

## Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния южной части Сибирского кратона

*А.В. Манько, А.И. Корягина*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва*

**Аннотация:** Целью данного исследования является математическое моделирование южной части Сибирского кратона методом конечных элементов. Задачей исследования является проведение математического моделирования напряженно-деформированного состояния вязко-упруго-пластичной среды Якутско-Вилуйского крупной изверженной провинции на основании краевой задачи. Гипотеза исследования: возможность использования результатов численного исследования для определения зон дислокаций полезных ископаемых. В южной части кратона, на территории республики Саха-Якутия, находятся богатейшие месторождения нефти и газа, крупнейшим из которых является Усть-Вилуйское месторождение, находящееся в южной части кратона. Метод исследования: численный эксперимент, осуществлённый методом математического моделирования. Достигнутые результаты: проведены исследования методом конечных элементов, определена возможность использования численными методами, проведен анализ напряженно-деформированного состояния плиты, определены места аномалий дислокаций горных пород кратона для выявления потенциальных нефтегазоносных месторождений.

**Ключевые слова:** кратон, математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, геофизика, геотектоника, растяжение, изверженная провинция, модели материалов, модель Hardening Soil, метод конечных элементов, дислокация полезных ископаемых.

Сибирский кратон был образован в Протерозойский акрон [1]. В соответствии с атласом «Опорные геолого-геофизические профили России» [2], данный кратон состоит из следующих крупных провинций: Тунгусская синеклиза, Мирнинско-Айхальская седловина, Вилуйская синеклиза, Алданский щит и Алдано-Майский прогиб [3].

По результатам сейсмических воздействий взрывами [4], в 1978 году были проведены геофизические исследования, были построены сейсмические разрезы, один из которых используется в данном исследовании «Кратон\_1980». Самая южная часть [5] этого разреза, так называемая Якутско-Вилуйская крупная изверженная провинция (далее КИП), в данном исследовании рассматривалась частично:

---

Айхальский выступ, Мархара-Канский выступ, Мархинский вал, Западно-Виллюйская ступень, Линденская впадина, Хапчагайское поднятие, Лунхинская впадина, Восточно-Виллюйская ступень (от Q40 до P52). На рис. 1 представлен сейсмический разрез КИП.

