

Научная статья

УДК 539.3+551.24

doi: 10.17223/19988621/94/8

## Оценка напряженно-деформированного состояния участков литосферы и верхних слоев земной коры на территории Баженовской свиты на основе многоуровневого численного моделирования

Аян Ахметов<sup>1</sup>, Игорь Юрьевич Смолин<sup>2</sup>

*<sup>1, 2</sup> Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия*

*<sup>1</sup> ayan.akhmetov93@gmail.com*

*<sup>2</sup> smolin@ispms.ru*

**Аннотация.** Статья посвящена анализу напряженно-деформированного состояния участков литосферы и верхних слоев земной коры в нефтегазовых районах Западной Сибири. В качестве объектов исследования выбраны двумерные компьютерные модели структур нефтегазовых областей Баженовской свиты на основе геологического профиля «Рубин–2–1990». Для расчета распределений неупругой деформации и напряжений применена модель упругопластической среды Друкера–Прагера–Николаевского, для определения параметров которой использована модель напряженного состояния континентальной литосферы *cratonic jelly sandwich*. Показано, что зоны локализации пластической деформации и положительных значений горизонтальных напряжений соответствуют местоположениям ловушек углеводородов и залежей нефти и газа.

**Ключевые слова:** численное моделирование, Баженовская свита, упругопластическая среда, геологический профиль «Рубин–2–1990», литосфера, земная кора, напряженно-деформированное состояние

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-01086, <https://rscf.ru/project/23-71-01086/>

**Для цитирования:** Ахметов А., Смолин И.Ю. Оценка напряженно-деформированного состояния участков литосферы и верхних слоев земной коры на территории Баженовской свиты на основе многоуровневого численного моделирования // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 94. С. 93–108. doi: 10.17223/19988621/94/8

## Evaluation of the stress-strain state of the lithosphere sections and upper layers of Earth's crust in the Bazhenov Suite based on multi-scale numerical modeling

Ayan Akhmetov<sup>1</sup>, Igor' Yu. Smolin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

<sup>1</sup> *ayan.akhmetov93@gmail.com*

<sup>2</sup> *smolin@ispms.ru*

**Abstract.** This paper presents the results of multiscale numerical modeling of the stress-strain state of the lithosphere sections and upper crustal layers in one of the West Siberian Plate regions containing oil and gas deposits. Two-dimensional computer models of the structure of lithosphere sections and upper crustal layers of the Bazhenov Suite's oil and gas areas based on the Rubin–2–1990 geologic profile were selected as the objects of research. To calculate the inelastic deformation and stress fields in the lithosphere and crust, the model of elastic-plastic medium with Drucker-Prager-Nikolaevsky yield criterion and plastic potential was used. Constitutive equation parameters for the structurally inhomogeneous lithosphere were determined from the geologic profile data and the cratonic jelly sandwich strength model applicable to the continental lithosphere. Calculations at different scales show that zones of inelastic deformation localization and positive horizontal stresses are concentrated in the upper layers of Earth's crust, where faults and damages are located according to geophysical data. These areas correspond to the locations of hydrocarbon traps and oil and gas deposits in the Bazhenov Suite. The results of this study may be useful for geologists and geophysicists who study the processes of mineral formation in Earth's crust.

**Keywords:** numerical modeling, Bazhenov Suite, elastoplastic medium, "Rubin–2–1990" geological profile, lithosphere, Earth's crust, stress-strain state

**Acknowledgments:** This study was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-71-01086), <https://rscf.ru/en/project/23-71-01086/>

**For citation:** Akhmetov, A., Smolin, I.Yu. (2025) Evaluation of the stress-strain state of the lithosphere sections and upper layers of Earth's crust in the Bazhenov Suite based on multi-scale numerical modeling. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 94. pp. 93–108. doi: 10.17223/19988621/94/8

### Введение

В настоящее время одной из фундаментальных задач в науках о Земле является оценка деформационных процессов в литосфере. Структура земной коры и верхней мантии очень неоднородна из-за активных геодинамических процессов, которые постепенно изменяют облик Земли. Следствие данных процессов – возникновение землетрясений, оползней, обвалов и т.д., а также месторождений полезных ископаемых в определенных регионах [1]. Прогноз опасных геодинамических процессов с целью возможного предотвращения их губительных последствий, а также

условий образования ловушек углеводородов с целью выявления потенциальных областей их месторождений основан в том числе и на знании напряженно-деформированного состояния верхних слоев земной коры.

Современный уровень развития вычислительной техники, численных методов, физических представлений и моделей сделал возможным исследование напряженно-деформированного состояния участков литосферы с помощью компьютерного моделирования на разных масштабных уровнях. Можно отметить следующие достижения в развитии данного научного направления. На основе численного исследования напряженно-деформированного состояния земной коры на разных масштабных уровнях исследованы эволюции полей пластической деформации и напряжений в слоях земной коры, выполнено сопоставление зон локализации неупругой деформации и пониженного горного давления с местами расположения залежей нефти, газа и золота, тем самым представлены подтверждения одного из механизмов зарождения полезных ископаемых в слоях консолидированной земной коры [2, 3]. С развитием фундаментальных наук о Земле и накоплением экспериментальных данных на основе геолого-геофизических изысканий удалось создать теоретические представления о составе элементов литосферы, изучить механизмы возникновения и процессы развития сложных геотектонических процессов, таких как коллизия, спрединг, надвиги и растяжения. При этом активная компьютеризация получения численных и экспериментальных данных позволила детально и скрупулезно оценить физико-химические изменения структуры литосферы в ходе глобальных и локальных геодинамических процессов [4, 5].

Согласно современным представлениям геологии, наиболее вероятными местами для поиска залегающей нефти и газа видятся районы разломов, разрывов и поврежденностей в верхних слоях земной коры. Для выявления действительных месторождений углеводородов необходимо скомбинировать знания геологии, геофизики, тектонофизики и механики деформируемого твердого тела. Так, в работах Ю.П. Стефанова, Ю.Л. Ребецкого, М.С. Леонова представлены результаты разносторонних исследований возникновения крупных семейств разломов на разных участках земной коры, в которых с течением времени могут формироваться скопления полезных ископаемых в силу наличия пустот и ловушек [2, 3, 6, 7].

