

## МЕХАНИКА

УДК 539.3+551.24

DOI 10.17223/19988621/75/5

**А.Ж. Ахметов, И.Ю. Смолин**

### **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТУНГУССКОЙ СИНЕКЛИЗЫ И ЯКУТСКО-ВИЛЮЙСКОЙ КРУПНОЙ ИЗВЕРЖЕННОЙ ПРОВИНЦИИ<sup>1</sup>**

Рассматривается численное моделирование напряженно-деформированного состояния участков литосферы в некоторых областях месторождений полезных ископаемых. В качестве объектов исследования выбраны двумерные структурные модели Вилюйской и Тунгусской синеклиз на основе профиля «Кимберлит-1981». Для описания процессов деформирования применена модель упругопластической среды с неассоциированным законом течения в форме Друкера – Прагера – Николаевского, которая была адаптирована с использованием модели «jelly sandwich». Локализация пластической деформации, области положительных горизонтальных напряжений соответствуют местонахождениям полезных ископаемых.

*Ключевые слова:* распределения напряжений и деформаций, численное моделирование, метод конечных разностей, континентальная литосфера, упругопластическая среда, Вилюйская синеклиза, Тунгусская синеклиза, модель «jelly sandwich», геологический профиль «Кимберлит-1981».

Природа формирования литосферы является одной из основных научных проблем современной геодинамики [1]. В настоящее время решение многих фундаментальных проблем осуществляется на основе междисциплинарного подхода, который требует привлечения сведений и методов из разных областей наук. При таком подходе к указанной проблеме одной из задач ее комплексного анализа является изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) литосферы. Эта задача геомеханики сводится к решению задачи механики деформируемого твердого тела с учетом геолого-геофизических особенностей регионов и механизмов неупругого деформирования геологических сред [2]. При этом структурная модель геосреды определяется геологическим строением исследуемого объекта. Важнейшее значение для получения достоверных результатов имеет также выбор адекватной модели геосреды. Развитие численных методов и вычислительной техники позволяет решать данный класс задач с достаточно детальным рассмотрением неоднородности структуры земной коры и с учетом сложной реологии геологических сред.

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90034. Компьютерная программа для выполнения исследований была модифицирована в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0003.

Одним из крупных и важных геологических объектов на территории Российской Федерации является Сибирский кратон, который представляет собой древнюю стабильную платформу, сложенную из разных геологических структур. На его территории отмечается большое количество месторождений разнообразных полезных ископаемых [3]. Геологическая структура данного региона была хорошо изучена с помощью экспериментальных методов, начиная от полевых экспедиций и заканчивая анализом и обработкой космических съёмок [4]. Из-за большой протяженности Сибирского кратона на его границах происходят разные геомеханические процессы, такие, как сжатия, сдвиги, растяжения, которые сильно влияют на внутренние процессы преобразования горных пород. Анализ влияния геотектонических процессов сжатия и растяжения на формирование НДС срединной части Енисейского кряжа и северной части Вилюйской синеклизы был проведен нами в предыдущих работах [5, 6]. Данная статья является дальнейшим этапом этих исследований. В этой работе в качестве объектов исследования были выбраны южная часть Вилюйской синеклизы и срединная часть Тунгусской синеклизы, где проходит геологический профиль «Кимберлит-1981» [7, 8]. Геологическая структура Тунгусской синеклизы представляет собой впадину округлой формы, вызванную опусканием кристаллического фундамента на глубину порядка 3–5 км. При этом стоит заметить, что по данным геофизиков на территории Тунгусской синеклизы происходит возникновение мантийного плюма на ранней стадии, которая в дальнейшем приведёт к высокой деформации земной коры. Вилюйская синеклиза которую в ряде источников называют Якутско-Вилюйской крупной изверженной провинцией, является областью массового проявления внутриплитного магматизма, которая сформировалась в результате внедрения огромных объемов мантийных магм за относительно короткое время [9, 10].

Цель данной статьи – анализ НДС Вилюйской и Тунгусской синеклиз на основе разработанных структурных моделей изучаемых объектов и физико-математической модели деформирования литосферы. В рамках данного анализа предполагалось выявить связь между особенностями НДС участков литосферы и местоположениями полезных ископаемых в них.

### **Структурные модели Вилюйской и Тунгусской синеклиз**

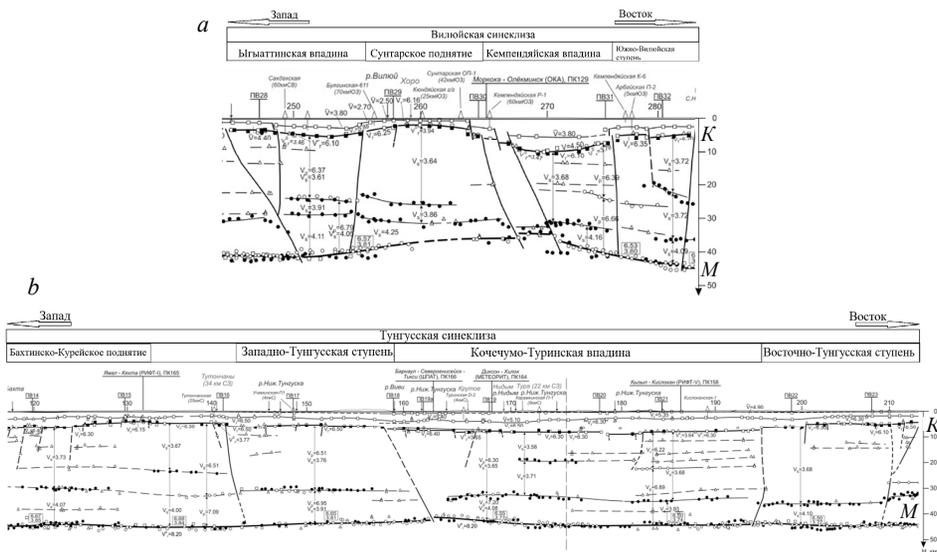
В 80-е и 90-е годы XX века на территории бывшего СССР и современной России была проведена глобальная работа по исследованию литосферы на предмет поиска полезных ископаемых и анализа фундаментальных геологических особенностей структуры горных массивов в рамках проекта «Комплексного освоения земных недр СССР». Итогом данной работы было получение данных для геофизических профилей, которые проходили по многим ключевым геологическим областям бывшего СССР [7]. По интересующим нас областям проходит геологический профиль «Кимберлит-1981», ориентация которого представлена на рис. 1.