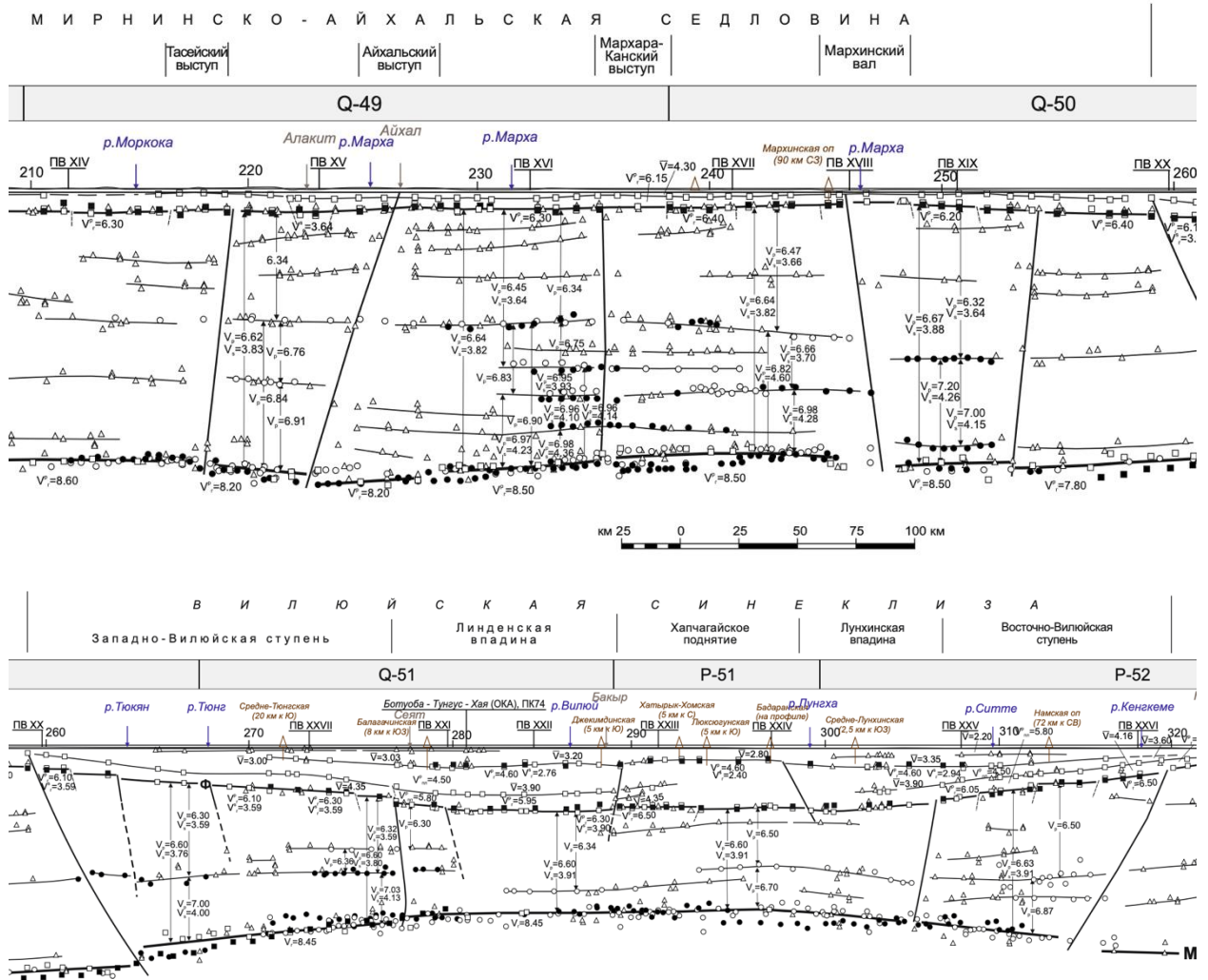


Рис. 1. – Сейсмический разрез по КИП

В геологическом плане, кристаллический фундамент КИП сложен в основном кварцитом, диабазом и оливином, а сверху залегают осадочный чехол от 4 до 10 км. В тектоническом плане, Сибирский кратон испытывает растягивающие усилия.

В соответствии со статьей [6], краевая задача будет решаться численным методом: методом конечных элементов с использованием модели материала среды Hardening Soil [7]. Данная модель хорошо себя зарекомендовала как единственная в расчете, так и вкуче с другими упругими и упругопластическими моделями: Гука, Хука-Брауна и Друкера-Прагера [8, 9]. В расчетной схеме представлен только кристаллический фундамент КИП от 10 до 60 км вглубь от уровня дневной поверхности. Граничные условия расчетной схемы были выбраны следующие: запрет на перемещения нижней грани модели вдоль осей  $X$   $Y$ ; к боковым граням была приложена растягивающая нагрузка вдоль оси  $X$ ; к модели глобально была приложена гравитационная сила.

Полученные результаты моделирования напряженного состояния КИП представлены на рис.3. Характер напряженного состояния повторяет границу Мохоровичича, следовательно, расчет сделан верно.