В условиях сложной геодинамической ситуации на территории Западно-Сибирской плиты выявлены крупные семейства разломов, новейшие структурные разрывы, в которых были найдены залежи нефти и газа. Особое место на территории Сибири занимает Баженовская свита, которая в настоящее время рассматривается как главный потенциальный источник трудноизвлекаемых нефтегазовых запасов [8–10]. Поэтому в качестве объекта исследования настоящей работы были выбраны регионы, относящиеся к Баженовской свите, на территории которых прогнозируются залежи нефти и газа. Заметим, что напряженно-деформированное состояние литосферы в этих регионах до сих пор детально не исследовано. В силу этого результаты изучения напряженно-деформированного состояния участков литосферы разной мощности в данном регионе имеют важное научно-техническое значение.

Для исследования структурно-неоднородных материалов и сред в последние десятилетия плодотворно применяется многоуровневый подход. Он позволяет изучить влияние особенностей иерархически организованной структуры различных конструкционных и функциональных материалов, а также геологических сред

на развитие процессов их неупругого деформирования и разрушения. Литосфера имеет сложную структуру, в которой кроме очевидных слоев земной коры и верхней мантии также выделяются блоки разных размеров. В связи с этим применение многоуровневого моделирования для такого объекта является предпочтительным.

Целью данной работы стала попытка выявления расположений ловушек углеводородов и залежей нефти и газа на основе анализа напряженно-деформированного состояния участков литосферы и верхних слоев земной коры вдоль геологического профиля «Рубин–2–1990» по результатам численного моделирования.

### Структурные модели геологических областей Западно-Сибирской плиты

На основе геолого-геофизических исследований на территории Сибири в годы позднего СССР были получены в том числе геофизические данные профиля «Рубин–2–1990», который проходит по интересующему нас региону [11]. На рис. 1 представлено расположение геологического профиля, а черным прямоугольником выделена область, в которой выявлены основные нефтегазовые залежи.

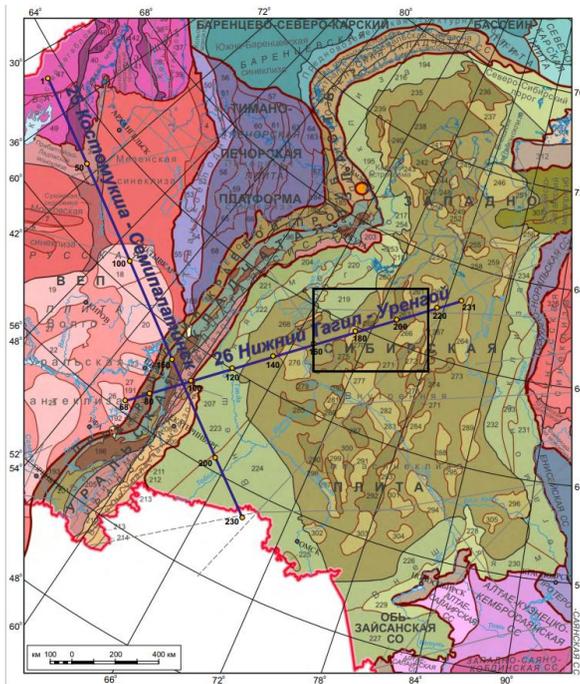
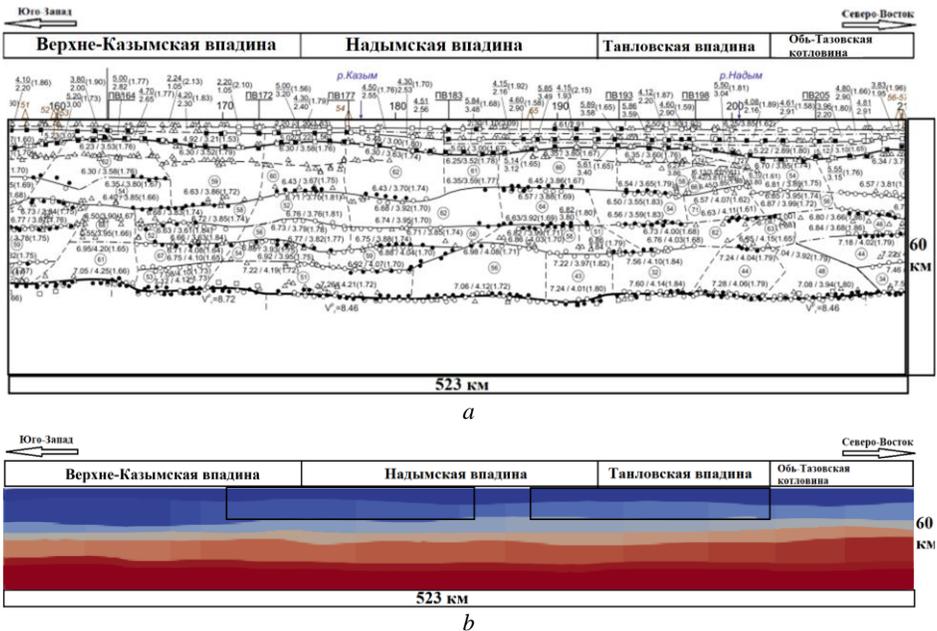


Рис. 1. Положение геологического профиля «Рубин–2–1990» на территории Западно-Сибирской плиты

Fig. 1. Location of the “Rubin–2–1990” geological profile in the West Siberian Plate

Для учета в расчетах блочно-слоистой структуры литосферы необходимо создать структурные модели исследуемых областей. В ходе выполнения государственного проекта в годы позднего СССР на территории Сибири крупными научными группами были исследованы глубинные структуры литосферы [12]. Результаты

этих исследований на территории Западно-Сибирской плиты позволяют строить компьютерные модели блочно-слоистой структуры элементов литосферы для выбранного геологического профиля. На рис. 2, *a* представлена часть геологического профиля «Рубин–2–1990» с такими геофизическими данными, как скорости продельных и поперечных волн, расположение границы кристаллического фундамента и границы Мохо, которая является границей раздела земной коры и мантии, геологические обозначение рек и т.д., необходимыми для создания компьютерных моделей глубинной геологической структуры выбранного региона [11]. На основе указанных геофизических данных для геологического профиля «Рубин–2–1990» была построена подробная слоисто-блочная компьютерная модель структуры участка литосферы, показанная на рис. 2, *b*, которая разделена на серию блоков с разными толщинами и физическими свойствами, объединенных в слои.