Геологический профиль «Кимберлит-1981» проходит по территориям Тунгусской синеклизы и южной части Вилюйской синеклизы, которые являются частями Лено-Вилюйской и Лено-Тунгусской нефтегазоносных провинций – крупнейших месторождений нефти и газа в Сибири [11, 12]. Часть геологического профиля «Кимберлит-1981», представлена на рис. 2 вместе с геофизическими данными, которые получены на основе метода глубинного сейсмического зондирования. Представленные на рис. 2 данные по Вилюйской и Тунгусской синеклизам содержат значения скоростей продольных и поперечных волн, выделенные границы

осадочного чехла и границы Мохо, а также зоны разломов. Протяженность выбранного участка Вилуйской синеклизы составляет 360 км, а Тунгусской синеклизы – 879 км, глубина обоих объектов равна 60 км.



**Рис. 1.** Ориентация профиля «Кимберлит-1981» на геолого-структурной карте России [7]  
**Fig. 1.** Orientation of the Kimberlit-1981 profile on the geological and structural map of Russia [7]

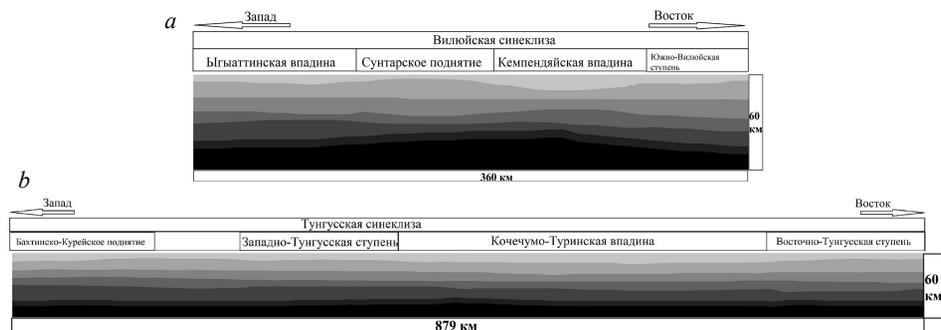


**Рис. 2.** Части геологического профиля «Кимберлит-1981», охватывающие территории Вилуйской (а) и Тунгусской (б) синеклиз  
**Fig. 2.** Parts of the Kimberlit-1981 geological profile comprising the areas of (a) Vilyui and (b) Tunguska synecises

Вилуйская синеклиза разделяется на серию геологических объектов, таких как Ыгьяттинская впадина, Сунтарское поднятие, Кемпендяйская впадина и Южно-Вилуйская ступень (рис. 2, а). Здесь наблюдается сильная деформация кристаллического фундамента, нижняя граница которого обозначена на рис. 2, а буквой *K* справа у вертикальной оси координат, в виде прогиба, который уходит на глубину порядка 10 км в районе Кемпендяйской впадины. Далее в западном направлении фундамент поднимается в районе Сунтарского поднятия и снова опускается до

глубины 5 км в Ыгыаттинской впадине. Верхний слой литосферы, который граничит с кристаллическим фундаментом, является южной оконечностью Виллюйского осадочного бассейна, осадочные породы которого накапливались в течение многих миллионов лет. На основе геофизических данных профиля, литосфера составлена из серии блоков, разделенных субвертикальными фронтальными разломами, которые доходят до границы Мохо, обозначенной буквой *M* справа у вертикальной оси координат, – линии раздела земной коры и мантии.

Схожую геологическую картину имеет Тунгусская синеклиза, в составе которой выделяют следующие геологические объекты: Бахтинско-Курейское поднятие, Западно-Тунгусская ступень, Кочечумо-Туринская впадина и Восточно-Тунгусская ступень. На рис. 2, *b* можно увидеть небольшую деформацию кристаллического фундамента, нижняя граница которого также обозначена буквой *K*. Глубина верхней границы фундамента колеблется в диапазоне 3–8 км, максимальное осаднение фундамента наблюдается в районе Кочечумо-Туринской впадины, а наименьшее осаднение – в районах Восточно-Тунгусской ступени и Бахтинско-Курейского поднятия. Здесь, также как и на рис. 2, *a*, наблюдаются субвертикальные разломы, которые проявляются между границами геологических областей. Кроме указанных геологических областей и разломов, на геологических профилях приведены границы, разделяющие слои земной коры, в которых отмечаются различные скорости продольных и поперечных волн. Это свидетельствует о том, что плотностные и упругие свойства в них также отличаются. На основе вышеуказанных геолого-геофизических данных были созданы двумерные структурные модели исследуемых регионов, которые представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Компьютерные структурные модели Виллюйской (*a*) и Тунгусской (*b*) синеклиз вдоль геологического профиля «Кимберлит-1981»

**Fig. 3.** Computer structural models of the (*a*) Vilyui and (*b*) Tunguska synclises along the Kimberlit-1981 geological profile

Представленные модели отражают слоистую неоднородность литосферы. Каждый из слоёв отличается индивидуальными физико-механическими свойствами, что оказывает влияние на распределения напряжений и деформаций в литосфере под воздействием гравитации, а также тектонических напряжений. Упругие свойства были определены на основе данных о плотности геосреды и скоростях продольных и поперечных упругих волн, полученных на основе геофизических данных профиля «Кимберлит-1981». Об определении прочностных свойств в рамках модели упругопластической среды речь пойдет в следующем разделе статьи.