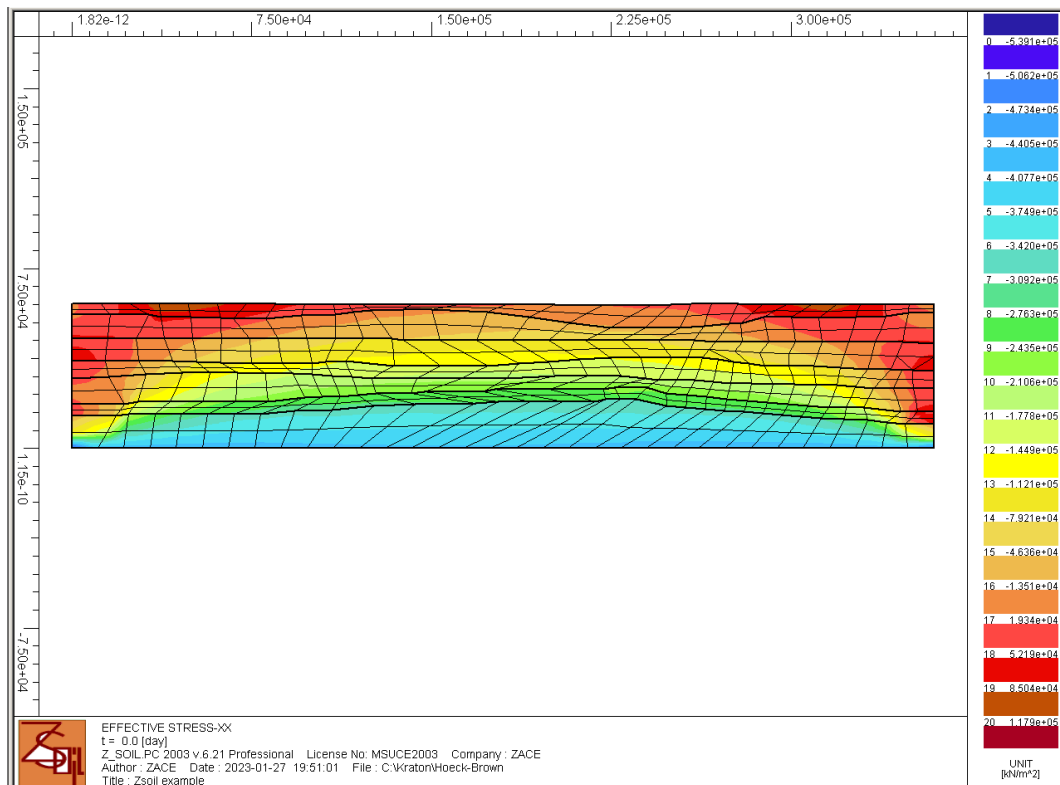
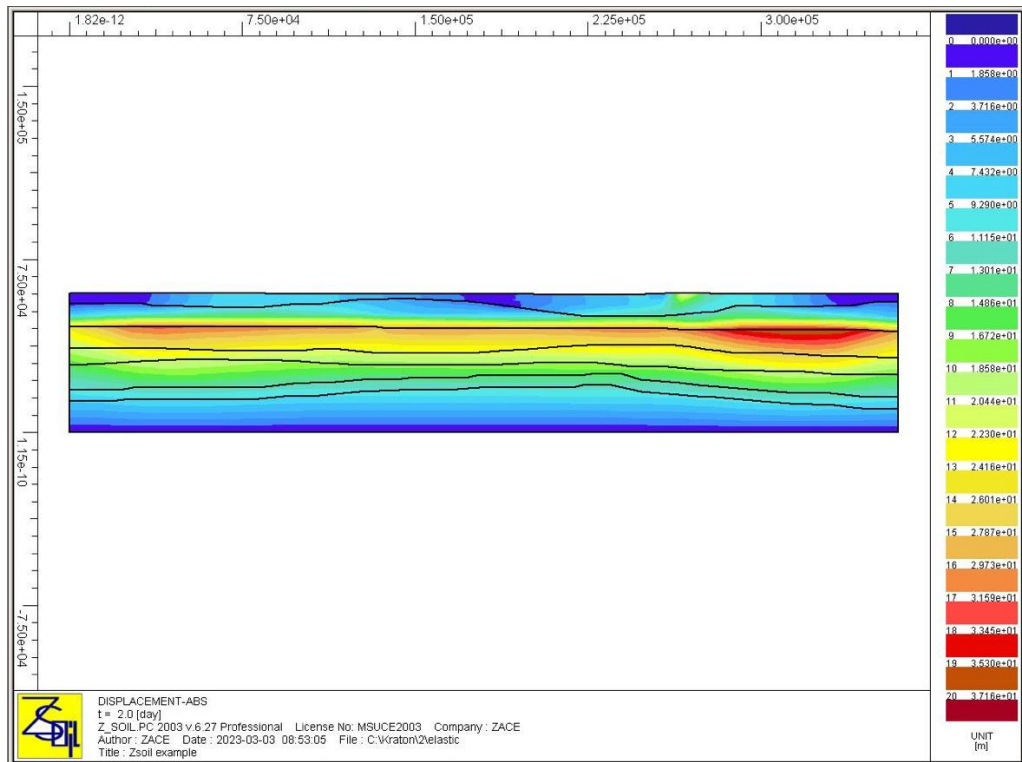