**Рис. 2.** Часть геологического профиля «Рубин–2–1990» с геофизическими данными (*a*) и полученная на его основе двумерная компьютерная модель участка литосферы на территории Западно-Сибирской плиты (*b*)

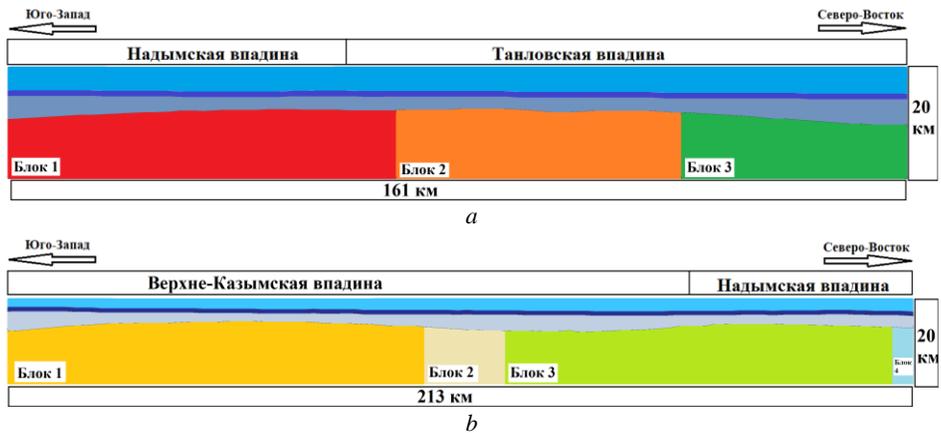
**Fig. 2.** (*a*) Part of the “Rubin–2–1990” geological profile with geophysical data and (*b*) two-dimensional computer model of the part of the lithosphere in the West Siberian Plate

Слои на рисунке имеют разный цвет, а блоки внутри слоев – разную интенсивность цвета. Особенность данного профиля – подробное описание слоев осадочного чехла и наличие блочной структуры, отражающее неравномерное распределение физических свойств геосреды. Верхний слой земной коры, охватывающий осадочный слой и кристаллический фундамент, лежит на глубине 10–12 км, а граница Мохо расположена на глубине 37–40 км.

Построенная компьютерная модель структуры части профиля «Рубин–2–1990» простирается от северо-востока до юго-запада Западной Сибири, имеет протяженность 523 км и глубину 60 км. Она пересекает такие геологические области, как

Верхне-Казымская впадина, Надымская впадина, Обь-Тазовская котловина и Танловская впадина. Представленные области находятся на территории нефтегазовых залежей Западно-Сибирской плиты.

В рамках многоуровневого исследования необходимо также построить более подробные модели меньшего размера, являющиеся частями общей крупной модели (модели верхнего структурного уровня). Данные области выделены черными прямоугольниками на рис. 2, *b*. Эти модели можно назвать моделями структурного мезоуровня. В результате геологического обследования нефтегазовых регионов, через которые проходит выбранный участок геологического профиля, было выбрано два участка для построения структурных моделей верхних слоев земной коры (осадочного чехла и верхней части кристаллического фундамента) глубиной 20 км и меньшей протяженностью, в которых наблюдаются залежи нефти и газа [13]. Они представлены на рис. 3.

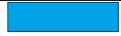
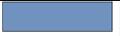


**Рис. 3.** Структурные модели мезоуровней верхних слоев земной коры: М-1 (*a*) и М-2 (*b*)  
**Fig. 3.** Meso-scale structural models of the upper layers of Earth's crust: (*a*) M-1 and (*b*) M-2

Особенность представленных моделей заключается в том, что согласно геофизическим данным геологического профиля «Рубин–2–1990» осадочный слой разделен на серию слоев, а кристаллический фундамент представлен одним слоем, разделенным на серию блоков. При этом каждый из элементов земной коры имеет индивидуальные физические свойства, представленные в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Плотность и упругие свойства верхних слоев земной коры модели М-1**

						
	Осадочный слой 1	Осадочный слой 2	Осадочный слой 3	Блок 1	Блок 2	Блок 3
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2.38	2.3825	2.3875	2.4998	2.4998	2.4988
Модуль сдвига, ГПа	35.277	13.99	21.919	29.914	32.835	36.52
Модуль всестороннего сжатия, ГПа	45.93	24.49	34.836	42.156	60.014	51.429

Плотность и упругие свойства верхних слоев земной коры модели М-2

	Осадочный слой 1	Осадочный слой 2	Осадочный слой 3	Блок 1	Блок 2	Блок 3	Блок 4
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2.38	2.3825	2.3875	2.4998	2.498	2.4988	2.4988
Модуль сдвига, ГПа	4.257	11.795	23.59	34.024	34.023	33.56	31.57
Модуль все-стороннего сжатия, ГПа	11.795	24.323	32.102	54.44	33.564	31.579	57.07

На основе созданных блочно-слоистых моделей теперь можно более детально исследовать напряженно-деформированное состояние верхних слоев земной коры. В ходе численного моделирования выявленная структура будет иметь неравномерное распределение напряжений и деформаций, которые могут быть использованы при выявлении местонахождений залежей нефти и газа.

### Математическая постановка задачи

Для численного моделирования и оценки напряженно-деформированного состояния участков литосферы и верхних слоев земной коры были использованы уравнения механики деформируемого твердого тела, включающие базовые уравнения сохранения и определяющие соотношения упругопластической среды [14].

Для описания неупругого деформирования элементов литосферы принята модель Друкера–Прагера–Николаевского, которая позволяет независимо описать процессы дилатансии и внутреннего трения [14]. Условие текучести и пластический потенциал представлены формулами

$$f(\sigma_{ij}) = -\alpha P + J_2^{1/2} - Y = 0, \quad g(\sigma_{ij}) = J_2 - \Lambda P(2Y + \alpha P) + const, \quad (1)$$

где  $J_2$  – второй инвариант девиатора тензора напряжений,  $Y$  – когезия,  $\alpha$  – коэффициент внутреннего трения,  $P$  – давление,  $\Lambda$  – коэффициент дилатансии.