Таблица 1

**Упругие и прочностные свойства слоёв земной коры и верхней мантии  
Вилойской синеклизы вдоль геологического профиля «Кимберлит-1981»**

Свойства	осадочный слой	слой 2	слой 3	слой 4	слой 5	верхняя мантия (слой 1)	верхняя мантия (слой 2)
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2.785	2.880	2.965	3.05	3.136	3.26	3.26
Модуль сдвига, ГПа	33.62	39.855	39.776	44.748	54.07	47.16	47.16
Модуль всестороннего сжатия, ГПа	51.455	60.987	71.221	75.64	80.681	77.13	77.13
Когезия, МПа	5	$5 \times Y(H)$	10	10	$10 \times Y(H)$	3	$3 \times Y(H)$
Коэффициент внутреннего трения	0.2	0.005	0.2	0.2	0.005	0.2	0.001
Коэффициент дилатансии	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.001

Таблица 2

**Упругие и прочностные свойства слоёв земной коры и верхней мантии  
Тунгусской синеклизы вдоль геологического профиля «Кимберлит-1981»**

Свойства	осадочный слой	слой 2	слой 3	слой 4	слой 5	верхняя мантия (слой 1)	верхняя мантия (слой 2)
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2.821	2.91	2.99	3.077	3.163	3.25	3.25
Модуль сдвига, ГПа	32.19	39.54	41.07	48.10	46.47	45.92	45.92
Модуль всестороннего сжатия, ГПа	52.51	64.5	67.22	88.93	78.59	76.42	76.42
Когезия, МПа	5	$5 \times Y(H)$	10	10	$10 \times Y(H)$	3	$3 \times Y(H)$
Коэффициент внутреннего трения	0.2	0.005	0.2	0.2	0.005	0.2	0.001
Коэффициент дилатансии	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.001

**Математическая постановка задачи**

В основу математической постановки, позволяющей описать НДС участков литосферы в условиях геодинамического влияния, лежат фундаментальные уравнения механики деформируемого твердого тела и определяющие соотношения [6, 13]. К фундаментальным уравнениям относятся законы сохранения массы, импульса и энергии. К определяющим соотношениям относятся уравнения, позволяющие описать особенности механического поведения геосреды, в данном случае – упругопластического. Поскольку применяется модель баротропной среды, закон сохранения энергии не является необходимым для замыкания системы уравнений и может быть рассмотрен отдельно. Для описания упругопластическо-

го деформирования применена гипотеза аддитивного разложения полного тензора деформаций и тензора скоростей деформации на упругую и пластическую составляющие. Таким образом, два класса представленных уравнений позволяют получить замкнутую систему уравнений. Описание нелинейного упругого отклика среды производится с помощью модели гипоупругости (связь между скоростями напряжений и скоростями деформаций) [13].

Для описания пластических течений в геосреде, была использована модель Друкера – Прагера – Николаевского с неассоциированным законом течения, которая позволяет независимо описать процессы дилатансии и внутреннего трения. Предельная поверхность напряжений записана в виде условия Друкера – Прагера:

$$f = \frac{\alpha}{3} J_1 + J_2^{1/2} - Y = 0, \quad (1)$$

где  $f(\sigma_{ij})$  – поверхность текучести;  $J_1$  – первый инвариант тензора напряжений;  $J_2$  – второй инвариант девиатора тензора напряжений;  $Y$  – когезия;  $\alpha$  – коэффициент внутреннего трения. В случае неассоциированного закона течения пластический потенциал не совпадает с функцией пластичности и в соответствии с теорией Николаевского принимается в виде

$$g(\sigma_{ij}) = J_2 + \frac{\Lambda}{3} J_1 \left( 2Y - \frac{\alpha}{3} J_1 \right) + const, \quad (2)$$

где  $\Lambda$  – коэффициент дилатансии.

Для описания процессов пластического деформирования в геосредах на рассматриваемых глубинах необходимо задать параметры рассмотренной модели с учетом влияния геодинамических факторов на реологические свойства среды. В настоящее время для оценки напряженного состояния литосферы применяются теоретические модели, которые учитывают геофизические особенности геосреды в разных регионах [14]. В качестве характеристики предельного напряженного состояния в моделях подобного типа используются так называемые «дифференциальные напряжения» (differential stress)  $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ , т.е. разность максимального и минимального главных нормальных напряжений. Также данная разность равна удвоенным максимальным главным касательным напряжениям  $2\tau$ . Зависимость «дифференциальных напряжений» от глубины имеет ряд особенностей, обусловленных неявным учетом таких параметров, как температура, флюиды и метаморфизм горных пород. В нашем случае была выбрана модель «jelly sandwich», отвечающая требованиям геодинамической обстановки и геофизического состояния, характерным для Сибирского кратона [15–17]. Чтобы соблюсти условие равновесного напряженного состояния геосреды, в рамках модели «jelly sandwich» принимается, что прочные слои земной коры уравниваются упрочненным слоем верхней мантии. Она предполагает также наличие ослабленного слоя внизу земной коры, что и обусловило ее название. Для использования модели «jelly sandwich» нам необходимо найти связь параметров модели Друкера – Прагера с «дифференциальными напряжениями». Для этого перепишем условие текучести Друкера – Прагера в виде

$$J_2^{1/2} = Y + \alpha P. \quad (3)$$

Здесь вместо первого инварианта тензора напряжений используется гидродинамическое давление  $P = -J_1/3$ . Воспользуемся выражением, связывающим второй инвариант девиатора тензора напряжений с максимальными главными касатель-

