

УДК 004.94:[539.3+551.24]

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2024.3.2

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ КРУПНОЙ ИЗВЕРЖЕННОЙ ПРОВИНЦИИ СИБИРСКОГО КРАТОНА

© А. В. Манько^{1,2*}, А. И. Корягина², Е. А. Муравьева²¹ООО «ТЦ «Ника»

Россия, 117420 г. Москва, ул. Наметкина, 12А.

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
Россия, 129337 г. Москва, Ярославское ш., 26.

*Email: MankoAV@mgsu.ru

Статья посвящена компьютерному моделированию краевой задачи по изучению напряжений и деформаций Сибирского кратона на примере одной из его частей – Якутско-Вилуйской крупной изверженной провинции, расчетная схема которой была построена по геофизическому профилю «Кимберлит-1981». Для рассмотрения механической среды была использована модель Друкера-Прагера в программном комплексе CAE Fidesys, реализующей метод конечных элементов. Полученные локализации напряжений и деформаций можно использовать для прогнозирования залежей полезных ископаемых.

Ключевые слова: крупная изверженная провинция, Сибирский кратон, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, мантия, астеносфера, CAE Fidesys.

Введение

Детальное изучение глубинного строения планеты Земля является первостепенной задачей такого раздела науки как тектонофизика [1]. Начиная с XX в. ведется детальное изучение строения древних литосферных плит, кратонов, а также их тектонических и геофизических явлений. Одним из первых эти явления обнаружил Джозеф Баррелл [2], который объяснял механизм движения литосферных плит наличием особой зоны Земли, которая должна быть пластичной и механически слабой. Такую зону Земли назвали астеносфера, которая в англоязычной литературе именуется как LVZ – Low Velocity Zone [3]. Астеносферу определяют на основании снижения скорости сейсмической волны за счет понижения прочности плиты в этой зоне и повышения ее вязкости [4]. Все эти исследования несут не только научные цели, но и практическую значимость.

Изучение древнейших платформ группой ученых из Новосибирского Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН магнитных и гравитационных аномалий Сибирского кратона [5] привело к созданию карты тектонических нарушений, карты строения кратона, на которых выделены, например, интрузии, наиболее древние зеленокаменные зоны и зоны неопределенного генезиса и петрографии. Также были построены различные двух и трехмерные геолого-геофизические модели (например Гулинского плутона), в которых показаны различные зоны с повышенной плотностью и увеличенным магнетизмом. Наличие таких зон свидетельствует о возможном наличии различных полезных ископаемых [6]. Изучению таких наиболее древних форм литосферы как архейские зеленокаменные пояса посвятил свои работы такой видный ученый как Кент Конди, который более пятидесяти лет ведет научную работу в этом направлении. Результатом его научной деятельности в ЮАР при изучении петрографии архейских областей древнейших тектонических структур Земли стало написание его самой знаменитой монографий [7] по изучению архейских зеленокаменных поясов.

Деятельность по изучению кратонов [8], и в частности Сибирского кратона, производило множество исследователей, таких как А. Ю. Альбеков, Р. В. Веселовский, М. А. Гамильтон, Н. Н. Зинчук, С. Л. Камо, П. С. Козлов, И. И. Лиханов, А. В. Округин, В. Э. Павлов, Н. В. Попов, К. Роджерс, М. В. Рыборак, У. Седерлунд, К. Р. Чемберлейн, Р. Е. Эрнст и другие [9–13]. Изучение напряженно-деформированного состояния кратонов дало возможность прогнозировать металлогению, возникновение кимберлитовых трубок, обнаружение нефтегазоносных провинций и залежи других полезных ископаемых.

Постановка задачи и методология исследования

Сибирский кратон состоит из следующих тектонических структур:

- Енисейский кряж, который испытывает сжатие;
- Якутско-Вилуйская КИП, которая испытывает растяжение;
- Мирнинско-Айхальская седловина, которая испытывает сжатие;
- Тунгусская синеклиза, которая испытывает растяжение.

