МЕХАНИКА

УДК 539.3,551.24
DOI 10.17223/19988621/69/5

А.Ж. Ахметов, И.Ю. Смолин

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЯКУТСКО-ВИЛЮЙСКОЙ ИЗВЕРЖЕННОЙ ПРОВИНЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ГЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИБИРСКОМ КРАТОНЕ[1]

Статья посвящена моделированию напряженно-деформированного состояния участка земной коры и верхней мантии. Объектом исследования является двумерная структурная компьютерная модель участка Якутско-Вилюйской крупной изверженной провинции (КИП), построенная на основе геологического профиля «Кратон-1980», полученного методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Для описания деформирования геосред применена упругопластическая модель с неассоциированным законом пластического течения, критерием текучести Друкера – Прагера – Николаевского и прочностной модели «jelly sandwich». Представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния выбранного участка Сибирского кратона. Полученная в расчетах локализация пластической деформации соответствует местонахождениям полезных ископаемых. Показано, что характер неоднородного распределения напряжений определяется наличием и кривизной слоёв земной коры и верхней мантии, а также реологическими свойствами геосреды.

Ключевые слова: *численное моделирование*, *напряженно-деформированное состояние*, *локализация неупругой деформации*, *упругопластическая среда*, *Якутско-Вилюйская крупная изверженная провинция* (*КИП*).

В настоящее время полностью не исследована природа формирования и изменения внешних и внутренних геологических структур земной коры. За многие миллионы лет внешняя земная структура не один раз подвергалась геологическим изменениям вследствие движения литосферных плит, которое вызвано циркуляцией мантии в глубоких недрах Земли [1]. Одним из методов определения эволюции движения литосферных плит и оценки равновесного состояния между земной корой и мантийным слоем является анализ напряженно-деформированного состояния глубинной структуры литосферы [2].

На территории Евразии находится один из самых больших блоков земной коры – Сибирский кратон. Многие учёные начиная с XIX века усиленно изучали структуру данной области, от первых полевых экспедиций в Сибирь до создания компьютерных структурных моделей всего геологического объекта в целом [3, 4]. Ввиду большой протяженности Сибирского кратона, в его внутренних областях

[1] Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90034.

выделяется ряд геологических объектов, на территориях которых наблюдаются такие геодинамические процессы, как коллизия, растяжения и сдвиги. Анализ геотектонических процессов на территории Енисейского кряжа, находящегося в состоянии коллизии, проведен нами ранее и представлен в работах [5, 6]. В данной статье в качестве объекта исследования была выбрана Вилюйская синеклиза, которую в ряде источников [7, 8] называют Якутско-Вилюйской крупной изверженной провинцией (КИП). Данная территория расположена в северо-восточной области Сибирского кратона, примыкает к Предверхоянскому краевому прогибу и граничит на севере и юге со склонами Анабарского массива и Байкало-Алданского щита, а на западе и юго-западе постепенно переходит в Ангаро-Ленский прогиб. На самой территории и на границах с прилегающими геологическими областями распространены зоны разломов. На территории Якутско-Вилюйской КИП находится Лено-Вилюйская нефтегазоносная провинция, которая является одним из богатейших месторождений нефти и газа на территории Российской Федерации [9]. Это определяет важность исследования этой области.

Цель данного исследования – разработать компьютерную модель, позволяющую оценить геотектонические процессы на основе анализа напряженно-деформированного состояния выбранного геологического объекта, и выявить связь между расположением областей локализации пластической деформации в слоях литосферы и местоположением залежей нефти и газа.

Структурная модель Якутско-Вилюйской КИП

В 80-х годах XX века на территории Якутско-Вилюйской КИП, входящей в состав Сибирского Кратона, были проведены геологические и геофизические исследования слоёв земной коры и верхней мантии в ходе проекта «Комплексного освоения земных недр СССР» [10]. На рис. 1 показана ориентация геологического профиля «Кратон-1980» общей протяженностью около 3500 км, полученного методом глубинного сейсмического зондирования. Черным прямоугольником выделена часть геологического разреза, которая проходит по территории Якутско-Вилюйской КИП.

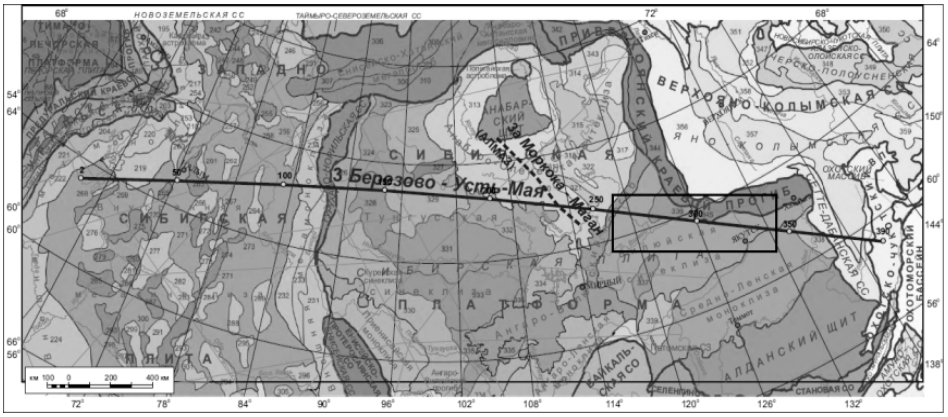

Рис. 1. Ориентация геологического профиля «Кратон-1980» на геолого-структурной карте России [11]
Fig. 1. Orientation of the geological profile “Craton-1980” on the geological and structural map of Russia [11]

Особенность ориентации геологического профиля «Кратон-1980» в том, что он проходит по территории Лено-Вилюйской нефтегазовой провинции, которая является одним из крупнейших месторождений нефти и газа в Якутии (рис. 1 и 2) [12].