ными напряжениями и связью максимальных главных касательных напряжений с «дифференциальными напряжениями»

$$J_2 = (1 - \mu_\sigma^2/3)\tau^2; \quad (4)$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 = \Delta\sigma/2. \quad (5)$$

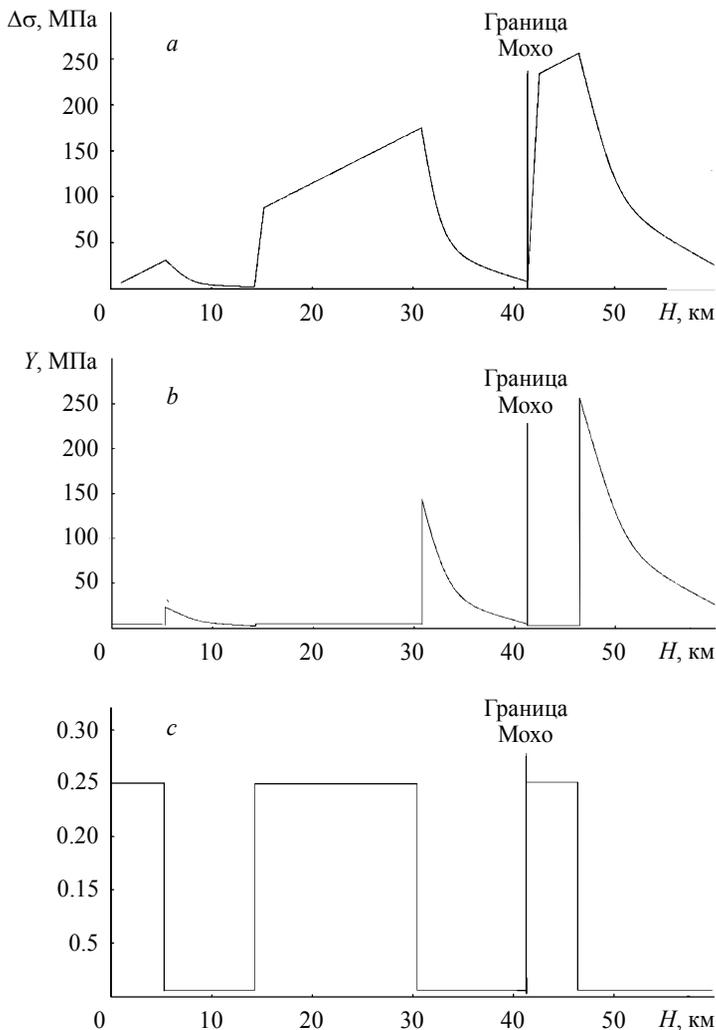
Здесь  $\mu_\sigma = 2(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3) - 1$  – параметр Лоде – Надаи. Подставляя в выражение (4) выражения (3) и (5), получим искомую зависимость дифференциальных напряжений от параметров модели Друкера – Прагера (когезии и коэффициента внутреннего трения)

$$\Delta\sigma = 2(Y + \alpha P)(1 - \mu_\sigma^2/3)^{-1/2}. \quad (6)$$

В это выражение также входят давления и параметр Лоде – Надаи. Формула (6) позволяет путём варьирования когезии и коэффициента внутреннего трения получать напряженное состояние, соответствующее изменению «дифференциальных напряжений» с глубиной, которое соответствует модели «jelly sandwich».

На рис. 4 представлены распределения «дифференциальных напряжений» с изменением глубины геосреды по теоретической модели «jelly sandwich», а также соответствующие этой модели изменения коэффициента внутреннего трения и когезии в зависимости от глубины слоёв земной коры и верхней мантии. Как видно из рис. 4, *a*, зависимость «дифференциальных напряжений» характеризуется чередованием зон упрочнения и разупрочнения слоёв земной коры и верхней мантии. Как можно заметить, зоны упрочнения и разупрочнения имеют разную протяженность. Размеры этих зон определяются толщинами слоёв земной коры и верхней мантии, которые мы получаем на основе геофизических данных геологических профилей. Важным параметром, определяющим линейное упрочнение в определенных слоях литосферы, является общее давление, которое также линейно растет с увеличением глубины. Поэтому величины когезии и коэффициента внутреннего трения, представленные на рис. 4, *b* и 4, *c* соответственно, в зонах упрочнения имеют постоянное значение. Разупрочнение в двух слоях земной коры на глубинах около 10 и 40 км обусловлено наличием флюидов и фазовыми переходами в горных породах под действием общего давления и температуры [16, 17]. В этих зонах разупрочнения когезия падает с ростом глубины по квадратичному закону, а коэффициенты трения имеют минимальное значение.

Выбор граничных условий для расчетов обусловлен геодинамической ситуацией на территориях Вилуйской и Тунгусской синеклиз, где происходит процесс растяжения, возникающий в результате возникновения суперплюма в мантийном слое [9, 10]. Построенные структурные модели находятся под действием гравитационных сил, и так как математическая постановка задачи осуществляется в скоростной форме, то на левой и правой границах моделей заданы горизонтальные скорости, моделирующие процесс геодинамического растяжения. На нижней горизонтальной границе заданы нулевые значения вертикальной скорости, а в районе земной поверхности (верхняя граница расчетной области) заданы условия свободной поверхности. Сначала решалась задача установления НДС под действием силы тяжести, а затем проводилось моделирование геодинамического процесса растяжения. Для снижения влияния динамических эффектов применяемого конечно-разностного метода Уилкинса при расчете равновесного НДС исследуемой области при задании силы тяжести и горизонтальных скоростей на боковых границах были использованы плавные функции их роста во времени [18].