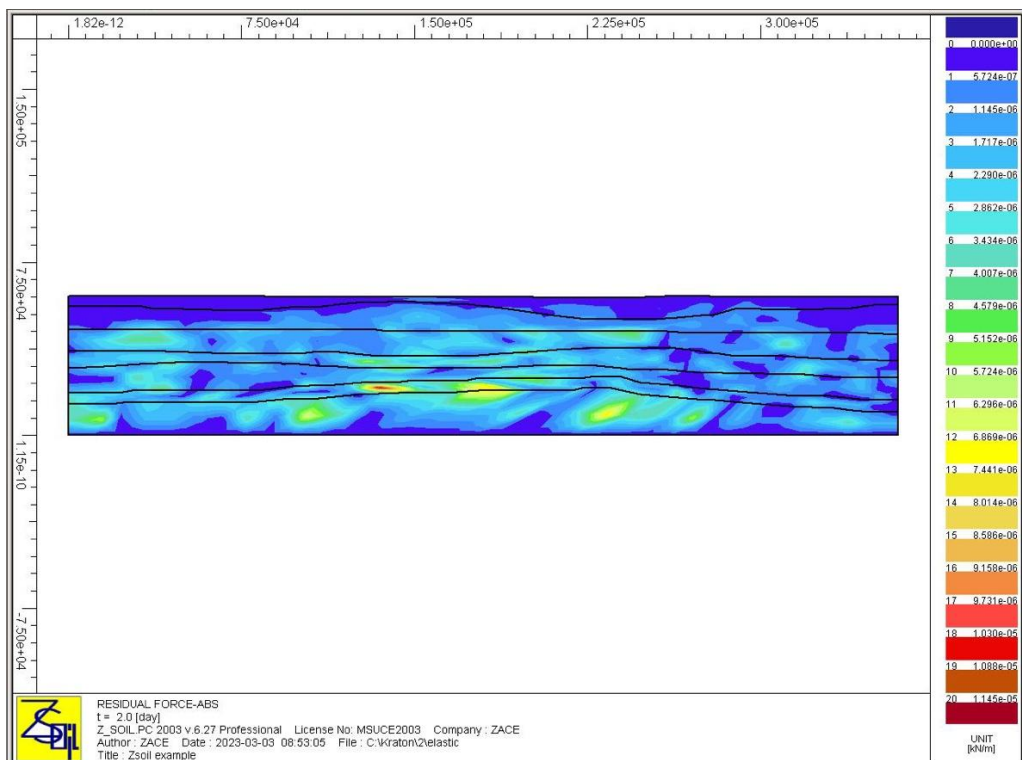