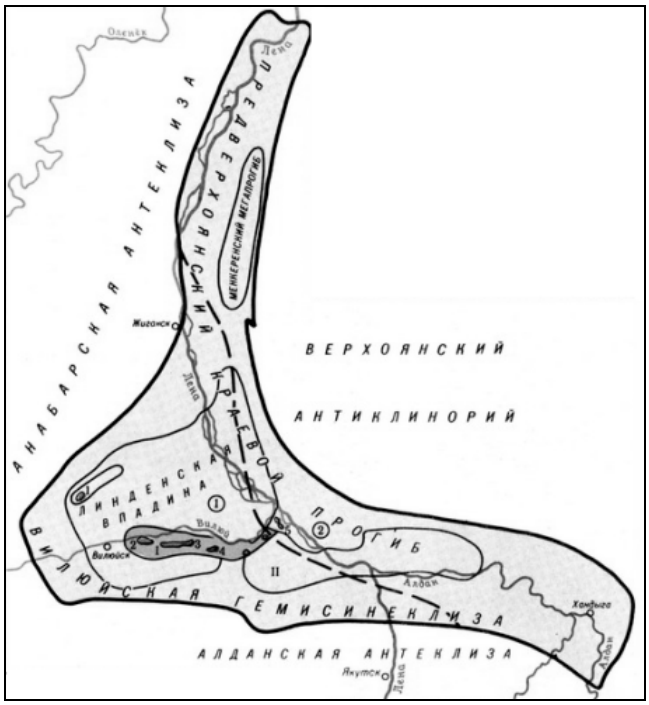

Рис. 2. Лено-Вилюйская газонефтеносная провинция [13]. Цифрами обозначены структурные элементы: I – Хапчагайский мегавал, II – Лунгхинско-Келинский мегапрогиб; нефтегазоностные области (цифры в кружочках): *1* – Вилюйская, *2* – Предверхоянская; месторождения: *1* – Среднетюнгское, *2* – Средневилюйское, *3* – Толон-Мастахское, *4* – Соболох-Недлинское, *5* – Усть-Вилюйское. Черной прерывистой линией показаны границы нефтегазоносных областей

Fig. 2. Leno-Viluyi gas- and oil-bearing province [13]. The numbers indicate structural elements: I – Hapchagai megalithic bank and II – Lungkhinsko-Kelinsky mega-trough; oil- and gas-bearing areas (circled numbers): (*1*) Vilyui and (2) Pre-Verkhoyansk; deposits: *1*, Srednetyungskoe; *2*, Srednevilyuyskoe; *3*, Tolon-Mastakhskoe; *4*, Sobolokh-Nedlinskoe; and *5*, Ust-Vilyuyskoe. The black dashed line indicates the boundaries of the oil- and gas-bearing areas

На рис. 3 представлена часть геологического профиля «Кратон-1980» с геофизическими данными, полученными методом ГСЗ, отражающая неоднородную глубинную структуру исследуемого региона. Протяженность данного участка профиля равна 475 км, а глубина – 60 км. Регистрация сейсмических волн осуществлялась аналоговыми стациями «Тайга» и «Черепаха» с трёхкомпонентными

сейсмоприемниками НСП-3. Шаг пунктов приёма – 10 км. Длина годографа 200–1050 км [14]. Зарегистрировано около 1500 аналоговых сейсмограмм, из которых оцифровано и принято для дальнейшей работы 1488 сейсмограмм (730 сейсмограмм – при возбуждении ядерными взрывами, 758 сейсмограмм – при возбуждении химическими взрывами) [15]. Условные знаки геофизических данных представлены в атласе [11].

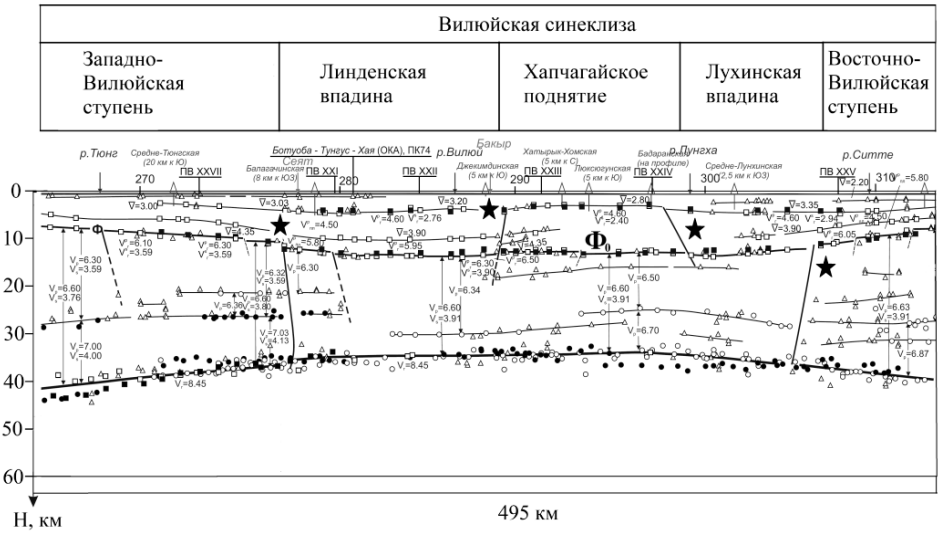

Рис. 3. Часть геологического профиля «Кратон-1980», охватывающая всю территорию Вилюйской синеклизы
Fig. 3. A part of the geological profile “Craton-1980” comprising the entire territory of the Vilyuy Syneclise

На рис. 3 наблюдается глубокий прогиб кристаллического фундамента, обозначенный буквой $\mathbf{\Phi_0}$, который простирается вдоль профиля на глубине 7 км от земной поверхности в левой и правой сторонах профиля и далее опускается до 15–18 км в глубину в середине профиля. Верхний слой земной коры, граничащий непосредственно с кристаллическим фундаментом, является Вилюйским осадочным бассейном, который накапливался в течение миллионов лет. Весь геологический профиль разделён на серию блоков, которые отделяются друг от друга сквозными разломами – они обозначены на профиле субвертикальными сплошными линиями, обозначенными звездочками. Также на рис. 3 видно продольное расслоение осадочного чехла на глубине 4–8 км, но мы не будем учитывать данную особенность структуры чехла ввиду малого различия значений скоростей продольных и поперечных волн. На данном рисунке отчётливо видны сквозные разломы, которые разделяют весь профиль на серию обозначенных блоков, из которых состоит Якутско-Вилюйская КИП. Это Западно-Вилюйская ступень, Линденская впадина, Хапчагайское поднятие, Лунхинская впадина, Восточно-Вилюйская ступень. Ниже на глубине 46 км выявлена граница Мохо (**М**), обозначенная черной толстой линией, которая отделяет земную кору от верхней мантии. Она имеет форму, симметричную с границей кристаллического фундамента. Гра-

ница Мохо простирается вдоль профиля на глубине 40–42 км в левой и правой стороне профиля и поднимается до глубины 37 км в середине профиля. Вследствие такого расположения границы Мохо и границы, разделяющей кристаллический фундамент с осадочным чехлом, внутренние глубинные слои земной коры, лежащие на глубинах 20–40 км, являются сильно деформированными.