Для того чтобы выбрать параметры принятой модели среды, следует заметить, что с начала XX в., начиная от пионерских работ А. Вегенера и Дж. Барелла, стали создаваться и развиваться теоретические модели, учитывающие влияние геолого-геофизических параметров на физические свойства геосреды. На сегодняшний день в силу активного развития мощностей вычислительных машин стало возможным учитывать много параметров, необходимых для описания физических свойств геосреды и моделирования геодинамических процессов. В связи с этим обратим внимание на модели, использующие такое понятие, как разность главных нормальных напряжений, позволяющее учитывать неявным способом влияния нескольких параметров и физико-химических превращений горных пород. В данной работе выбрана одна из теоретических моделей, называемая *cratonic jelly sandwich*, которая подходит для описания прочности горных пород в континентальной коре [15]. Она определяет разность главных нормальных напряжений в литосфере с ростом глубины залегания слоев. Чтобы определить значения параметров модели Друкера–

Прагера–Николаевского для разных слоев литосферы, нужно связать их с разностью главных нормальных напряжений.

На основе связи второго инварианта девиатора тензора напряжений с максимальными касательными напряжениями

$$J_2 = (1 - \mu_\sigma^2/3)\tau^2, \quad (2)$$

и связи последних с разностью главных нормальных напряжений

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 = \Delta\sigma/2 \quad (3)$$

получаем следующее выражение:

$$\Delta\sigma = 2(Y + \alpha P)(1 - \mu_\sigma^2/3)^{-1/2}, \quad (4)$$

представляющее собой искомую связь разности главных нормальных напряжений с параметрами модели Друкера–Прагера (когезией и коэффициентом внутреннего трения). Здесь  $\mu_\sigma = 2(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3) - 1$  – параметр Лоде–Надаи.

Формула (4) позволяет адаптировать выбранную упругопластическую модель для решения задач о распределении напряжений и деформаций в элементах литосферы.

Особенности распределения разности главных нормальных напряжений, когезии и коэффициента внутреннего трения по глубине литосферы подробно представлены в статьях [16, 17] и на рис. 4.

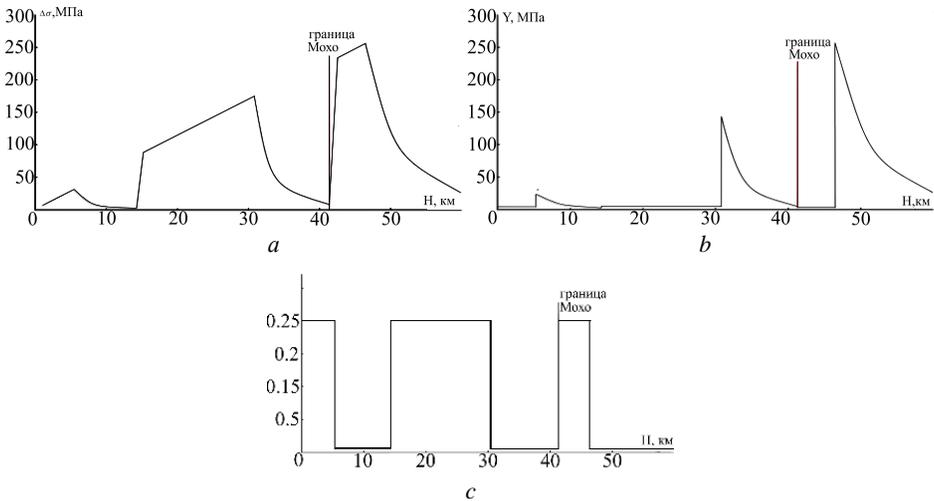


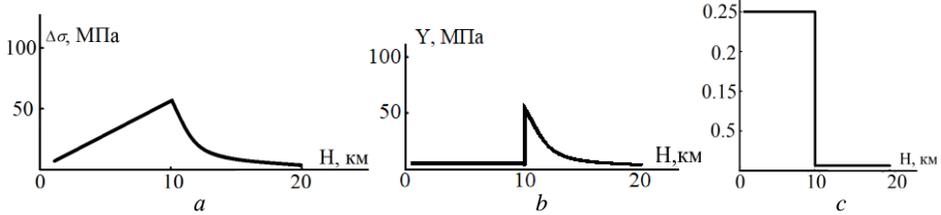
Рис. 4. Графики изменения  $\Delta\sigma$  (a),  $Y$  (b) и  $\alpha$  (c) в слоях литосферы

Fig. 4. Graphs of varying characteristics (a)  $\Delta\sigma$ , (b)  $Y$ , and (c)  $\alpha$  in the layers of the lithosphere

В случае анализа напряженно-деформированного состояния участков верхних слоев земной коры в рамках прочностной модели *cratonic jelly sandwich* зависимости разности главных нормальных напряжений, сцепления и коэффициента внутреннего трения от глубины представлены на рис. 5.

Для задания граничных условий при расчете учтем геодинамическую ситуацию, имеющую место в настоящий момент на территории Западно-Сибирской плиты. Она складывается из процесса субмеридианального сжатия со стороны Арктики, влияния коллизии Индийского континента с юга и сжатия по границам между Западно-Сибирской плитой, Восточно-Европейской платформой и Сибирским кратоном [7, 18]. Также для глубинных слоев литосферы следует учесть движения

в мантии и воздействия силы тяжести, которые приводят к возникновению сложных геодинамических обстановок. Поэтому вдоль геологического профиля «Рубин–2–1990» наблюдается комбинированный процесс сжатия-растяжения, возникающий в результате сложных движений литосферных плит Земли [7].



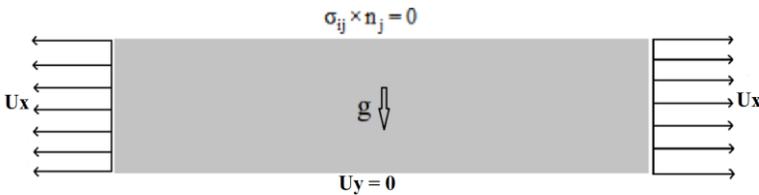
**Рис. 5.** Графики изменения  $\Delta\sigma$  (a),  $Y$  (b) и  $\alpha$  (c) в верхних слоях земной коры  
**Fig. 5.** Graphs of varying characteristics (a)  $\Delta\sigma$ , (b)  $Y$ , and (c)  $\alpha$  in the upper layers of Earth's crust

Представленная на рис. 6 схема нагружения отражает сложную геодинамическую обстановку, которая характерна для выбранного региона. Наблюдается постепенный переход от горизонтального растяжения у земной поверхности, вызванного субмеридиональным сжатием Западно-Сибирской плиты, в горизонтальное сжатие нижних слоев земной коры и верхней мантии, вызванное влиянием высоких давлений мантийного слоя.