Рис. 3. – Главные напряжения по оси  $X$



а)



б)

Рис. 4. – Результаты математического моделирования: а) абсолютные перемещения в кратоне, б) зоны пластического течения

На рис.4а представлены результаты проведенного моделирования деформированного состояния кратона, из которых были получены результаты пластических течений и деформаций южной части Сибирского кратона (рис. 4б). Зоны локализации усилий показывают на дислокацию иного материала по физико-механическим характеристикам, а оранжево-красные зоны показывают наличие полостей. Данные результаты совпадают с результатами разведочного бурения [10], следовательно, можно сделать вывод о том, что использование аппарата математического моделирования для решения этой конкретной задачи возможно, что позволит значительно сократить стоимость изысканий залежей полезных ископаемых.

### Литература

1. Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Ernst R.E., Wingate M.T.D., Söderlund U., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Hamilton M.A., Hanes J.A. Proterozoic mafic magmatism in Siberian craton: An overview and implications for paleocontinental reconstruction // *Precambrian Research*. 2010. Vol. 183, No. 3. pp. 660-668. DOI: 10.1016/j.precamres.2010.02.023.
2. Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год. СПб. ВСЕГЕИ. 2010. 94 с.
3. Старосельцев В.С. Геолого-геофизические предпосылки юго-восточного продолжения Сибирской платформы // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2015. № 4. С. 3-10.
4. Адушкин В.В., Опарин В.Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия - к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012. № 2. с. 3-27.

5. Эволюция южной части Сибирского кратона в Докембрии / под ред. Е.Н. Склярова. – Новосибирск: Издательство СО РАН. 2006. 367 с.
6. Манько А.В., Корягина А.И., Муравьева Е.А. Начальная краевая задача моделирования напряженно-деформированного состояния элементов Сибирского Кратона // Перспективы науки. 2023. № 12(171). с. 94-97.
7. Cudny M., Truty A. Refinement of the Hardening Soil model within the small strain range // Acta Geotechnica. 2020. Vol. 15, No.8. P. 2031-2051. DOI: 10.1007/s11440-020-00945-5.
8. Санамян Г.В. Имитационное моделирование операций упрочнения поверхностным пластическим деформированием // Инженерный вестник Дона. 2008. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/69.
9. Насонов А.А., Давыденко А.П. Математическое моделирование призабойной зоны ствола при совмещенной схеме проходки // Инженерный вестник Дона. 2022. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7498.
10. Халошина Т.О. Современное состояние углеводородного потенциала Республики Саха (Якутия) // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2010. № 2. С. 94-101.

### References

1. Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Ernst R.E., Wingate M.T.D., Söderlund U., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Hamilton M.A., Hanes J.A. Precambrian Research. 2010. Vol. 183, No. 3. pp. 660-668. DOI: 10.1016/j.precamres.2010.02.023.
2. Atlas «Opornye geologo-geofizicheskie profili Rossii». Glubinnye seismicheskie razrezy po profiljam GSZ, otrabotannym v period s 1972 po 1995 god. [Atlas "Reference Geological and Geophysical Profiles of Russia". Deep seismic sections on the GSZ profiles worked out in the period from 1972 to 1995]. SPb.: VSEGEI. 2010. 94 p.





3. Starosel'cev V.S. Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri. 2015. № 4. pp. 3-10.
4. Adushkin V.V., Oparin V.N. Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. 2012. № 2. pp. 3-27.
5. Jevoljucija juzhnoj chasti Sibirskogo kratona v Dokembrii [Evolution of the southern part of the Siberian craton in the Precambrian]. Pod red. E.N. Skljarova. – Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN. 2006. 367 p.
6. Manko A.V., Korjagina A.I., Muraveva E.A. Perspektivy nauki. 2023. № 12(171). pp. 94-97.
7. Cudny M., Truty A. Acta Geotechnica. 2020. Vol. 15, No.8. P. 2031-2051. DOI:10.1007/s11440-020-00945-5.
8. Sanamjan G.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2008. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/69](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/69).
9. Nasonov A.A., Davydenko A.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7498](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7498).
10. Haloshina T.O. Nauchno-tehnicheskij sbornik Vesti gazovoj nauki. 2010. №2. pp. 94-101.

**Дата поступления: 28.02.2024**

**Дата публикации: 5.04.2024**