Енисейский кряж является частью Енисейско-Саянской складчатой покровной области, рельеф низкогорный, переходящий в равнину. До границы Конрада преимущественно состоит из известняков, песчаников, конгломерата и сланцев. Возраст кристаллического фундамента не установлен, но предположительно он Докембрийского периода и сложен базальтами, диабазом и габбро.

трансверсально-изотропную задачу математического моделирования, которая рассматривается критерием пластичности по Мизесу [18]. Расчетная область в плоской постановке имеет размер 360x60 км (рис. 2).



Рис. 2. Расчетная схема.

Размер расчетной области совпадает с размерами Якутско-Вилуйской КИП по данным разреза «Кимберлит-1981», отделенной от остальных плит глубинными субвертикальными разломами, уходящими ниже рассматриваемой области, и, следовательно, можно считать данную КИП отдельным от остальных геологическим элементом, который взаимодействует с ними посредством тектонических сил растяжения. Для моделирования кратона применялся российский программный комплекс САЕ Fidesys, входящий в реестр отечественного ПО Минцифры. Фундамент КИП состоит из кварцита мощностью 15 км, диабазы мощностью 27 км и оливина разведанной мощностью 18 км. По границе диабазы и оливина (на рис. 2 обозначено красной линией) на глубине 42 км проходит граница Мохо.

Растяжение по всей Якутско-Вилуйской КИП было обнаружено при составлении геофизического разреза в 1979–1980 гг. Растягивающая нагрузка расчетной схемы располагаются следующим образом. С кровли кварцита нагрузка равна нулю и постепенно к глубине 15 км возрастает до 2 МПа. Затем на границе с диабазом нагрузка резко возрастает до 100 МПа и уменьшается по глубине до 15 МПа. На границе Мохо нагрузка резко возрастает до 230 МПа и постепенно уменьшается к концу рассматриваемой области до 70 МПа. Следовательно, расчетная модель имеет следующие граничные условия: нижняя граница расчетной схемы закреплена от перемещения по всем осям, а по оси Y закрепление представлено в виде растягивающей нагрузки.

Для математического моделирования применялась классическая модель Друккера-Прагера. При этом особенностью моделирования являлось то, что имеется упрочненный слой в верхней мантии ниже границы Мохо, в астеносфере. Это связано с тем, что геологически рассматриваемая область находится на континентальной плите, которая является малоактивным геодинамическим объектом.

Результаты работы

А. Ахметов рассматривал Якутско-Вилуйскую КИП как часть Лено-Вилуйской нефтегазоносной провинции, и им были получены картины распределения интенсивности пластических деформаций. В результате локализации пластических течений на территории Сунтарского поднятия автор прогнозирует появление залежей нефти и газа.

По результатам нашего моделирования были получены изополя напряжений и деформаций: на рис. 3 представлены изополя абсолютных напряжений, а на рис. 4 изополя пластических деформаций.

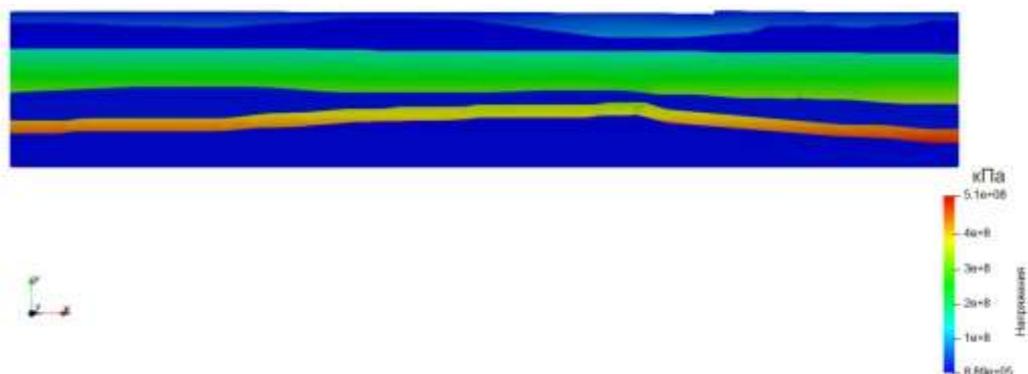


Рис. 3. Результаты моделирования абсолютных напряжений КИП.