На основе вышеуказанных геофизических данных была создана двумерная структурная модель исследуемого региона, представленная на рис. 4.

Рис. 4. Компьютерная структурная модель Якутско-Вилюйской КИП вдоль геологического профиля «Кратон-1980»
Fig. 4. A computer structural model of the Yakutsk-Vilyui LIP along the geological profile “Craton-1980”

В этой модели отражена слоистая неоднородность земной коры и верхней мантии. Слои отличается своими физико-механическими свойствами. В ходе численного моделирования такая структура будет обуславливать неоднородность напряженного состояния и локализацию неупругой деформации, которые могут повлиять на образование местонахождений полезных ископаемых. Упругие свойства каждого из слоёв земной коры и верхней мантии представлены в таблице. Они были определены по геофизическим данным геологического профиля «Кратон-1980».

Упругие свойства слоёв земной коры и верхней мантии геологического профиля «Кратон-1980»

	Осадочный слой	Слой 2	Слой 3	Слой 4	Слой 5	Слой 6	Верхняя мантия
Плотность, г/см^3	2.684	2.78	2.81	2.93	3.05	3.25	3.4
Модуль сдвига, ГПа	33.67	35.43	36.52	41.64	46.98	44.25	40.25
Модуль всестороннего сжатия, ГПа	52.22	58.73	63.12	66.07	66.57	78.73	80.73

Математическая постановка задачи

В основе математической постановки задачи о расчете напряженно-деформированного состояния и движения элементов земной коры лежат фундаментальные уравнения механики деформируемого твердого тела и определяющие соотношения. К фундаментальным уравнениям относятся законы сохранения массы, импульса и энергии [16]:

$$\rho_0 V_0 = \rho V\,; \tag{1}$$

$$\rho \ddot{u}_i = \sigma_{ij,j} + \rho g_i\,; \tag{2}$$

$$\dot{E} = \sigma_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}\,. \tag{3}$$

Здесь ρ_0, ρ – начальное и текущее значение плотности среды, V_0, V – начальное и текущее значение объема некоторой малой области среды, u_i – компоненты вектора перемещения, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, g_i – компоненты ускорения свободного падения, E – внутренняя энергия единицы начального объема, ε_{ij} – компоненты тензора деформаций. Точка над символом обозначает материальную производную по времени, запятая в нижнем индексе – частную производную по соответствующей пространственной координате.

Для описания упругопластического деформирования среды принимается гипотеза аддитивного разложения полного тензора деформаций и тензора скоростей деформаций на упругую и пластическую составляющие

$$\dot{\varepsilon}^e_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}^p_{ij}\,. \tag{4}$$

Определяющие соотношения первой группы задают связь между напряжениями и упругими деформациями и ниже записаны в скоростной форме, когда скорость напряжений пропорциональна скорости упругой деформации

$$\frac{Ds_{ij}}{Dt} = 2\mu\left(\dot{\varepsilon}^e_{ij} - \frac{1}{3}\dot{\varepsilon}^e_{kk}\delta_{ij}\right), \tag{5}$$

$$\dot{P} = -K\dot{\varepsilon}^e_{kk}\,, \tag{6}$$

где

$$\sigma_{ij} = (-P\delta_{ij} + s_{ij})\,; \tag{7}$$

$$\frac{Ds_{ij}}{Dt} = \dot{s}_{ij} - s_{ik}\dot{\omega}_{jk} - s_{jk}\dot{\omega}_{ik}\,; \tag{8}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i})\,; \tag{9}$$

$$\dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} - \dot{u}_{j,i})\,, \tag{10}$$

s_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений; P – давление; δ_{ij} – символ Кронеккера; $\frac{D}{Dt}$ – означает вращательную производную по времени (производную

Яуманна); μ – модуль сдвига; K – модуль всестороннего сжатия; $\dot{\omega}_{ij}$ – компоненты псевдотензора скорости вращения.

Целью определяющих уравнений второй группы является определение скорости пластической деформации. В качестве основы взята теория пластического течения, согласно которой компоненты тензора скорости пластических деформаций задаются законом пластического течения [16]

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{p} = \dot{\lambda}\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}. \tag{11}$$

Мы будем использовать модель Друкера – Прагера – Николаевского с неассоциированным законом течения, позволяющим независимо описывать процессы дилатансии и внутреннего трения. Предельная поверхность напряжений записана в виде условия Друкера – Прагера

$$f = \frac{\alpha}{3}J_1 + J_2^{1/2} - Y = 0\,, \tag{12}$$

где f – поверхность текучести; J_1 – первый инвариант тензора напряжений; J_2 – второй инвариант девиатора тензора напряжений; Y –когезия; α – коэффициент внутреннего трения.

В случае неассоциированного закона течения пластический потенциал не совпадает с функцией пластичности и в соответствии с теорией Николаевского принимается в виде

$$g(\sigma_{ij}) = J_2 + \frac{\Lambda}{3}J_1\left(2Y - \frac{\alpha}{3}J_1\right) + const\,, \tag{13}$$

где Λ – коэффициент дилатансии.

Компоненты скоростей неупругой деформации определяются законом пластического течения (11) и будут иметь в случае потенциала (13) вид, определяемый уравнениями

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{p} = \left(s_{ij} + \frac{2}{3}\Lambda\left(Y - \frac{\alpha}{3}J_1\right)\delta_{ij}\right)\dot{\lambda}\,, \tag{14}$$

где $\dot{\lambda}$ – безразмерный скалярный множитель в теории пластичности.