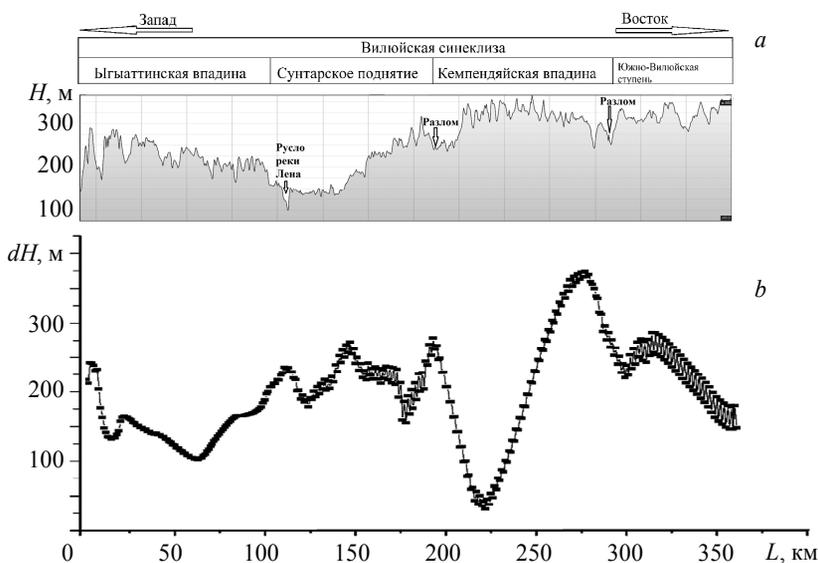
**Рис. 4.** Распределение прочности литосферы (а), когезии (b) и коэффициента внутреннего трения (с) в зависимости от глубины слоёв земной коры и верхней мантии

**Fig. 4.** Distribution of the (a) strength of the lithosphere, (b) cohesion, and (c) internal friction coefficient depending on the depth of layers of the earth's crust and upper mantle

### Результаты моделирования и их обсуждение

На основе проведенных ранее исследований на сеточную сходимость [6] была взята расчётная сетка с размером ячейки  $500 \times 500$  м. С использованием выбранной расчётной сетки было выполнено численное моделирование процесса растяжения выбранных участков литосферы Виллойской и Тунгусской синеклиз. Для оценки влияния блочной структуры земной коры на деформирование верхнего слоя земной коры было проведено сравнение рельефа, полученного в ходе численного моделирования, с реальным рельефом, полученным с помощью программы

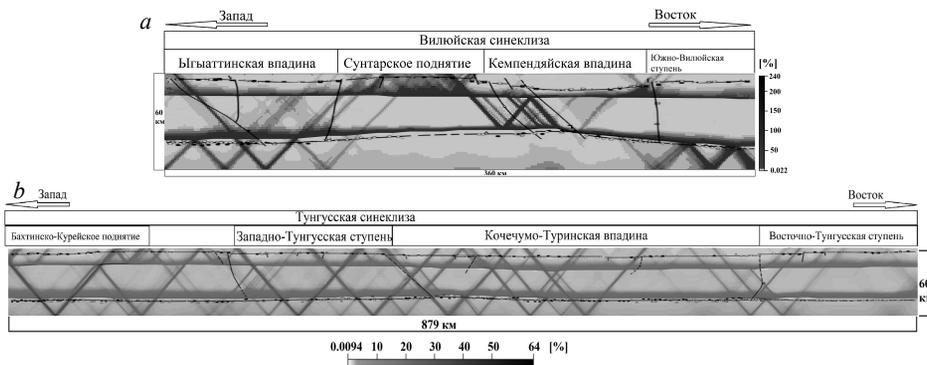
Google Earth [19]. На рис. 5 представлены результаты сравнения для Вилуйской синеклизы.



**Рис. 5.** Реальный рельеф (a) и рельеф, полученный в ходе компьютерного моделирования (b) на территории Вилуйской синеклизы  
**Fig. 5.** (a) Real relief and (b) relief obtained during computer modelling for the region of the Vilyui syncline

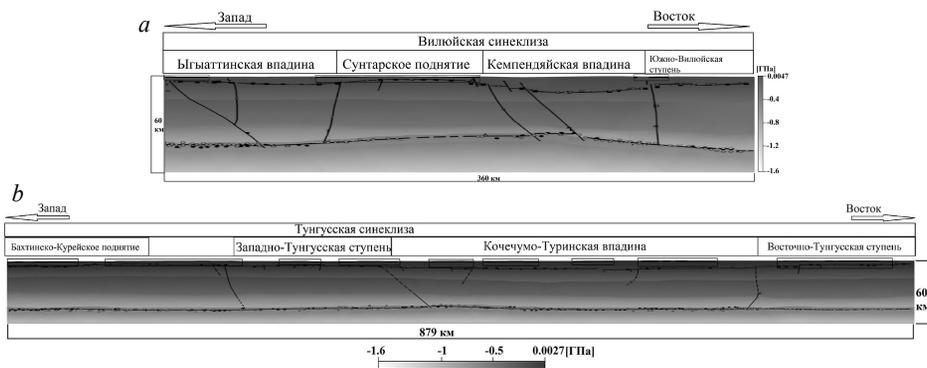
Оценивая рис. 5, можно наблюдать, что рельеф, полученный в ходе численного моделирования, в подробностях не совпадает с реальным рельефом, но грубые его изменения соответствуют геологическим обозначениям областей, а именно поднятиям и впадинам, зонам разломов и местонахождению русла реки Лена. Это означает, что кроме геодинамических воздействий блочной структуры литосферы на формирование реального рельефа оказали влияние и другие процессы, например эрозия горных пород.

