



**Vaxitxan ISMAILOV,**  
PhD, professor, O'zR FA Seysmologiya instituti Toshkent, O'zbekiston  
E-mail: vakhit.mbm@mail.ru ORCID: 0000-0002-7893-1556

**Jonibek BOZOROV,**  
PhD, O'zR FA Seysmologiya instituti Toshkent, O'zbekiston  
E-mail: j.bozorov1968@gmail.com ORCID:0009-0008-5676-0144

**Nazokat SATTOROVA,**  
O'zR FA Seysmologiya instituti Toshkent, O'zbekiston  
E-mail: a.shavkatova2019@gmail.com ORCID: 0009-0008-8012-7648

TAQU kafedra mudiri Sh.Boymatov taqrizi asosida

## A REVIEW OF THE APPLICATION OF NANOMATERIALS IN IMPROVING THE ENGINEERING PROPERTIES OF SEDIMENTARY SOILS

Annotation

This study evaluates the physico-mechanical and microstructural properties of collapsible soils stabilized with various stabilizing agents. The effects of cement, lime, nano-silica, nano-clay, and other stabilizers on soil properties were analyzed. The results showed that stabilization significantly improves soil strength, deformation stability, and water resistance. Microstructural analysis confirmed the formation of strong bonds between soil particles. The combination of nano-silica and cement demonstrated the highest efficiency. The findings provide a scientific and practical basis for improving collapsible soil stabilization technologies and enhancing geotechnical design.

**Keywords:** sedimentary soil, soil stabilization, nanomaterials, nano-SiO<sub>2</sub>, physical and mechanical properties, microstructural analysis, SEM, strength, geotechnics.

## ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СВОЙСТВ ОСАДОЧНЫХ ГРУНТОВ

Аннотация

Настоящее исследование посвящено оценке физико-механических и микроструктурных свойств просадочных грунтов, укрепленных различными стабилизаторами. Проанализировано влияние цемента, извести, нанокремнезема, наноглины и других стабилизаторов на свойства грунтов. Результаты показали, что стабилизация значительно повышает прочность, деформационную устойчивость и водостойкость грунтов. Микроструктурный анализ подтвердил образование прочных связей между частицами грунта. Наиболее высокая эффективность достигнута при совместном использовании нанокремнезема и цемента. Полученные результаты могут служить научно-практической основой для совершенствования технологий укрепления просадочных грунтов и геотехнического проектирования.

**Ключевые слова:** осадочные грунты, стабилизация грунтов, наноматериалы, nano-SiO<sub>2</sub>, физико-механические свойства, микроструктурный анализ, СЭМ, прочность, геотехника.

## CHO'KUVCHAN GRUNTLARNING MUHANDISLIK XOSSALARINI YAXSHILASHDA NANOMATERIALLARNING QO'LLANILISHI BO'YICHA SHARH

Annotatsiya

Mazkur tadqiqot cho'kuvchan gruntlarni turli stabilizatorlar asosida mustahkamlashning fizik-mexanik va mikrostrukturaviy xususiyatlarini baholashga bag'ishlangan. Tadqiqotda sement, ohak, nano-kremnezem, nano-gil va boshqa stabilizatorlarning grunt xossalariga ta'siri tahlil qilindi. Natijalar stabilizatsiya gruntning mustahkamligi, deformatsion barqarorligi va suvga chidamliligini sezilarli oshirishini ko'rsatdi. Mikrostrukturaviy tahlillar stabilizatorlarning grunt zarrachalari orasida mustahkam bog'lanish hosil qilishini tasdiqladi. Ayniqsa, nano-kremnezem va sement kombinatsiyasi eng yuqori samaradorlikni namoyon etdi. Olingan natijalar cho'kuvchan gruntlarni mustahkamlash texnologiyalarini takomillashtirish va geotexnik loyihalash samaradorligini oshirish uchun ilmiy-amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

**Kalit so'zlar:** cho'kuvchan grunt, grunt stabilizatsiyasi, nanomateriallar, nano-SiO<sub>2</sub>, fizik-mexanik xossalar, mikrostrukturaviy tahlil, SEM, mustahkamlik, geotexnika.

**Kirish.** Nanomateriallarning fizik-kimyoviy xususiyatlari Nanotexnologiya tushunchasi ilk bor Richard Feynman tomonidan 1959-yilda "There's Plenty of Room at the Bottom" nomli ma'ruzasida ilgari surilgan bo'lib, bu zamonaviy ilm-fan va texnologiyada yangi bosqichning boshlanishiga asos bo'lgan [1]. Nanomateriallar odatda 1-100 nm o'lcham oralig'idagi zarrachalardan iborat bo'lib, ularning o'lchamining nihoyatda kichikligi tufayli o'ziga xos fizik va kimyoviy xususiyatlarga ega. Ayniqsa, katta solishtirma sirt maydoni va yuqori sirt faolligi ularni gruntlarni modifikatsiya qilishda samarali materialga aylantiradi.