В рамках модели Друкера – Прагера, сдвиговая прочность среды характеризуется следующим выражением:

$$J_2^{1/2} = Y + \alpha \cdot P\,. \tag{15}$$

Прочность геосреды меняется в зависимости от многих факторов, среди которых можно выделить такие, как температура, наличие и количество флюидов, состав горных пород и т.д. В настоящее время многими учёными для оценки напряженного состояния литосферы используется модель, которую называют «jelly sandwich» [17]. Её можно использовать для задания изменения параметров прочностной модели Друкера – Прагера – Николаевского в зависимости от глубины и слоев земной коры и верхней мантии.

На рис. 5 представлено распределение сдвиговой прочности литосферы, коэффициента внутреннего трения и когезии в зависимости от глубины слоёв земной коры и верхней мантии в соответствии с моделью «jelly sandwich» для континентальной литосферы.

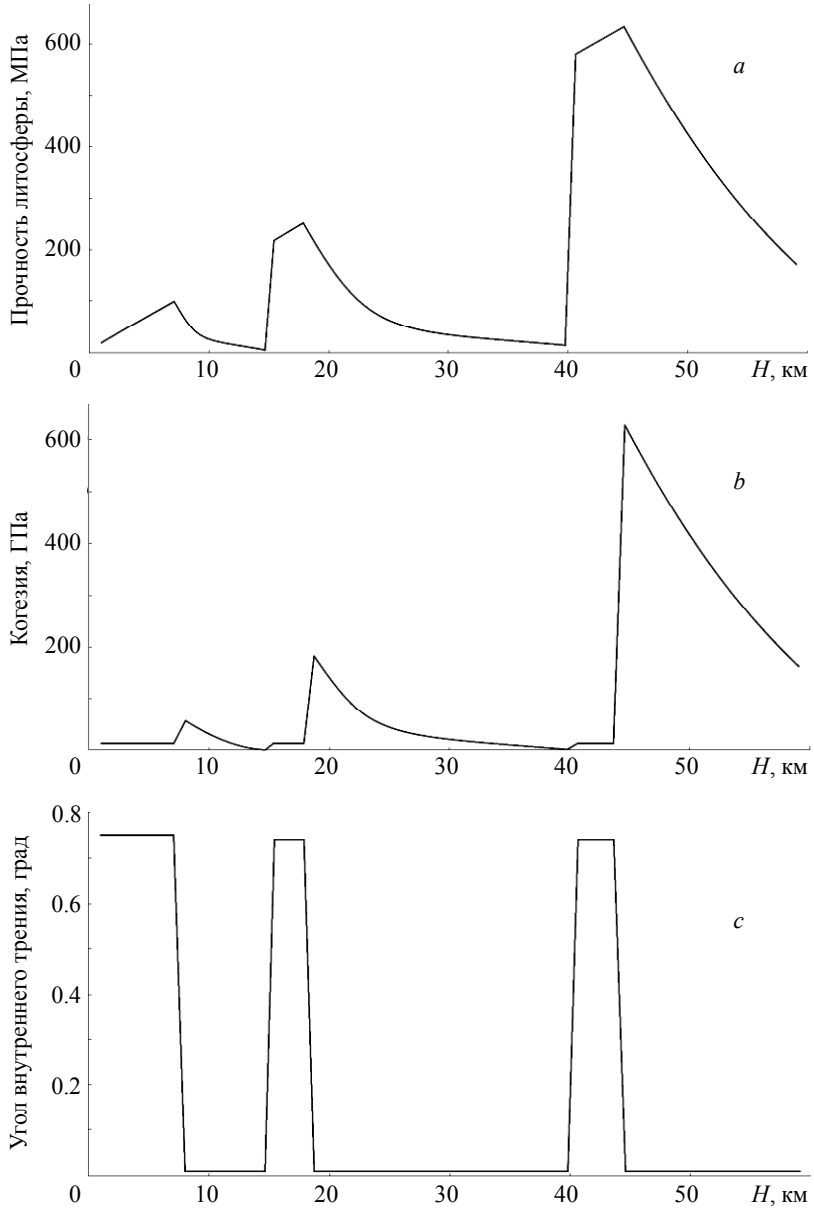

Рис. 5. Распределение прочности литосферы (*a*), когезии (*b*) и коэффициента внутреннего трения (*c*) в зависимости от глубины слоёв земной коры и верхней мантии
Fig. 5. Distribution of the (*a*) strength of lithosphere, (*b*) cohesion, and (*c*) internal friction coefficient in accordance with depth of layers of the earth's crust and upper mantle

Как видно из рис. 5, *a*, прочность литосферы характеризуется чередованием зон увеличения и уменьшения прочностных свойств слоёв земной коры и верхней мантии, для того чтобы соблюсти условие равновесного напряженного состояния литосферы в условиях влияния тепловых потоков от мантийного слоя. Как можно

заметить, зоны упрочнения и разупрочнения имеют разную протяженность. В нашем случае, во-первых, это связано с расположением слоёв литосферы в геологическом профиле и их физико-механическими свойствами. А во-вторых, влиянием тепловых эффектов из мантийного слоя на деформированные глубинные слои литосферы выше границы Мохо на уровне глубин 20–40 км. Важной характеристикой данной зависимости является давление, которое растет с увеличением глубины. Величина когезии (сцепления), проиллюстрированная на рис. 5, *b*, также влияет на характер изменения прочностных свойств, и именно поэтому в зоне упрочнения она имеет постоянное значение, а в зонах разупрочнения – падает по квадратичному закону. Значение коэффициента внутреннего трения на рис. 5, *c* меняется в зависимости от зон увеличения и уменьшения прочности.

Прикладываемые в расчетах граничные условия представлены на рис. 6. Выбор граничных условий соответствует геодинамической ситуации на территории Якутско-Вилюйской КИП, где происходит процесс растяжения, возникающий в результате действия мантийного плюма на земную кору [18].

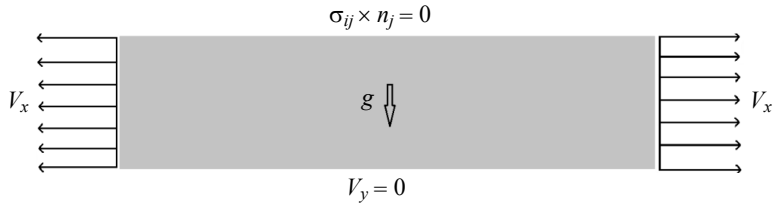

Рис. 6. Схема граничных условий для численного эксперимента
Fig. 6. Schematic representation of boundary conditions for a numerical experiment

Как видно из рис. 6, мы будем проводить компьютерное моделирование геотектонического процесса растяжения, при этом верхняя граница расчетной области является земной поверхностью и свободна от напряжений, а на нижней границе вертикальные перемещения запрещены.