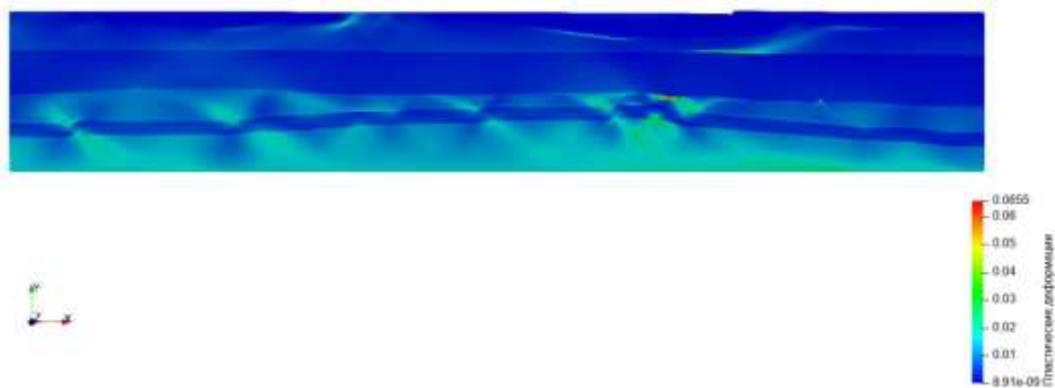


Рис. 4. Результаты моделирования пластических деформаций КИП.

Напряжения в САЕ Fidesys всегда указывается в кПа, перемещения в метрах, а деформации всегда измеряются в долях.

Задача была решена в вязко-упругой постановке по закону Мизеса, но ниже астеносферы задача должна быть решена моделью Муни-Ривлина. К сожалению, ограничения в программном комплексе не позволяют этого сделать, а другие геомеханические и геотехнические программы, которые есть в доступе у авторов, не позволяют выполнить расчет в вязко-упругой постановке. Модель Муни-Ривлина должна рассматривает оливин как гиперупругий материал, и только подбором коэффициента Пуассона была решена вся расчетная схема моделью Мизеса.

Представленные результаты свидетельствуют о появлении значительных, максимальных, напряжений в районе границы Мохо, минимальное – в астеносфере. Также прослеживается слоистая структура в результатах напряжений и деформаций. Это происходит из-за того, что задача решается как сплошная, но трансверсально-изотропная среда, где слои зависят не от минерального состава горных пород, а от скорости прохождения V_s и V_p волн.

Минимальные напряжения обнаружены ниже границы Мохо, и это логично, потому что не всегда по глубине литостатическое давление растет из-за того, что при тектоническом движении литосферных плит всегда присутствует горизонтальное давление. Еще А. Н. Динник в 1925 г. был раскритикован М. М. Протоdjяконым и К. Терцаги за свою теорию, что горизонтальное давление не существенно и составляет часть от вертикального, при этом величина не может быть более 100%. Современные исследования показывают, что это не так. Горизонтальное давление составляет от 30% до 300% от вертикального давления и поэтому может получиться так называемое «взвешивающий» эффект, когда из-за различных геофизических процессов и из-за плотности породы может наблюдаться явление, при котором вертикальное давление на большой глубине заметно меньше, чем в осадочном чехле [19].

При анализе полученных результатов пластических деформации можно сделать вывод о том, что значительные деформации сжатия присутствуют на 5 км выше границы Мохо в районе антиклиналя. Также в этом месте имеется концентрация напряжений с отрицательным знаком, а в кровле мантии горизонтальные напряжения имеют положительный знак.

Ниже этой зоны после границы Мохо видны зоны вязких деформаций. Это может свидетельствовать о некоторой аномалии, которая может оказаться концентрацией каких-либо полезных ископаемых в данном месте.