**Рис. 6.** Схема граничных условий для численных экспериментов для слоев земной коры и верхней мантии  
**Fig. 6.** Schematic representation of the boundary conditions in numerical experiments for the layers of the lithosphere

В случае анализа напряженно-деформированного состояния верхних слоев земной коры, будут использоваться граничные условия, показанные на рис. 7, которые соответствуют процессу горизонтального растяжения.



**Рис. 7.** Схема граничных условий для численного эксперимента для верхних слоев земной коры  
**Fig. 7.** Schematic representation of the boundary conditions in a numerical experiment for the upper layers of Earth's crust

В ранее опубликованных статьях [16, 17] и книге М.Л. Уилкинса [19] были представлены методы и способы численного решения данной задачи.

### Результаты моделирования и их обсуждение

Исследование напряженно-деформированного состояния литосферы выполнено в рамках многоуровневого подхода. Его суть состоит в том, чтобы сначала проанализировать напряженно-деформированное состояние участков литосферы глубиной 60 км, а затем на основе полученных результатов рассмотреть напряженно-деформированное состояние верхних слоев земной коры глубиной 20 км, в которых можно более подробно учесть структуру осадочного чехла, где расположены полезные ископаемые.

Численное моделирование механического поведения участков литосферы в условиях комбинированного процесса растяжения-сжатия на территории Западно-Сибирской плиты было выполнено с использованием адаптированной четырехугольной расчетной сетки со средним размером ячейки 500 м [16, 17].

Для оценки напряженно-деформированного состояния были выбраны следующие его параметры: интенсивность пластической деформации и компонента тензора напряжений  $\sigma_{xx}$  (горизонтальные напряжения). Зоны повышенной неупругой деформации представляют интерес, поскольку в этих местах геосреда является сильно поврежденной, что способствует образованию ловушек углеводородов. В силу принятых граничных условий и неоднородности литосферы в изучаемых регионах возможно образование областей локального горизонтального растяжения. Такие места в верхних слоях земной коры также представляют интерес с точки зрения потенциальных местоположений залежей нефти и газа.

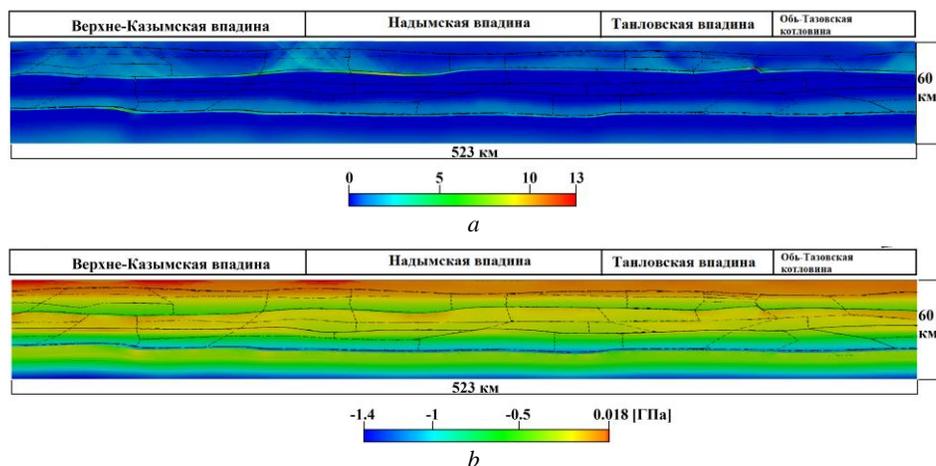
Как видно на рис. 8, в верхних слоях литосферы пластическая деформация локализована в районах Танловской впадины, Верхне-Казымской впадины и на границе Надымской и Верхне-Казымской впадин. На расположение полос локализованной деформации в верхнем слое земной коры кроме границы раздела между слоями также оказывает влияние различие в механических свойствах внутрислоевых блоков.

На рис. 8, *b* в районах Верхне-Казымской впадины и на границе Верхне-Казымской и Надымской впадин выявлены положительные значения горизонтальных напряжений, свидетельствующие о наличии поврежденности и пустот в верхних слоях земной коры, где могут находиться нефтегазовые залежи.

Результаты моделирования подтверждаются геологическими данными, по которым в районах Надымской, Верхне-Казымской и Танловской впадин залежи нефти и газа расположены в юрско-меловых отложениях, а разнонаправленная амплитуда нетектонических движений поспособствовала формированию месторождений смешанного типа [13, 20].

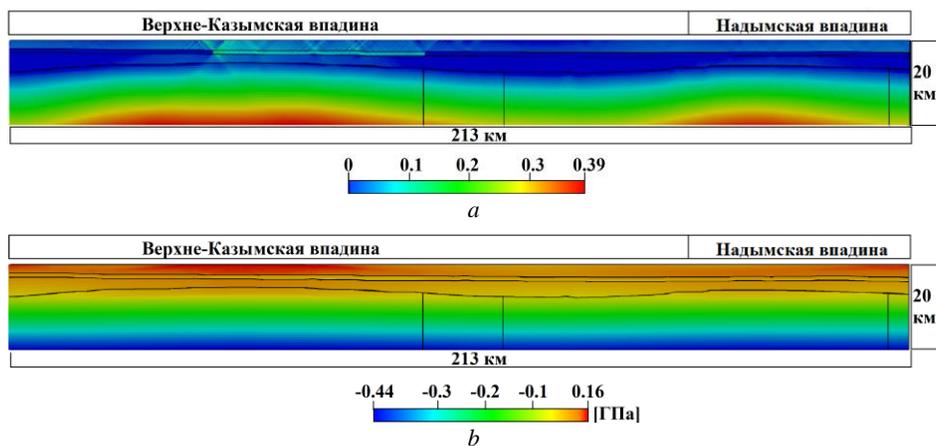
Для более детального исследования напряженно-деформированного состояния верхних слоев литосферы в этих регионах было проведено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния участков верхних слоев земной коры глубиной 20 км. На рис. 9, *a* локализация пластической деформации сосредоточена на тех же территориях Верхне-Казымской и Надымской впадин, что было получено ранее в расчетах на более крупной модели. Очаги положительных горизонтальных напряжений расположены в районах Верхне-Казымской и Надым-

ской впадин (рис. 9, *b*), в которых также отмечается локализация пластической деформации и сосредоточены крупные залежи нефти и газа.