На рис. 7 представлены графики плавного изменения ускорения свободного падения и горизонтальной скорости растяжения в зависимости от времени, позволяющие снизить влияние динамических эффектов применяемого конечно-разностного метода Уилкинса при расчете равновесного напряженно-деформированного состояния исследуемой области [19].

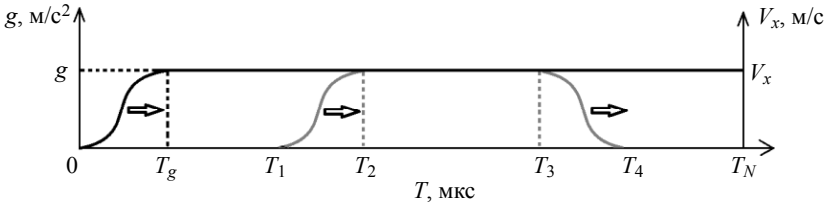

Рис. 7. Изменение ускорения свободного падения и скорости растяжения как функции времени в ходе численного моделирования
Fig. 7. Variation of the gravitational acceleration and horizontal tensile velocity as the functions of time in the numerical modeling

Результаты моделирования и их обсуждение

Вначале были проведены тестовые расчеты на сходимость получаемых результатов численного моделирования при разных размерах ячеек разностной сетки. Результаты исследования представлены в виде графиков на рис. 8.

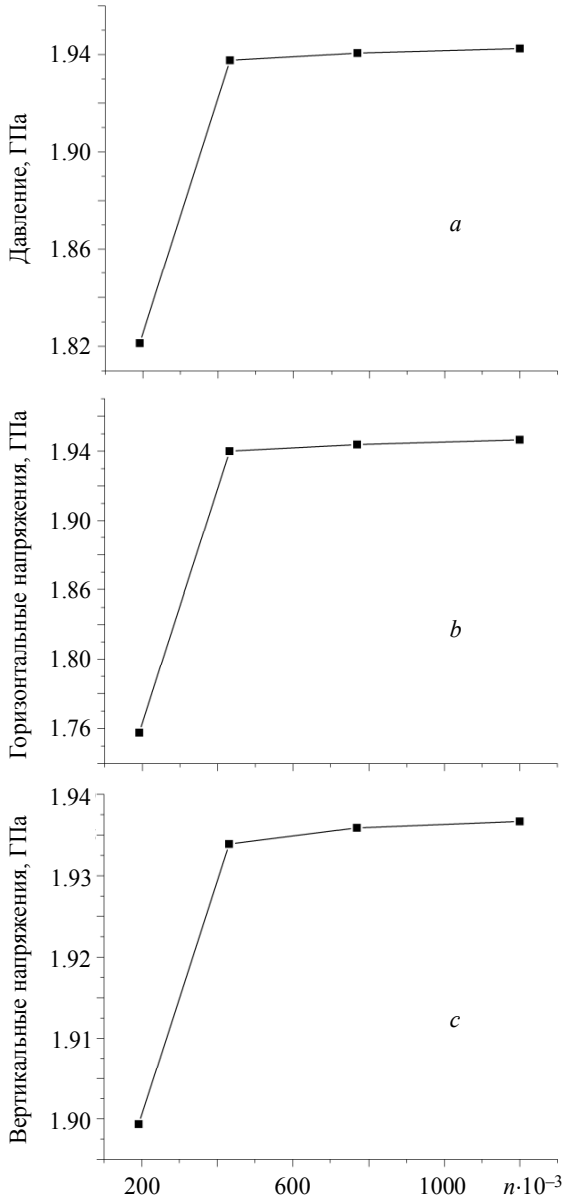

Рис. 8. Максимальные значения горизонтальных напряжений (*a*), давления (*b*), вертикальных напряжений (*c*) в зависимости от числа ячеек расчётной сетки
Fig. 8. Maximum values of (*a*) horizontal stresses, (*b*) pressure, and (*c*) vertical stresses versus the number of computational mesh cells

На основе полученных результатов была выбрана расчётная сетка с 432000 элементами, так как она способна дать достаточно точные результаты моделирования и сэкономить вычислительную мощность компьютера. Используя выбранную расчётную сетку, было выполнено численное моделирование процесса растяжения выбранного участка Якутско-Вилюйской изверженной провинции.

На рис. 9 представлено распределение давления в слоях литосферы. Неравномерность распределения давления обусловлена не только влиянием силы тяжести, что приводит к линейному росту давления с глубиной, но и слоистой неоднородностью земной коры и верхней мантии. Следует также отметить, что в нашем случае общее давление является суммой литостатического давления (за счет действия силы тяжести) и тектонического избыточного давления, вызванного горизонтальным растяжением. Ещё одной особенностью полученного распределения давления является применение прочностной модели «Jelly Sandwich», что приводит к чередованию слоев повышенного и пониженного давления с глубиной. Максимальные значения давления сосредоточены в районе верхней мантии.