Представленные на рис. 6 распределения интенсивности пластических деформаций свидетельствуют о том, что локализация пластической деформации возникает вдоль границы Мохо, а также в виде наклонных полос в некоторых регионах, определяемых кривизной слоёв земной коры и верхней мантии. Некоторые полосы локализованной пластической деформации располагаются в местах субвертикальных разломов, что свидетельствует о возможном влиянии кривизны кристаллического фундамента на их появление. Следует отметить, что часть полос локализованной пластической деформации формируются только в одном слое земной коры (например, в Кемпендяйской впадине), а часть – пересекают всю литосферу. Среди приповерхностных слоёв земной коры более подвержена пластическому деформированию область Сунтарского поднятия, на территории которой расположена Лено-Вилуйская нефтегазоносная провинция. В районах Кочечумо-Туринской впадины и Западно-Тунгусской ступени, на территориях которых расположена Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция, также отмечается высокая концентрация полос локализованной пластической деформации.



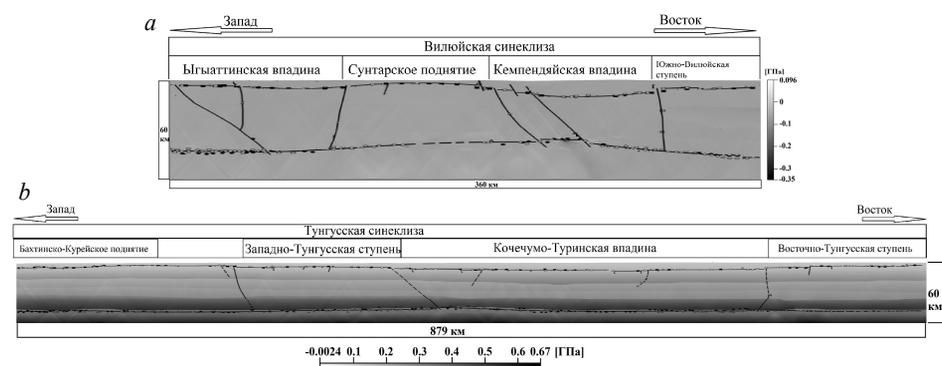
**Рис. 6.** Распределение пластической деформации в слоях литосферы на территориях Вилуйской (а) и Тунгусской (б) синеклиз вдоль геологического профиля «Кимберлит-1981»  
**Fig. 6.** Distribution of plastic strain in lithosphere layers in the areas of the (a) Vilyui and (b) Tunguska synclises along the Kimberlit-1981 geological profile

Распределения горизонтальных напряжений, представленные на рис. 7, определяются слоистой неоднородностью литосферы, а также сложением гравитационного вертикального сжатия с геодинамическим процессом горизонтального растяжения. Положительные значения горизонтальных напряжений сосредоточены вблизи земной поверхности в тех местах, где проявляются зоны разломов – на территориях Сунтарского поднятия, Ыгыаттинской впадины и на границе Кейпедянской впадины и Южно-Вилуйской ступени, а также Кочечумо-Туринской впадины и Западно-Тунгусской ступени. Эти районы выделены прямоугольниками на рис. 7. На протяжении всей глубинной структуры геологического объекта наблюдается неоднородность распределения горизонтальных напряжений, которая определяется изменением прочностных свойств литосферы с глубиной.



**Рис. 7.** Распределение горизонтальных напряжений в слоях земной коры и верхней мантии на территориях Вилуйской (а) и Тунгусской (б) синеклиз вдоль геологического профиля «Кимберлит-1981»  
**Fig. 7.** Distribution of horizontal stresses in layers of the Earth's crust and upper mantle in the areas of the (a) Vilyui and (b) Tunguska synclises along the Kimberlit-1981 geological profile

На рис. 8 представлено распределение отклонения рассчитанных значений давления от литостатического давления. Неравномерность распределения давления обусловлена не только слоистой неоднородностью земной коры и верхней мантии, но и зонами локализации неупругой деформации, что обусловлено следствием дилатансионных процессов при пластическом деформировании горных пород. На рис. 8, *a* наблюдаются отрицательные значения отклонений давления в районе границы Мохо, где она имеет максимальную кривизну, которая соответствует группе крупных разломов на границе Кемпендяйской впадины и Сунтарского поднятия. На территории Тунгусской синеклизы отрицательные значения отклонений давления наблюдаются в районах земной поверхности, соответствующих зонам положительных горизонтальных напряжений на рис. 7, *b*. Зоны пониженных давлений могут вызывать концентрацию флюидов и соответствующих природных ископаемых.



**Рис. 8.** Отклонение давления от литостатического давления в слоях литосферы на территориях Вилуйской (*a*) и Тунгусской (*b*) синеклиз вдоль геологического профиля «Кимберлит-1981»

**Fig. 8.** Deviation of pressure from lithostatic pressure in the lithosphere layers in the areas of the (*a*) Vilyuy and (*b*) Tungus synclises along the Kimberlit-1981 geological profile

### Заключение

Представлена математическая модель, позволяющая исследовать НДС и геотектонические процессы в литосфере. Для задания изменения параметров модели пластичности Друкера – Прагера – Николаевского с глубиной была использована прочностная модель «jelly sandwich», которая описывает сдвиговую прочность литосферы в условии равновесного состояния в соответствии с современными геофизическими данными. В результате компьютерного моделирования был выявлен ряд особенностей НДС, которые подтверждаются геофизическими данными в исследованных регионах. В ходе процесса растяжения на территории Вилуйской синеклизы в районах Сунтарского поднятия и на границе между Кейпендяйской впадиной и Южно-Вилуйской ступенью наблюдается локализация пластических деформаций, соответствующих местонахождению Лено-Вилуйской нефтегазовой провинции. На территории Тунгусской синеклизы в областях Западно-Тунгусской ступени, Кочечумо-Туринской впадины и Восточно-Тунгусской ступени локализация пластических деформаций соответствуют местонахождению Лено-Тунгусской нефтегазовой провинции. Положительные значения горизон-