Также имеются вытянутые зоны хрупкого разрушения в кварците в верхней части расчетной схемы. Над первой зоной аномалии также имеются зоны повышенного напряжения, что свидетельствует о наличии полости на глубине до 5 км. Также, как и А. Ахметов, можно предположить наличие в данном месте крупного месторождения углеводородов.

Ниже границы Мохо в оливине и астеносфере была получена картина распределения интенсивности вязко-пластических деформаций. В районе локализации пластических деформаций в верхнем слое мантии можно прогнозировать очаги металлогении или формы иных полезных ископаемых.

Заключение

Данное исследование было направлено, прежде всего, на подтверждение гипотезы, что напряжения и деформации литосферных плит для локализации полезных ископаемых можно моделировать не методом конечных разностей, что принято в таких случаях, а методом конечных элементов. В обоих случаях как модель схематизации массива используется модель Друккера-Прагера, но до настоящего исследования данная модель имела модификацию Николаевского, которая позволяет вводить в расчет параметры, зависящие от величины давления и накопленной неупругой деформации с учетом температурных воздействий на материал. Путем подбора коэффициента Пуассона была решена задача в классической постановке модели Друккера-Прагера.

В качестве рассматриваемой расчетной модели была выбрана Якутско-Вилуйская крупная изверженная провинция в связи с тем, что данная часть Сибирского кратона имеет наиболее характерные особенности геофизического строения. В связи с однородностью кристаллического фундамента, состоящего из кварцита, диабаз и оливина, в качестве критерия выбора слоев расчетной схемы были выбраны скорости прохождения V_s и V_p волн.

Рассматриваемая область совпадает с размером КИП и составляет 360х60 км. Граница Мохо располагается на глубине 42 км. В качестве граничных условий по оси Y было выбрано свободное перемещение границ, к которым приложены растягивающие усилия по схеме, обнаруженной в результате построения профиля «Кимберлит-1981» – вся Якутско-Вилуйская КИП подвержена растяжению. Нижняя граница расчетной схемы закреплена от перемещения по всем осям.

Поставленная задача была решена в соответствии с критерием пластичности по Мизесу. Моделирование астеносферы не велось из-за того, что используемая программа не решает задачи по Муни-Ривлину, но подбором коэффициента Пуассона удалось решить воздействие астеносферы на оливин как пластичность по Мизесу.