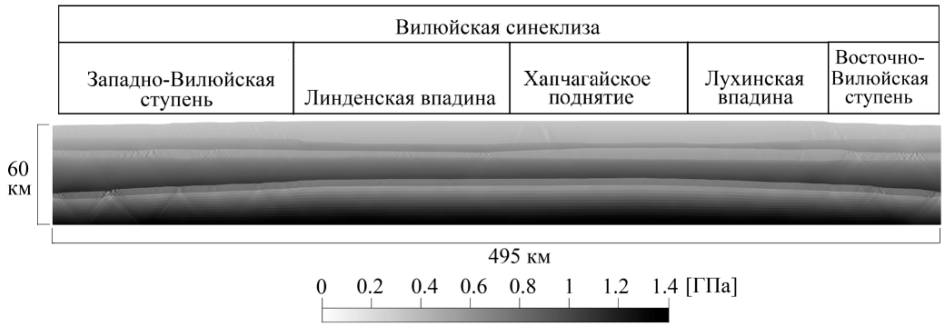

Рис. 9. Распределение давления в слоях литосферы на территории Якутско-Вилюйской КИП вдоль геологического профиля «Кратон-1980»
Fig. 9. Pressure distribution in the lithosphere layers in the area of the Yakutsk-Vilyui LIP along the geological profile “Craton-1980”

Представленное на рис. 10 распределение интенсивности пластических деформаций свидетельствует о том, что в результате растяжения сильно деформируются глубинные и поверхностные слои граничных районов Якутско-Вилюйской КИП, такие, как Западно-Вилюйская и Восточно-Вилюйская ступени. Области локализации неупругой деформации также сосредоточены в верхних приповерхностных слоях земной коры, в областях Линденской впадины и Хапчагайского поднятия, являющихся одними из основных газоносных районов в Якутии. Данные области локализации деформаций являются продолжением распространения полос локализации пластических деформаций, возникших в глубинных областях у границы Мохо. Можно также выделить два слоя локализации неупругой деформации вдоль глубин 40 и 20 км, являющиеся местами переходов режимов упрочнения и разупрочнения в глубинной зависимости прочностных свойств слоёв земной коры и верхней мантии. Данные выводы подтверждаются распределениями сдвиговых напряжений, представленными на рис. 11.

Основные очаги концентрации сдвиговых напряжений совпадают с районами локализации пластической деформации. В районах Линденской впадины и Хапчагайского поднятия наблюдается концентрация сдвиговых напряжений, сосредото-

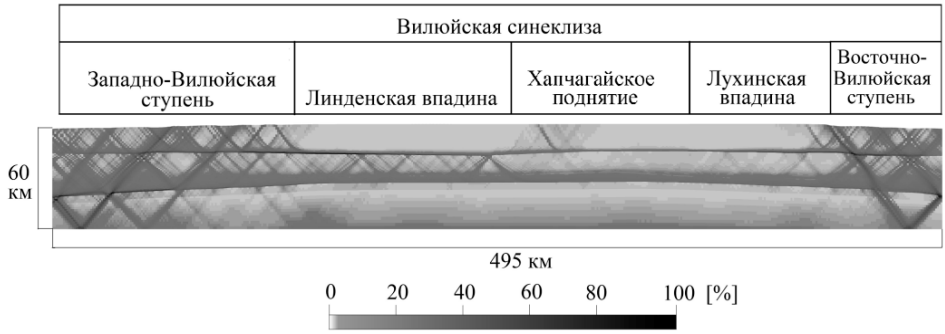

Рис. 10. Распределение пластической деформации в слоях литосферы на территории Якутско-Вилюйской КИП вдоль геологического профиля «Кратон-1980»
Fig. 10. Plastic strain distribution in the lithosphere layers in the area of the Yakutsk-Vilyui LIP along the geological profile “Craton-1980”

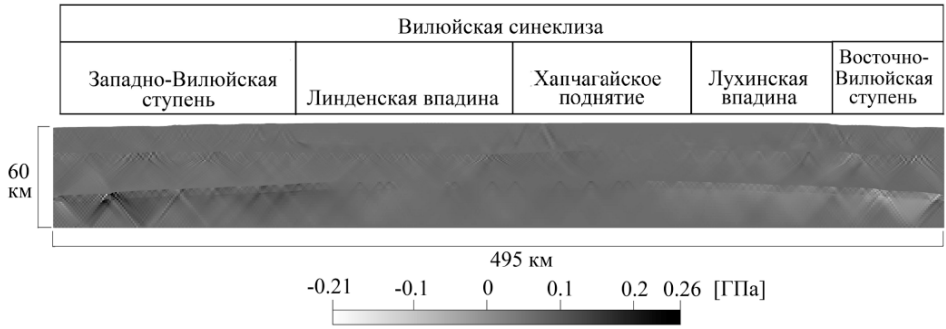

Рис. 11. Распределение сдвиговых напряжений в слоях литосферы на территории Якутско-Вилюйской КИП вдоль геологического профиля «Кратон-1980»
Fig. 11. Shear stress distribution in the lithosphere layers in the area of the Yakutsk-Vilyui LIP along the geological profile “Craton-1980”

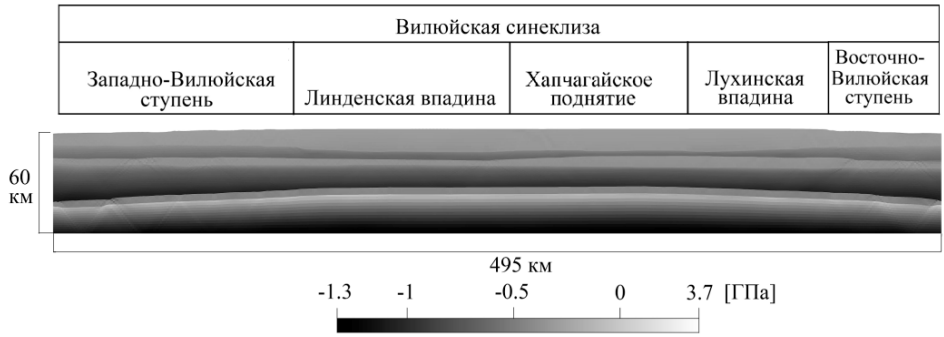

Рис. 12. Распределение горизонтальных напряжений в слоях земной коры и верхней мантии на территории Якутско-Вилюйской КИП вдоль геологического профиля «Кратон-1980»
Fig. 12. Pressure distribution in the lithosphere layers in the area of the Yakutsk-Vilyui LIP along the geological profile “Craton-1980”

ченная в районе осадочного чехла. Основными факторами, определяющими возникновение максимальных сдвиговых напряжений в этих районах, являются процесс растяжения и кривизна слоёв земной коры и верхней мантии.

Особенности распределения горизонтальных напряжений, представленного на рис. 12, определяются используемой прочностной зависимостью литосферы, проиллюстрированной на рис. 5, *а*, где наблюдается чередование зон упрочнения и разупрочнения слоёв земной коры.