**Рис. 8.** Распределения пластической деформации (*a*) и горизонтальных напряжений (*b*) в слоях литосферы вдоль геологического профиля «Рубин–2–1990»

**Fig. 8.** Distribution of (*a*) plastic strain and (*b*) horizontal stresses in the lithosphere layers along the “Rubin–2–1990” geological profile

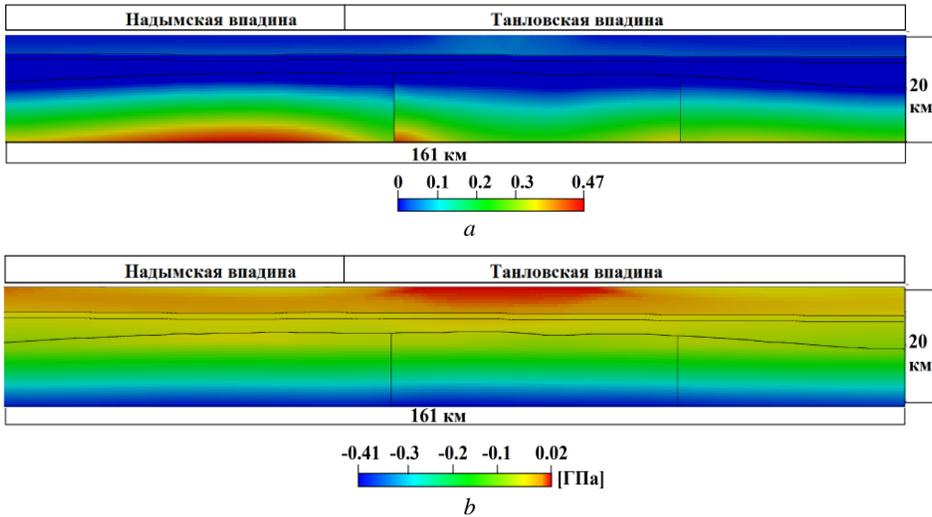


**Рис. 9.** Распределение пластической деформации (*a*) и горизонтальных напряжений (*b*) в слоях земной коры вдоль южной части геологического профиля «Рубин–2–1990» (для модели М-1)

**Fig. 9.** Distribution of (*a*) plastic strain and (*b*) horizontal stresses in Earth's crust layers along the south end of the “Rubin–2–1990” geological profile (M-1 model)

На рис. 10 представлены распределения пластической деформации и горизонтальных напряжений на территориях Надымской и Танловской впадин. Высокая локализация пластической деформации наблюдается в районе Танловской впадины. Заметим, что в процессе расчета отмечался следующий механизм распространения пластической деформации: сначала на границе раздела между осадочным чехлом

и кристаллическим фундаментом образуется полоса локализованной деформации, затем область пластически деформированной среды распространяется до земной поверхности, приводя к поврежденности осадочного чехла. В результате данного механизма формируются семейства разломов, который могут стать ловушками углеводородов.



**Рис. 10.** Распределения пластической деформации (*a*) и горизонтальных напряжений (*b*) в слоях земной коры вдоль северной части геологического профиля «Рубин–2–1990» (для модели М-2)

**Fig. 10.** Distribution of (*a*) plastic strain and (*b*) horizontal stresses in Earth's crust layers along the north end of the "Rubin–2–1990" geological profile (M-2 model)

Зона положительных значений горизонтальных напряжений в осадочном чехле, которая выделяется на рис. 10, *b*, совпадает с областью повышенных пластических деформаций, что свидетельствует о возможной поврежденности осадочного чехла в указанном месте и наличии в нем ловушек углеводородов или нефтегазовых залежей. Результаты моделирования подтверждаются результатами геологических исследований, проведенных Р.И. Сафиним и Е.А. Мануиловой [13, 20, 21]. Ими было выявлено, что в данном регионе прогнозируется большое количество ловушек углеводородов, и на территории Ярудейского нефтегазового региона проявляются признаки наличия залежей нефти и газа [21]. При сопоставлениях месторождений нефти и газа и структур, окружающих эти месторождения, было обнаружено, что подавляющее большинство залежей нефти и газа приурочено к долинам и впадинам и границам различных новейших структур. Также установлено, что залежи углеводородов расположены в областях пересечения разломов со сдвигами земной коры и различных типов новейших разрывов [13, 20–22].

### Заключение

В представленной статье использован многоуровневый подход, позволивший детально проанализировать напряженно-деформированное состояние как более

протяженного и глубокого участка литосферы, так и меньших по размерам участков верхних слоев земной коры. Это стало возможно благодаря геофизическим данным геологического профиля «Рубин–2–1990», которые позволили создать компьютерные блочно-слоистые модели геоструктур, и математической модели, способной описать напряженно-деформированное состояние в литосфере. В качестве объекта исследования были выбраны нефтегазовые области Баженовской свиты на территории Западно-Сибирской плиты.

Показано, что в результате растяжения-сжатия в районах Танловской впадины, Верхне-Казымской впадины и на границе Надымской и Верхне-Казымской впадин отмечаются области локализации неупругой деформации и зоны положительных горизонтальных напряжений, соответствующие местоположениям ловушек углеводородов и залежей нефти и газа. В выделенных областях были проведены более детальные исследования распределений напряжений и деформаций в верхних слоях земной коры. На основе выполненных исследований были более точно определены места локализации пластической деформации на территориях Верхне-Казымской и Надымской впадин, которые были выявлены в расчетах для участка литосферы глубиной 60 км. Очаги положительных горизонтальных напряжений расположены в районах Верхне-Казымской и Надымской впадин, в которых локализована пластическая деформация и сосредоточены крупные залежи нефти и газа. На территориях Надымской и Танловской впадин зоны положительных горизонтальных напряжений в осадочном чехле совпадают с областью локализации пластической деформации, что свидетельствует о возможной поврежденности осадочного чехла и наличии в нем ловушек углеводородов или нефтегазовых залежей.

