанные относительно напряжений в конце профиля, показаны на рис. 6.

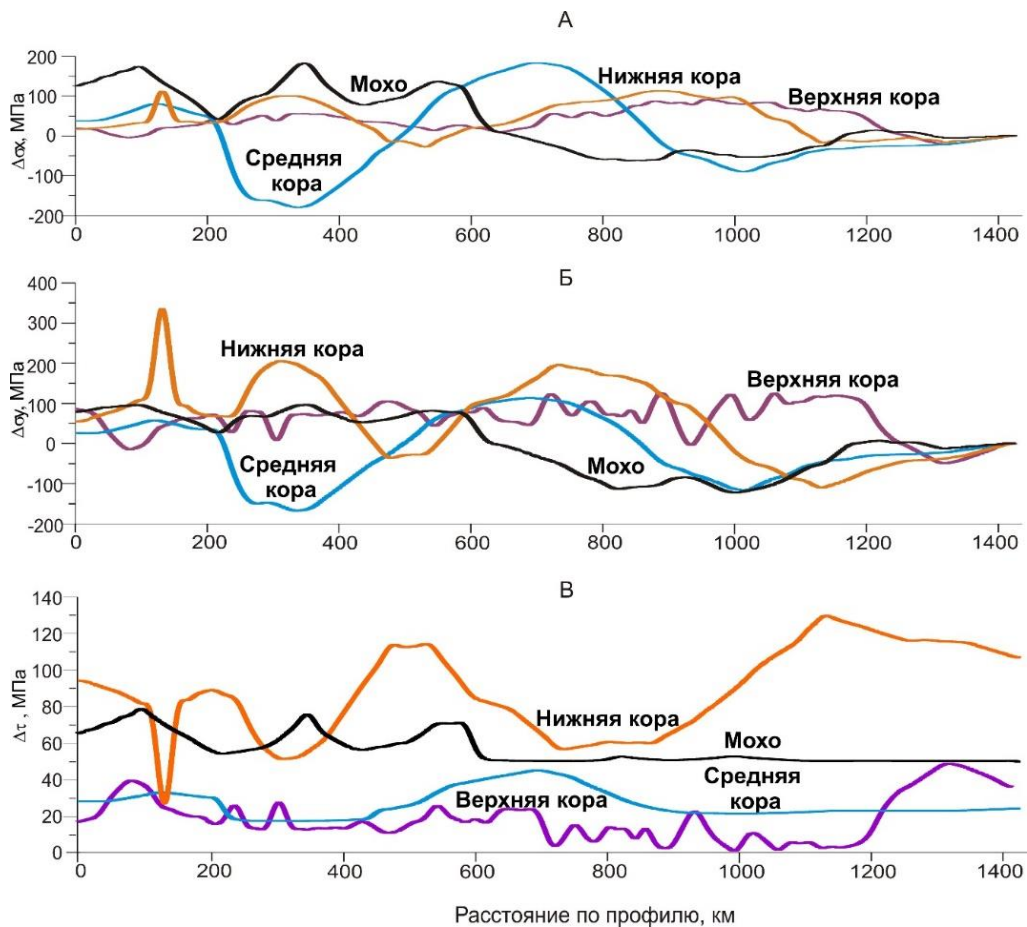


Рис. 6. Графики распределения аномалий горизонтальных (А), вертикальных (Б) напряжений над межслойными границами и интенсивности касательных напряжений (В).

Монголо-Забайкальская складчатая система и Селенгино-Становая складчатая область преимущественно находятся в статическом растягивающем напряженном состоянии, достигающим 200 МПа над средней корой и Мохо для горизонтальных и 340 МПа для вертикальных напряжений над нижней корой. В Байкальской складчатой области горизонтальные напряжения в средней коре и на Мохо уменьшаются в районе Муйской впадины от 0 до –100 МПа. Схожее уменьшение значений, только уже для всей коры, характерно и для вертикальных напряжений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Силы гравитации играют ключевую роль в формировании напряженно-деформированного состояния. При недостатке данных о тектонических силах анализ напряжений, обусловленных гравитацией, становится первостепенным этапом исследования. Изучение того, как неоднородность строения и свойств среды влияет на распределение напряжений, дает возможность оценить области с повышенными и пониженными напряжениями. Эта информация крайне важна для выявления потенциальных зон активного деформирования или для объяснения их существования, включая сейсмически активные участки.

С помощью численного моделирования показано, что Монголо-Забайкальская складчатая система и Селенгино-Становая складчатая область преимущественно находятся в статическом растягивающем напряженном состоянии, достигающим 200 МПа для горизонтальных и 340 МПа для вертикальных напряжений. В Байкальской складчатой области горизонтальные напряжения в средней коре и на Мохо уменьшаются в районе Муйской впадины от 0 до –100 МПа. Схожее уменьшение значений, только уже для всей коры, характерно и для вертикальных напряжений. Растягивающие статические напряжения Центрально-Азиатского складчатого пояса в сравнении с контрастными изменениями сжимающих и растягивающих напряжений в Байкальской складчатой области могут соответствовать сейсмичности Муйской впадины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Гарагаш И.А., Николаевский В.Н.** Неассоциированные законы течения и локализации пластической деформации // Успехи механики. 1989. Т. 12, № 1. С. 131–183.
- Гольдин С.В., Суворов В.Д., Макаров П.В., Стефанов Ю.П.** Структура и напряженно-деформированное состояние литосферы Байкальской рифтовой зоны в модели гравитационной неустойчивости // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 10. С. 1094–1105. EDN:KTWZCV.
- Друккер Д., Прагер В.** Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование // Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 2. Определяющие законы механики грунтов. М.: Мир, 1975. С. 166–177.
- Мельник Е.А., Суворов В.Д.** Восстановление структуры земной коры Забайкалья по данным глубинных сейсмических исследований // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12–2 (78). С. 92–97. doi:10.23670/IRJ.2018.78.12.054. EDN:YSUKKT.
- Николаевский В.Н.** Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучих сред // Прикладная математика и механика. 1971. Т. 35, № 6. С.1070–1082.
- Ребецкий Ю.Л.** Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.