В результате проведенного моделирования была подтверждена гипотеза о возможности применения метода конечных элементов для дальнейшего решения задач по выявлению металлогении, кимберлитовых трубок, нефти и других полезных ископаемых. Полученные результаты близки к тем результатам и выводам, что получил в своей работе А. Ахметов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ромашов А. Н. Планета Земля. Тектонофизика и эволюция. М.: Ленанд, 2015. 261 с.
2. Barel J. The Strength of the Earth's Crust // The Journal of Geology. 1914. Vol. 22(7). P. 655–683. URL: <https://doi.org/10.1086/622181>
3. Yoshino T. Origin of the low velocity zone: perspectives of electrical conductivity and melt morphology (Invited) / In American Geophysical Union. Fall Meeting 2010. Abstract id. T12A-06.
4. Артюшков Е. В. Физическая тектонофизика. М.: Наука, 1993. 456 с.
5. Витте А. В., Василевский А. Н., Павлов Е. В. Региональные магнитные и гравитационные аномалии Сибирского кратона и их геологическая природа // Геофизический журнал. 2009. Т. 31. №6. С. 21–37.
6. Амантов В. А. Рудогенез и геодинамика тектоносферы в аспекте концепции нелинейной металлогении А. Д. Щеглова // Региональная геология и металлогения. 2000. №11. С. 81–85.
7. Конди К. Архейские зеленокаменные пояса. М.: Мир, 1983. 390 с.
8. Шарков Е. В., Богина М. М., Чистяков А. В., Злобин В. Л. Эволюция крупных изверженных провинций в истории Земли (на примере восточной части Балтийского щита) // Вулканология и сейсмология. 2020. №5. С. 51–66. DOI: 10.31857/S0203030620050065.
9. Альбеков А. Ю., Рыборак М. В. Крупные изверженные провинции и их отражение в геологической эволюции Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2012. №1. С. 58–66.
10. Козлов П. С., Лиханов И. И., Попов Н. В. Первая находка гранитов рапакиви в докембрии Заангарья Енисейского кряжа и ее значение // Проблемы плейт- и плюм-тектоники в докембрии: Материалы III Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия, Санкт-Петербург, 25–27 октября 2011 г. СПб.: Российский фонд фундаментальных исследований, 2011. С. 79–81.
11. Зинчук Н. Н. Некоторые особенности раннедокембрийского алмазоносного минерогенеза // Проблемы плейт- и плюм-тектоники в докембрии: мат-лы III Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия, Санкт-Петербург, 25–27 октября 2011 г. СПб.: Российский фонд фундаментальных исследований, 2011. С. 60–62.
12. Эрнст Р., Округин А. В., Веселовский Р. В. и др. Куонамская крупная изверженная провинция (север Сибири, 1 501 млн лет): U-Pb геохронология, геохимия и корреляция с синхронным магматизмом других кратонов // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. №5. С. 833–855. DOI 10.15372/GiG20160502.
13. Томшин М. Д., Эрнст Р. Е., Седерлунд У., Округин А. В. Кенгединский мафический дайковый рой и расширение куонамской крупной изверженной провинции (1 500 млн лет) Северной Сибири // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. №4. DOI 10.5800/GT-2023-14-4-0707.
14. Gladkochub D. P., Donskaya T. V., Mazukabzov A. M. et al. Proterozoic mafic magmatism in Siberian craton: An overview and implications for paleocontinental reconstruction // Precambrian Research. 2010. Vol. 183. No. 3. P. 660–668. DOI 10.1016/j.precamres.2010.02.023.
15. Башарин А. К., Беляев С. Ю., Хоменко А. В. Северо-Азиатский кратон и Сибирская платформа: современная структура // Тихоокеанская геология. 2005. Т. 24. №6. С. 3–15.
16. Ахметов А. Анализ напряженно-деформированного состояния участков литосферы на территории Сибирского кратона: дис. ... канд. физ.-мат. наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела». Томск: Нац. исслед. томский гос. ун-тет, 2022. 139 с.
17. Стефанов Ю. П. Моделирование поведения консолидированных и высокопористых геологических сред в условиях сжатия // Вестник Пермского гос. технич. ун-та. Математическое моделирование систем и процессов. 2007. №15. С. 156–169.
18. Huang Y., Jiang J. A Critical Review of von Mises Criterion for Compatible Deformation of Polycrystalline Materials // Crystals. 2023. 13(2). P. 244. DOI 10.3390/cryst13020244.
19. Муравьева Е. А., Манько А. В. Эндеогенные геодинамические процессы: причины и воздействия на подземные сооружения // Экономика строительства. 2023. №3. С. 88–93.

Поступила в редакцию 15.05.2024 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2024.3.2

**COMPUTER MODELLING OF STRESSES AND DEFORMATIONS
OF A LARGE ERUPTIVE PROVINCE OF THE SIBERIAN CRATON**© A. V. Manko^{1,2*}, A. I. Koryagina², E. A. Muraveva²¹*LLC "TC "Nika"**12A Nametkin st., 117420 Moscow, Russia.*²*Moscow State University of Civil Engineering**26 Yaroslavskoe rd., 129337 Moscow, Russia.***Email: mankoav@mgsu.ru*

The article is devoted to computer modelling of the boundary value problem for studying stresses and deformations of the Siberian craton on the example of one of its parts – the Yakutsk-Vilyuyskaya large eruptive province, the computational scheme of which was built on the basis of the geophysical profile “Kraton-1980”. The Drucker-Prager model in the CAE Fidesys software package, which implements the finite element method, was used to consider the mechanical environment. The obtained stress and strain localizations can be used to predict mineral deposits.

Keywords: large eruptive province, Siberian craton, computer modelling, stress-strain state, mantle, asthenosphere, CAE Fidesys.

Received 15.05.2024.