тальных напряжений отмечены в верхних слоях земной коры также в районах залегания нефти и газа, которые относятся к Лено-Вилуйской и Лено-Тунгусской нефтегазовым провинциям. Стоит отметить, что наибольшие отрицательные отклонения вычисленного давления от литостатического давления в случае Вилуйской синеклизы наблюдаются в районе границы Мохо около системы крупных разломов на границе между Сунтарским поднятием и Кемпендйской впадиной. В случае Тунгусской синеклизы отрицательные отклонения давления соответствуют зонам концентрации положительных горизонтальных напряжений, которые в свою очередь соответствуют местоположениям полезных ископаемых. Полученный в результате моделирования рельеф земной поверхности соответствует по основным географическим особенностям (поднятия и впадины) реальному рельефу исследованных регионов, но отличается в деталях. Это свидетельствует о связи структурной неоднородности литосферы с формированием рельефа и существенном влиянии на него других факторов в ходе эволюции литосферы. Полученные в результате моделирования распределения давления могут частично дополнить геологическую информацию для анализа возможности фазовых превращений в горных породах в различных участках исследуемых регионов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Gerya T.* Precambrian geodynamics: Concepts and models // *Gondwana Research*. 2014. V. 25. P. 442–463. DOI: 10.1016/j.gr.2012.11.008.
2. *Stefanov Yu.P., Tataurova A.A.* Effect of friction and strength properties of the medium on shear band formation in thrust structures // *Physical Mesomechanics*. 2019. V. 22. No. 6. P. 463–472. DOI: 10.1134/S1029959919060031.
3. *Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых.* Т. 4. Сибирская платформа / под ред. Н.С. Малича, В.Л. Масайтиса, В.С. Суркова. Л.: Недра, 1987. 448 с.
4. *Makarov P.V., Smolin I.Yu., Peryshkin A.Yu., Kulkov A.S., Bakeev R.A.* Experimental and numerical investigation of the catastrophic stage of failure on different scales from rock sample to coal mine // *Physical Mesomechanics*. 2021. V. 24. No. 2. P. 155–165. DOI: 10.1134/S1029959921020053.
5. *Akhmetov A.Zh., Smolin I.Yu., Peryshkin A.Yu.* Numerical analysis of the state of stress and strain in the Yenisei Ridge based on the regional tectonic state in the Asian continent // *Fractura ed Integrita Strutturale*. 2019. V. 49. P. 190–200. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.49.20.
6. *Ахметов А.Ж., Смолин И.Ю.* Численное моделирование напряженно-деформированного состояния Якутско-Вилуйской 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.
7. *Проект КИМБЕРЛИТ-1981 – 1979.* Профиль г. Ханты-Мансийск – р. Лена // Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год. СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. С. 23–225. URL: <ftp://ftp.vsegei.ru/seism23.pdf>.
8. *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.
9. *Polyansky O.P., Prokopiev A.V., Koroleva O.V., Tomshin M.D., Reverdatto V.V., Selyatitsky A.Yu., Travin A.I., Vasiliev D.A.* Temporal correlation between dyke swarms and crustal extension in the middle Palaeozoic Vilyui rift basin, Siberian platform // *Lithos*. 2017. V. 282–283. P. 45–64. DOI: 10.1016/j.lithos.2017.02.020.
10. *Ismail-Zadeh A.T., Naimark B.M., Kostyuchenko S.L.* Quantitative modelling of the Tunguska basin evolution in the palaeozoic: a role of eclogitization within the uppermost mantle // *J. Geodynamics*. 1997. V. 23. No. 1. P. 47–64. DOI: 10.1016/S0264-3707(96)00019-1.

11. Мельников Н.В., Вымятнин А.А., Мельников П.Н., Смирнов Е.В. Возможности открытия новых крупных залежей нефти в главном поясе газонефтегазоносности Лено-Тунгусской провинции // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 5–6. С. 701–720. DOI: 10.15372/GiG20140502.
12. Фролов С.В., Карнюшина Е.Е., Коробова Н.И., Бакай Е.В., Курдина Н.С., Крылов О.В., Тарасенко А.А. Особенности строения, осадочные комплексы и углеводородные системы Лено-Вилуйского нефтегазоносного бассейна // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 2. С. 13–30. DOI: 10.18599/grs.2019.2.13-30.
13. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Кузнецов П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П., Ворошилов Я.С. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. Новосибирск: Академич. изд-во «Гео», 2007. 240 с.
14. Ребецкий Ю.Л. Современное напряженное состояние коры Кавказа по данным объединенного каталога механизмов очагов землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 1. С. 17–29. DOI: 10.5800/GT-2020-11-1-0459.
15. Burov E.B. Rheology and strength of lithosphere // Marine and Petroleum Geology. 2011. V. 28. Iss. 8. P. 1402–1443. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2011.05.008.
16. Turcotte D., Schubert G. Geodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 636 p.
17. Перчук А.Л., Плечов П.Ю., Сазонова Л.В., Сафонов О.Г., Тихомиров П.Л., Шур М.Ю. Основы петрологии магматических и метаморфических процессов. М.: КДУ; Университетская книга, 2015. 472 с.
18. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 246 p.
19. Google Earth Pro: [сайт]. URL: <https://earth.google.com/>

Статья поступила 03.08.2021

Akhmetov A.Z., Smolin I.Yu. (2022) COMPUTER MODELLING OF THE STATE OF STRESS AND STRAIN OF THE TUNGUSKA AND VILYUI SYNECLISES. *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

Keywords: stresses and strain allocation, numerical modelling, finite difference method, continental lithosphere, elastic-plastic media, Vilyui syncline, Tunguska syncline, “jelly sandwich” model, Kimberlit-1981 geological profile.