#### Список источников

1. *Turcotte D., Schubert G.* Geodynamics. Cambridge: Cambridge University Press. 2014.
2. *Леонов М.Г.* Кристаллические прогнотозии как типовая структурно-тектоническая модель интрагранитных залежей углеводородов // Геотектоника. 2019. № 3. С. 24–41. doi: 10.31857/S0016-853X2019324-41
3. *Леонов М.Г., Морозов Ю.А., Пржиялговский Е.С., Рыбин А.К., Бакеев Р.А., Лаврушина Е.В., Стефанов Ю.П.* Тектоническая эволюция системы «фундамент–чехол» и морфоструктурная дифференциация осадочных бассейнов // Геотектоника. 2020. № 2. С. 3–31. doi: 10.31857/S0016853X20020083
4. *Koptev A., Nettesheim M., Ehlers T.A.* Plate corner subduction and rapid localized exhumation: Insights from 3D coupled geodynamic and geomorphological modelling // Terra Nova. 2022. V. 34 (3). P. 210–223. doi: 10.1111/ter.12581
5. *Artemieva I.M., Thybo H., Cherepanova Y.* Isopycnicity of cratonic mantle restricted to kimberlite provinces // Earth and Planetary Letters. 2019. V. 505. P. 13–19. doi: 10.1016/j.epsl.2018.09.034
6. *Стефанов Ю.П., Татаурова А.А.* Влияние трения и прочностных свойств среды на формирование зон локализации деформации в надвиговых структурах // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 21 (5). С. 46–55. doi: 10.24411/1683-805X-2018-15005
7. *Ребецкий Ю.Л.* Поле глобальных коровых напряжений Земли // Геотектоника. 2020. № 6. С. 3–24. doi: 10.31857/S0016853X200 60119
8. *Гурари Ф.Г.* Геология и перспективы нефтегазоносности Обь-Иртышского междуречья. Ленинград: Гостехиздателство, 1959.
9. *Конторович А.Э., Буриштейн Л.М., Казаненков В.А., Конторович В.А., Костырева Е.А., Пономарева Е.В., Рыжкова С.В., Ян П.А.* Баженовская свита – главный источник

- ресурсов нетрадиционной нефти в России // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2014. № 2(10). С. 1–8.
10. Конторович А.Э., Пономарева Е.В., Буриштейн Л.М., Глинских В.Н., Ким Н.С., Костырева Е.А., Павлова М.А., Родченко А.П., Ян П.А. Распределение органического вещества в породах баженовского горизонта (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 3. С. 357–371. doi: 10.15372/GiG20180307
  11. Проект РУБИН–1990. Профиль РУБИН-1 – г. Костомукша – г. Семипалатинск, профиль РУБИН-2 – г. Нижний Тагил – г. Уренгой // Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год. СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. С. 21–22. URL: <https://webftp.vsegei.ru/glubgeoph/seism48.pdf>
  12. Cherepanova Yu., Artemieva I.M., Thybo H., Chemia Z. Crustal structure of the Siberian craton and the West Siberian basin: An appraisal of existing seismic data // Tectonophysics. 2013. V. 609. P. 154–183. doi: 10.1016/j.tecto.2013.05.004
  13. Мануилова Е.А. Локализация месторождений нефти и газа в зависимости от типов новейших структур на территории Западно-Сибирской плиты // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2021. № 6. С. 10–19. doi: 10.33623/0579-9406-2021-6-10-19
  14. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Кузнецов П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П., Ворошилов С.П. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. Новосибирск: Гео, 2007.
  15. Vurov E.B. Rheology and strength of lithosphere // Marine and Petroleum Geology. 2011. V. 28 (8). P. 1402–1443. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2011.05.008
  16. Ахметов А.Ж., Смолин И.Ю. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния Якутско-Вилюйской изверженной провинции для анализа геотектонических процессов в Сибирском кратоне // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 69. С. 53–68. doi: 10.17223/19988621/69/5
  17. Ахметов А.Ж., Смолин И.Ю. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния Тунгусской синеклизы и Якутско-Вилюйской крупной изверженной провинции // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 75. С. 52–66. doi: 10.17223/19988621/75/5
  18. Буслов М.М. Террейновая тектоника ЦентральноАзиатского складчатого пояса // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 3. С. 641–665. doi: 10.5800/GT-2014-5-3-0147
  19. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin: Springer-Verlag. 1999.
  20. Мануилова Е.А. Взаимосвязь дислокаций фундамента и осадочного чехла с новейшим структурным планом Западно-Сибирской плиты // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2021. № 4. С. 23–31. doi: 10.33623/0579-9406-2021-4-23-31
  21. Сафин Р.И. Перспективные объекты на нефть и газ в Надымской впадине // Известия вузов. Нефть и газ. 2016. № 5. С. 33–37. doi: 10.31660/0445-0108-2016-5-33-37
  22. Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. Мезоструктура зоны скольжения тектонического разлома // Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25, № 5. С. 94–105. doi: 10.55652/1683-805X\_2022\_25\_5\_94

### References

1. Turcotte D., Schubert G. (2014) *Geodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.
2. Leonov M.G. (2019) Crystalline protrusion as the typical structural–tectonic model of intra-granite hydrocarbon accumulation. *Geotectonics*. 53(3). pp. 319–336. doi: 10.1134/S0016852119030075
3. Leonov M.G., Przhivalgovskii E.S., Lavrushina E.V., Morozov Y.A., Rybin A.K., Bakeev R.A., Stefanov Y.P. (2020) Tectonic evolution of the basement–sedimentary cover system and morphostructural differentiation of sedimentary basins. *Geotectonics*. 54(2). pp. 147–172. doi: 10.1134/S0016852120020089