Стефанов Ю.П. Локализация деформаций и нарушений в геоматериалах. Численное моделирование // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5, № 5. С. 107–118. EDN:KWOSH.N.

Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А. Формирование цветковых структур нарушений в слое геосреды при разрывном горизонтальном сдвиге основания // Физика Земли. 2015. № 4. С. 81–93. doi: 10.7868/S0002333715040110. EDN:TXUETJ.

Цифровая тектоническая (геолого-структурная) карта России. Масштаб 1:2 500 000. СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2003.

Burov E.B. Rheology and strength of the lithosphere // Marine and Petroleum Geology. 2011. Vol. 28 (8). P. 1402–1443. doi:10.1016/j.marpetgeo.2011.05.008.

Stefanov Yu P., Chertov M.A., Aidagulov G.R., Myasnikov A.V. Dynamics of inelastic deformation of porous rocks and formation of localized compaction zones studied by numerical modeling // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2011. Vol. 59 (11). P. 2323–2340. doi:10.1016/j.jmps.2011.08.002.

Vermeer P.A., de Borst R. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock // Heron. 1984. Vol. 29 (3). P. 1–64.

Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Springer-Verlag, Berlin, 1999. 260 p.

REFERENCES

Burov E.B. Rheology and strength of the lithosphere // Marine and Petroleum Geology. 2011. Vol. 28 (8). P. 1402–1443. doi:10.1016/j.marpetgeo.2011.05.008.

Digital tectonic (geological and structural) map of Russian federation. Scale 1:250 000 000. VSEGEI, St. Petersburg, 2003.

Drukker D., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Mechanics. New in foreign science. No. 2. Defining laws of soil mechanics (In Russ.). Mir, Moscow, 1975. P. 166–177.

Garagash I.A., Nikolaevsky V.N. Non-associated flow laws and localization of plastic deformation // Advances in Mechanics. 1989. Vol. 12 (1). P. 131–183. (In Russ.).

Gol'din S.V., Suvorov V.D., Makarov P.V., Stefanov Yu.P. An instability gravity model for the structure and stress-strain of the lithosphere in the Baikal rift // Russian Geology and Geophysics. 2006. Vol. 47 (10). P. 1090–1101.

Mel'nik E.A., Suvorov V.D. Restoration of structure of Earth crust of Transbaikal based on data of in-depth seismic researches // International Research Journal. 2018. No. 12–2 (78). P. 92–97. (In Russ.). doi: 10.23670/IRJ.2018.78.12.054.

Nikolaevskii V.N. Governing equations of plastic deformation of granular medium // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 1971. Vol. 35 (6). P. 1017–1029. doi:10.1016/0021-8928(71)90106-7.

Rebetsky Yu.L. Tectonic stresses and strength of nature rock (In Russ.). Akademkniga, Moscow, 2007. 406 p.

Stefanov Yu.P. Deformation localization and fracture in geomaterials. Numerical simulation // Physical Mesomechanics. 2002. Vol. 5 (5). P. 107–118. (In Russ.).

Stefanov Yu.P., Bakeev R.A. Formation of flower structures in a geological layer at a strike-slip displacement in the basement // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2015. No. 4. P. 535–547. EDN:UFAAWR. doi:10.1134/S1069351315040114.

Stefanov Yu P., Chertov M.A., Aidagulov G.R., Myasnikov A.V. Dynamics of inelastic deformation of porous rocks and formation of localized compaction zones studied by numerical modeling // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2011. Vol. 59 (11). P. 2323–2340. doi:10.1016/j.jmps.2011.08.002.

Vermeer P.A., de Borst R. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock // Heron. 1984. Vol. 29 (3). P. 1–64.

Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Springer-Verlag, Berlin, 1999. 260 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

БАКЕЕВ Рустам Альфредович – кандидат физико-математических наук, инженер лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: численное моделирование процессов деформации и разрушения твердых тел; BakeevRA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5367-9211>.

СТЕФАНОВ Юрий Павлович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: изучение процессов деформации горных пород, моделирование геомеханических процессов в земной коре, в том числе при разработке месторождений полезных ископаемых; StefanovYP@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2004-955X>.

МЕЛЬНИК Елена Александровна – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: региональное изучение земной коры и верхней мантии платформенных и складчатых областей Сибири методами активной сейсмики.

СУВОРОВ Владимир Дмитриевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: развитие методики обнаружения и описания закономерностей распределения сейсмоплотностных и геомеханических параметров, определяющих структурообразование в земной коре; SuvorovVD@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1724-3095>.

ПАВЛОВ Евгений Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: интерпретация гравитационных аномалий в приложении к задачам тектонического районирования и разведки полезных ископаемых; PavlovEV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3064-6879>.

САЛЬНИКОВ Александр Сергеевич – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: изучение структурно-скоростного строения земной коры и верхней мантии на опорных геолого-геофизических профилях Сибири и Дальнего Востока; SalnikovAS@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6938-9279>.

Статья поступила в редакцию 21 января 2026 г.,
одобрена после рецензирования 16 февраля 2026 г.,
принята к публикации 17 февраля 2026 г.