Максимальные значения отрицательных горизонтальных напряжений сосредоточены в районе верхней мантии ниже границы Мохо, где превалирует общее сжатие за счет роста давления с глубиной. На протяжении всего глубинного слоя геологического объекта наблюдается неоднородность распределения горизонтальных напряжений, которая определяется изменением прочностных свойств литосферы под действием тепловых эффектов, возникающих из мантийного слоя. На границе Мохо наблюдаются максимальные положительные горизонтальные напряжения, вызванные резким изменением прочностных свойств между слоями земной коры и верхней мантией.

Заключение

Представлена математическая модель, позволяющая исследовать напряженно-деформированное состояние и геотектонические процессы в литосфере. Для задания изменения параметров упругопластической модели Друкера – Прагера – Николаевского с глубиной использована модель напряженного состояния слоёв земной коры и верхней мантии, именуемая «jelly sandwich», которая основана на фундаментальных геологических представлениях о физических свойствах литосферы. Эта модель ранее была успешно применена для анализа напряженно-деформированного состояния в случае процесса сжатия на территории Енисейского кряжа, а в данной статье – в случае процесса растяжения в Якутско-Вилюйской изверженной провинции. Построена компьютерная структурная модель участка Якутско-Вилюйской КИП вдоль геологического профиля «Кратон-1980».

В результате компьютерного моделирования были выявлены и подтверждены ряд геофизических особенностей, которые наблюдаются в районе Якутско-Вилюйской крупной изверженной провинции. В ходе процесса растяжения в районах Лухинской впадины и Хапчагайского поднятия наблюдаются зоны концентрации сдвиговых напряжений и локализации пластических деформаций, соответствующие местонахождениям залежей нефти и газа в Якутии. Компоненты напряжений имеют неоднородные распределения, обусловленные зависимостями прочностных свойств, отражающими структурную неоднородность континентальной литосферы и воздействие тепла из мантийного слоя. Полученные в результате моделирования распределения давления могут частично дополнить геологическую информацию для анализа возможности фазовых превращений в горных породах в различных участках исследуемого региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вегенер А.* Происхождение материков и океанов / пер. с нем. П.Г. Каминского под ред. П.Н. Кропоткина. Л.: Наука, 1984. 285 с.
2. *Burov E.B.*, *Watts A.B.* The long-term strength of continental lithosphere: “jelly sandwich” or “Crème brulee” // GSA Today. 2006. V. 16. No. 1. P. 4–10. DOI: 10.1130/1052-5173(2006)016<4:tltSOc>2.0.cO;2.

3. *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.
4. *Cherepanova Y.*, *Artemieva I.M.* Density heterogeneity of the cratonic lithosphere: A case study of the Siberian Craton // Gondwana Research. 2015. V. 28. P. 1344–1360. DOI: 10.1016/j.gr.2014.10.002.
5. *Akhmetov A.Zh.*, *Smolin I.Yu.*, *Peryshkin Al.Yu.* 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 Integrita Strutturale. 2019. V. 49. P. 190–200. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.49.20.
6. *Akhmetov A.Zh*, *Smolin I.Yu.* Analysis of stress and strain of earth's crust layers in the Yenisei Ridge // AIP Conference Proccedings. 2019. V. 2167. P. 02004-1 – 02004-4. DOI: 10.1063/1.5131871.
7. *Polyansky O.P.*, *Prokopiev A.V.*, *Koroleva O.V.*, *Tomshin M.D.*, *Reverdatto V.V.*, *Selyatitsky A.Yu.*, *Travin Al.V*, *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.
8. *Павленкова Н.И.*, *Павленкова Г.А.* Строение земной коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами. М. ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2014. 192 с.
9. *Соколов Б.А.*, *Сафронов А.Ф.*, *Трофимук А.Ан.*, *Фрадкин Г.С.*, *Бакин В.Е.*, *Каширцев В.А.*, *Япаскурт О.В.*, *Изосимова А.Н.* История нефтегазообразования и нефтегазонакопления на востоке Сибирской платформы. М.: Наука, 1986. 167 с.
10. *Козловский Е.А.* Комплексная программа изучения земных недр // Советская геология. 1982. № 9. С. 3–12.
11. Проект КРАТОН-1980 – 1978. Профиль п. Березево – п. Усть-Мая [Электронный ресурс] // 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: ftp://ftp.vsegei.ru/seism21.pdf
12. *Сафронов А.Ф.*, *Сивцев А.И.*, *Черненко В.Б.* Нефтеносность нижнемезозойских отложений Хапчагайского мегавала Вилюйской синеклизы // Геололгия и геофизика. 2014. Т. 55. № 8. С. 1263–1269.
13. *Нефтяные* и газовые месторождения СССР: Справочник: в 2 кн. / под ред. С.П. Максимова. Книга вторая. Азиатская часть СССР. М.: Недра, 1987. 303 с.
14. *Мильштейн Е.Д.*, *Ронин А.Л.* Разработка геологометодических основ создания Государственной сети опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин / ФГУП «ВСЕГЕИ». СПб., 2010. ФГУ НПП «Росгеолфонд». № 497344. Л. 376.
15. *Федин А.Д.* Геологический отчет о выполнении работ за 2005 г. по объекту «Формирование и ведение федерального банка геологической информации и государственного банка цифровой геологической информации» / Госконтракт № Ал-0206/3. ФГУ НПП «Росгеолфонд». М., 2005. ФГУ НПП «Росгеолфонд». № 485241. Л. 31.
16. *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.
17. *Burov E.B.* Rheology and strength of lithosphere // Marine and Petroleum Geology. 2011. V. 28. P. 1402–1443. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2011.05.008.
18. *Сим Л.А.*, *Гордеев Н.А.*, *Маринин А.В.* Новейшая геодинамика восточной окраины Сибирской платформы // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 4. С. 280–289. DOI: 10.30730/2541-8912.2018.2.4.280-289.
19. *Wilkins M.L.* Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 246 p.

Статья поступила 03.06.2020

Akhmetov A.Zh., Smolin I.Yu. (2021) 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]. pp. 53–68

DOI 10.17223/19988621/69/5

Keywords: numerical modeling, stress-strain state, localization of non-elastic strain, elasto-plastic medium, Yakutsk-Vilyui large igneous province (LIP).