The states of stress and strain are numerically analyzed under conditions of the geodynamic process of tension in the south part of the Vilyui syncline and the middle part of the Tunguska syncline. Two-dimensional models of geological structures of the south part of the Vilyui syncline and the middle part of the Tunguska syncline are constructed based on the Kimberlit-1981 geological profile obtained using deep seismic sounding. To describe the plastic strain in the geomeia, the model of elastic-plastic media with the non-associated plastic flow rule based on the Drucker–Prager–Nikolaevskii model is used. In this model, the “jelly sandwich” strength model is adopted for the analysis of the stress state of the lithosphere. The results of the numerical modeling of the state of the stress and strain of the chosen parts of the Siberian Craton are presented. The localization of plastic strain, the region of positive values of horizontal stresses, and the negative deviation of the calculated pressure from the lithostatic pressure correspond to mineral deposits.

**Financial support.** The reported study was funded by the RFBR, project no. 19-31-90034. The computer program for realization of the study was performed according to the Government research assignment for the Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, project FWRW-2022-0003.

Ayan Zh. AKHMETOV (Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ayan.akhmetov93@gmail.com

Igor Yu. SMOLIN (Head of laboratory, Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: smolin@ispms.ru

## REFERENCES

1. Gerya T. (2014) Precambrian geodynamics: Concepts and models. *Gondwana Research*. 25(2). pp. 442–463.
2. 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.
3. *Geologicheskoye stroyeniye SSSR i zakonomernosti razmeshcheniya poleznykh iskopayemykh. Tom 4. Sibirskaya platforma* [Geological structure of the USSR and regularities in the localization of mineral deposits. Vol. 4. Siberian craton] (1987) Ed. by Malich N.S., Masaytis V.L., Surkov V.S. Leningrad: Nedra.
4. Makarov P.V., Smolin I.Yu., Peryshkin A.Yu., Kulkov A.S., Bakeev R.A. (2021) Experimental and numerical investigation of the catastrophic stage of failure on different scales from rock sample to coal mine. *Physical Mesomechanics*. 24(2). pp. 155–165. DOI: 10.1134/S1029959921020053.
5. Akhmetov A.Zh., Smolin I.Yu., Peryshkin A.Yu. (2019) Numerical analysis of the state of stress and strain in the Yenisei Ridge based on the regional tectonic state in the Asian continent. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 49. pp. 190–200. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.49.20.
6. Akhmetov A.Zh., Smolin I.Yu. (2021) Chislennoye modelirovaniye 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.
7. Проект KIMBERLIT-1981 – 1979. Profil' g. Khanty-Mansiysk – r. Lena. Atlas «Opornyye geologo-geofizicheskiye profili Rossii». [Kimberlit-1981 project. Khanty-Mansiysk city–Lena River profile. Reference geophysical profiles of Russia]. St. Petersburg: VSEGEI, 2013. pp. 23–225. URL: <ftp://ftp.vsegei.ru/seism23.pdf>
8. Cherepanova Yu., Artemieva I.M., Thybo H., Chemia 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.
9. Polyansky O.P., Prokoviev A.V., Koroleva O.V., Tomshin M.D., Reverdatto V.V., Selyatitsky A.Yu., Travin A.I., Vasiliev D.A. (2017) Temporal correlation between dyke swarms and crustal extension in the middle Palaeozoic Vilyui rift basin, Siberian platform. *Lithos*. 282–283. pp. 45–64. DOI: 10.1016/j.lithos.2017.02.020.
10. Ismail-Zadeh A.T., Naimark B.M., Kostyuchenko S.L. (1997) Quantitative modelling of the Tunguska basin evolution in the palaeozoic: a role of eclogitization within the uppermost mantle. *Journal of Geodynamics*. 23(1). pp. 47–64. DOI: 10.1016/S0264-3707(96)00019-1.
11. Mel'nikov N.V., Vymyatnin A.A., Mel'nikov P.N., Smirnov E.V. (2014) Predicted new large oil pools in the main petroliferous belt of the Lena-Tunguska province. *Russian Geology and Geophysics*. 55(5–6). pp. 544–561. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.05.003.
12. Frolov S.V., Karnyushina E.E., Korobova N.I., Bakay E.A., Kurdina N.S., Krylov O.V., Tarasenko A.A. (2019) Osobennosti stroyeniya, osadochnyye kompleksy i uglevodorodnyye sistemy Leno-Vilyuyskogo neftegazonosnogo basseyna [Features of the structure, sedimentary complexes, and hydrocarbon systems of the Leno-Vilyui oil and gas basin]. *Georesursy – Georesources*. 21(2). pp. 13–30. DOI: 10.18599/grs.2019.2.13-30.

13. 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 geosred* [Nonlinear mechanics of geomaterials and geomedial]. Novosibirsk: Geo.
14. Rebetsky Yu.L. (2020) Sovremennoye napryazhennoye sostoyaniye kory Kavkaza po dannym ob"yedinennogo kataloga mekhanizmov ochagov zemletryaseniya [The current state of crustal stresses in the Caucasus according to the unified catalogue of earthquake focal mechanisms]. *Geodinamika i tektonofizika – Geodynamics and Tectonophysics*. 11(1). pp. 17–29. DOI: 10.5800/GT-2020-11-1-0459.
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. Turcotte D., Schubert G. (2014) *Geodynamics (3<sup>rd</sup> ed.)*. Cambridge: Cambridge University Press.
17. Perchuk A.L., Plechov P.Yu., Sazonova L.V., Safonov O.G., Tikhomirov P.L., Shur M.Yu. (2015) *Osnovy petrologii magmaticheskikh i metamorficheskikh protsessov* [Foundations of petrology of magmatic and metamorphic processes]. Moscow: KDU, Universitetskaya kniga.
18. Wilkins M.L. (1999) *Computer Simulation of Dynamic Phenomena*. Berlin: Springer-Verlag.
19. *Google Earth Pro*: [site]. URL: <https://earth.google.com/>

Received: August 3, 2021