4. Koptev A., Nettesheim M., Ehlers T.A. (2022) Plate corner subduction and rapid localized exhumation: Insights from 3D coupled geodynamic and geomorphological modelling. *Terra Nova*. 34(3). pp. 210–223. doi: 10.1111/ter.12581
5. Artemieva I.M., Thybo H., Cherepanova Y. (2019) Isopycnicity of cratonic mantle restricted to kimberlite provinces. *Earth and Planetary Letters*. 505. pp. 13–19. doi: 10.1016/j.epsl.2018.09.034
6. Stefanov Yu.P., Tataurova A.A. (2019) Effect of friction and strength properties of the medium on shear band formation in thrust structures. *Physical Mesomechanics*. 22(6). pp. 463–472. doi: 10.1134/S1029959919060031
7. Rebetskiy Y.L. (2020) Pattern of global crustal stresses of the Earth. *Geotectonics*. 54(6). pp. 723–740. doi: 10.1134/S0016852120060114
8. Gurari F.G. (1959) *Geologiya i perspektivy neftegazonosnosti Ob'-Irtyskogo mezhdurech'ya* [Geology and prospects for oil and gas potential of the Ob-Irtysh interfluvium]. Leningrad: Gostekhizdatel'stvo.
9. Kontorovich A.E., Burshteyn L.M., Kazanenkov V.A., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Ponomareva E.V., Ryzhkova S.V., Yan P.A. (2014) Bazhenovskaya svita – glavnyy istochnik resursov netraditsionnoy nefti v Rossii [The Bazhenov Suite is the main reserve of unconventional oil in Russia]. *Georesursy, Geoenergetika, Geopolitika*. 2(10). pp. 1–8.
10. Kontorovich A.E., Ponomareva E.V., Burshtein L.M., Glinskikh V.N., Kim N.S., Kostyreva E.A., Pavlova M.A., Rodchenko A.P., Yan P.A. (2018) Distribution of organic matter in rocks of the Bazhenov horizon (West Siberia). *Russian Geology and Geophysics*. 59(3). pp. 285–298. doi: 10.1016/j.rgg.2018.03.007
11. Proekt RUBIN – 1990. Profil' RUBIN-1 – g. Kostomuksha – g. Semipalatinsk, profil' RUBIN-2 – g. Nizhniy Tagil – g. Urengoy [Project RUBIN – 1990. Profile RUBIN-1 - Kostomuksha - Semipalatinsk, profile RUBIN-2 - Nizhny Tagil - Urengoy] (2013) Atlas «Opornye geologo-geofizicheskie profili Rossii». Glubinnye seismicheskie razrezy po profilyam GSZ, otrabotannym v period s 1972 po 1995 god [Atlas "Reference geological and geophysical profiles of Russia". Deep seismic sections along DSS profiles worked out in the period from 1972 to 1995]. Saint Petersburg: "VSEGEI". p. 21–22. Access mode: <https://webftp.vsegei.ru/glub-geoph/seism48.pdf>
12. Cherepanova Yu., Artemieva I.M., Thybo H., Chermia Z. (2013) Crustal structure of the Siberian craton and the West Siberian basin: An appraisal of existing seismic data. *Tectonophysics*. 609. pp. 154–183. doi: 10.1016/j.tecto.2013.05.004
13. Manuilova E.A. (2021) Lokalizatsiya mestorozhdeniy nefti i gaza v zavisimosti ot tipov noveyshikh struktur na territorii Zapadno-Sibirskoy plity [Localization of oil and gas deposits depending on the types of new structures on the territory of the West Siberian Plate]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4 Geologiya – Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 6. pp. 10–19. doi: 10.33623/0579-9406-2021-6-10-19
14. Makarov P.V., Smolin I.Yu., Stefanov Yu.P., Kuznetsov P.V., Trubitsyn A.A., Trubitsyna N.V., Voroshilov S.P., Voroshilov Ya.S. (2007) *Nelineynaya mekhanika geomaterialov i geored* [Nonlinear mechanics of geomaterials and geomedial]. Novosibirsk: "Geo" Academic Publishing House
15. Burov E.B. (2011) Rheology and strength of lithosphere. *Marine and Petroleum Geology*. 28(8). pp. 1402–1443. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2011.05.008
16. Akhmetov A.Zh., Smolin I.Yu. (2021) Chislennoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya Yakutsko-Vilyuyskoy izverzhennoy provintsii dlya analiza geotektonicheskikh protsessov v Sibirskom kratone [Numerical modeling of the stress-strain state of the Yakutsk-Vilyui large igneous province for the analysis of geotectonic processes in the Siberian Craton]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 69. pp. 53–68. doi: 10.17223/19988621/69/5

17. Akhmetov A.Zh., Smolin I.Yu. (2022) Komp'yuternoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya Tungusskoy sineklizy i Yakutsko-Vilyuyskoy krupnoy izverzhennoy provintsiy [Computer modelling of the state of stress and strain of the Tunguska and Vilyui Synclises]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 75. pp. 52–66. doi: 10.17223/19988621/75/5
18. Buslov M.M. (2014) Terreynovaya tektonika Tsentral'noAziatskogo skladchatogo poyasa [Terrain tectonics of the Central Asian folded belt]. *Geodinamika i tektonofizika – Geodynamics & Tectonophysics*. 5(3). pp. 641–665. doi: 10.5800/GT-2014-5-3-0147
19. Wilkins M.L. (1999) *Computer Simulation of Dynamic Phenomena*. Berlin: Springer-Verlag.
20. Manuilova E.A. (2021) Vzaimosvyaz' dislokatsiy fundamenta i osadochnogo chekhla s novyeshim strukturnym planom Zapadno-Sibirskoy plity [The interconnection of platform's dislocations and sediment cover with the latest structure plan of the West Siberian plate]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4 Geologiya – Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 4. pp. 23–31. doi: 10.33623/0579-9406-2021-4-23-31
21. Safin R.I. (2016) Perspektivnye ob'ekty na nef't' i gaz v Nadym'skoy vpadine [Promising sites for oil and gas Nadym Depressions]. *Izvestiya Vuzov. Nef't' i gaz – Oil and Gas Studies*. 5. pp. 33–37. doi: 10.31660/0445-0108-2016-5-33-37
22. Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A. (2023) Mesostructure of a tectonic fault slip zone. *Physical Mesomechanics*. 26(1). pp. 82–92. doi: 10.1134/S1029959923010095

**Сведения об авторах:**

**Ахметов Аян** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: ayan.akhmetov93@gmail.com

**Смолин Игорь Юрьевич** – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: smolin@ispms.ru

**Information about the authors:**

**Akhmetov Ayan** (Candidate of Physics and Mathematics, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ayan.akhmetov93@gmail.com

**Smolin Igor' Yu.** (Doctor of Physics and Mathematics, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation). E-mail: smolin@ispms.ru

*Статья поступила в редакцию 29.04.2024; принята к публикации 10.04.2025*

*The article was submitted 29.04.2024; accepted for publication 10.04.2025*