Stress and strain distributions in the Yakutsk-Vilyui large igneous province (LIP) are numerically simulated under geotectonic extension. A two-dimensional model of the geological structure of a part of the Yakutsk-Vilyui LIP is developed using the geophysical data from the profile “Craton-1980”. However, these geophysical data can only be a source of the geometrical model and elastic properties of Earth’s layers. To describe non-elastic strains during the geological process, the Drucker-Prager-Nikolaevsky model of plasticity is adopted. For elasto-plastic analysis of the geotectonic process, the “Jelly Sandwich” shear strength model for the continental lithosphere is used, which is based on the variation of the strength properties with depth. Zones of shear stress concentration and plastic strain localization are observed as a result of the extension in the Lindenskaya basin and Khapchagaiskaya reclamation complying with oil and gas deposit locations in the Yakutia region. Stress components have non-linear distributions determined by the dependence of strength properties on the depth and structural inhomogeneity of continental lithosphere. The pressure distribution obtained in the simulation can partially complement the geological information employed when analyzing the possibility of phase transitions in the rocks in different locations of the studied region.

Financial support. The reported study was funded by RFBR, project No. 19-31-90034.

Ayan Zh. AKHMETOV (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ayan.akhmetov93@gmail.com

Igor Yu. SMOLIN (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: smolin@ispms.ru

REFERENCES

1. Wegener A. (1966) *The Origin of Continents and Oceans*. New York: Dover.
2. Burov E.B., Watts A.B. (2006) The long-term strength of continental lithosphere: “Jelly Sandwich” or “Crème Brulee”. *GSA Today*. 16(1). pp. 4–10. DOI: 10.1130/1052-5173(2006)016<4:tltSOc>2.0.cO;2.
3. 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.
4. Cherepanova Yu., Artemieva I.M. (2015) Density heterogeneity of the cratonic lithosphere: A case study of the Siberian Craton. *Gondwana Research*. 28. pp. 1344–1360. DOI: 10.1016/j.gr.2014.10.002.
5. Akhmetov A.Zh., Smolin I.Yu., Peryshkin Al.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 Integrita Strutturale*. 49. pp. 190–200. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.49.20.
6. Akhmetov A.Zh, Smolin I.Yu. (2019) Analysis of stress and strain of earth’s crust layers in the Yenisei Ridge. *AIP Conference Proccedings*. 2167. pp. 02004-1–02004-4. DOI: 10.1063/1.5131871.
7. Polyansky O.P., Prokopiev A.V., Koroleva O.V., Tomshin M.D., Reverdatto V.V., Selyatitsky A.Yu., Travin Al.V, 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.

8. Pavlenkova N.I., Pavlenkova G.A. (2014) *Stroenie zemnoy kory i verkhney mantii Severnoy Evrazii po dannym seysmicheskogo profilirovaniya s yadernymi vzryvami* [The Earth's crust and upper mantle structure of Northern Eurasia from the seismic profiling with nuclear explosions]. Moscow: GEOKART-GEOS.
9. Sokolov B.A., Safronov A.F., Trofimuk A.An., Fradkin G.S., Bakin V.E., Kashirtsev V.A., Yapaskurt O.V., Izosimova A.N. (1986) *Istoriya neftegazoobrazovaniya i neftegazonakopleniya na vostoke Sibirskoy platformy* [The history of oil and gas production and accumulation in the east of the Siberian Platform]. Moscow: Nauka.
10. Kozlovskiy E.A. (1982) Kompleksnaya programma izucheniya zemnykh nedr [Comprehensive program for Earth's interior study]. *Sovetskaya geologiya – Soviet Geology*. 9. pp. 3–12.
11. Proekt KRATON-1980–1978. Profil' p. Berezevo – p. Ust'-Maya [Project CRATON-1980–1978. Profile of v. Berezevo – v. Ust-Maya] (2013) *Atlas «Opornye geologo-geofizicheskie profili Rossii». Glubinnye seysmicheskie 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: ftp://ftp.vsegei.ru/seism21.pdf.
12. Safronov A.F., Sivtsev A.I., Chernenko V.B. (2014) Oil potential of the Lower Mesozoic deposits of the Khapchagai megaswell of the Vilyui syneclise. *Russian Geology and Geophysics*. 55(8). pp. 1003–1008. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.07.007.
13. *Neftyanye i gazovye mestorozhdeniya SSSR* [Oil and gas fields in the USSR] (1987) Spravochnik. v dvukh knigakh. Pod red. S.P. Maksimova. Kniga vtoraya. Aziatskaya chast' SSSR [Handbook in two books. Ed. by S.P. Maximov. Second book. Asian part of the USSR]. Moscow: Nedra.
14. Mil'shteyn E.D., Ronin A.L. (2010) *Razrabotka geologometodicheskikh osnov sozdaniya Gosudarstvennoy seti opornykh geologo-geofizicheskikh profiley*, *parametricheskikh i sverkhglubokikh skvazhin* [Development of geological and methodological foundations for the creation of the State network of reference geological and geophysical profiles, parametric and ultra-deep wells]. No. 497344. Saint Petersburg: VSEGEI.
15. Fedin A.D. (2005) *Geologicheskiy otchet o vypolnenii rabot za 2005 g. po ob"ektu «Formirovanie i vedenie federal'nogo banka geologicheskoy informatsii i gosudarstvennogo banka tsifrovoy geologicheskoy informatsii»* [Geological report on the work implementation for 2005 at a site “Formation and maintenance of the federal bank of geological data and the state bank of digital geological data”]. No. 485241. Moscow: Rosgeolfond.
16. 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 geomedia]. Novosibirsk: Academic Publishing House «Geo».
17. Burov E.B. (2011) Rheology and strength of lithosphere. *Marine and Petroleum Geology*. 28. pp. 1402–1443. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2011.05.008.
18. Sim L.A., Gordeev N.A., Marinin A.V. (2018) Noveyshaya geodinamika vostochnoy okrainy Sibirskoy platformy [Modern geodynamics of the eastern boundary of Siberian Platform]. *Geosistemy perekhodnykh zon – Geosystems of Transition Zones*. 2(4). pp. 280–289. DOI: 10.30730/2541-8912.2018.2.4.280-289.
19. Wilkins M.L. (1999) *Computer Simulation of Dynamic Phenomena*. Berlin: Springer-Verlag.

Received: June 3, 2020