So'nggi yillarda geotexnika sohasida nanomateriallardan foydalanish gruntlarning muhandislik xossalarini yaxshilashning istiqbolli yo'nalishlaridan biri sifatida qaralmoqda. Nano'o'lchamdagi qo'shimchalar grunt tuzilmasiga chuqur kirib borib, zarrachalararo bog'lanishni kuchaytiradi va strukturani zichlashtiradi. Natijada gruntning mustahkamligi, deformatsion

barqarorligi hamda suvga chidamliligi ortadi. Amaliyotda gruntlarni mustahkamlash uchun turli xil nanomateriallardan foydalaniladi. Jumladan, nano-kremnezem (nano-SiO<sub>2</sub>), nano-gil, nano-kalsiy karbonat (nano-CaCO<sub>3</sub>), nano-alyuminiy oksid (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), nano-ohak, shuningdek nano-silika tutuni keng qo'llanilmoqda. Ushbu materiallar gruntning g'ovak tuzilishini o'zgartirish, zarrachalararo bo'shliqlarni kamaytirish va bog'lovchi faza hosil qilish orqali uning fizik-mexanik xususiyatlarini yaxshilaydi.

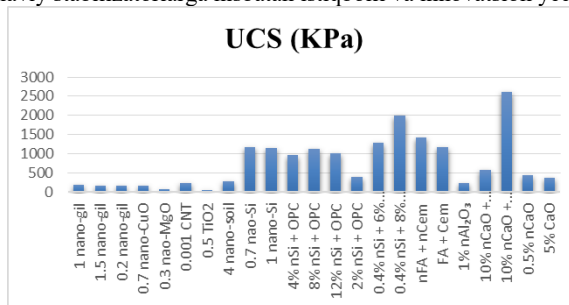
Nanomateriallar asosidagi stabilizatsiya an'anaviy usullarga nisbatan bir qator afzalliklarga ega. Xususan, kam miqdorda qo'llanilganda ham yuqori samaradorlikka erishiladi, atrof-muhitga ta'siri nisbatan past bo'ladi va grunt strukturasiga minimal buzilish kiritiladi. Bu esa ularni iqtisodiy va ekologik jihatdan maqbul texnologiya sifatida ko'rsatadi.

Umuman olganda, nanomateriallar gruntlarni mustahkamlashda yuqori samaradorlikka ega bo'lib, ularning fizik-kimyoviy xususiyatlari grunt strukturasini yaxshilash, mustahkamlikni oshirish va uzoq muddatli barqarorlikni ta'minlashda muhim rol o'ynaydi.

**Metodologiya.** Ushbu sharh tadqiqotida gruntlarni kimyoviy stabilizatsiya qilish bo'yicha ilmiy adabiyotlar tizimli ravishda tahlil qilindi. Tadqiqot doirasida gruntlarni sement, ohak, uchuvchi kul, kalsiy karbid qoldig'i, natriy silikat asosidagi stabilizatorlar, shuningdek polimerlar, nanomateriallar va biopolimerlar yordamida mustahkamlashga oid ilmiy ishlar asosiy manba sifatida tanlab olindi. Ilmiy ma'lumotlarni yig'ish jarayonida xalqaro ilmiy ma'lumotlar bazalari, jumladan Web of Science, Scopus hamda boshqa nufuzli ilmiy platformalarda indekslangan maqolalar, konferensiya materiallari va ilmiy hisobotlardan foydalanildi. Adabiyotlarni tanlash jarayonida "collapsible soil", "soil stabilization", "soil stabilizers", "physico-mechanical properties", "microstructural analysis", "nano-materials", "cement stabilization" kabi kalit so'zlardan foydalanildi.

**Tahlil va natijalar.** Nanomateriallar bilan barqarorlashtirilgan tuproqlarning muhandislik xususiyatlari geotexnik muhandislik sohasida olib borilgan ko'plab tadqiqotlar nanomateriallarning grunt xossalariga ta'sirini, ayniqsa cho'kuvchan gruntlarning mexanik va deformatsion xususiyatlarini yaxshilashdagi rolini aniqlashga qaratilgan. Ushbu izlanishlar natijasida nanomateriallar gruntning strukturaviy barqarorligini oshirish, cho'kish potentsialini kamaytirish hamda umumiy muhandislik xossalarini sezilarli darajada yaxshilash imkoniyatiga ega ekanligi aniqlangan. Tadqiqotlar natijalari shuni ko'rsatadiki, nanomateriallar yuqori dispersligi, katta solishtirma sirt maydoni va yuqori reaktivligi tufayli grunt zarrachalari bilan intensiv fizik-kimyoviy o'zaro ta'sirga kirishib, uning muhandislik xossalarini tubdan o'zgartiradi. Xususan, Changizi va Haddad [2] hamda Kong va boshq [3] tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda nano-kremnezem qo'llanilishi natijasida gruntning siqilish mustahkamligi va qattiqligi sezilarli darajada oshishi aniqlangan. Shu bilan birga, Kalhor va boshq [4] nano-SiO<sub>2</sub> qo'shilishi gruntning plastiklik xossalarini modifikatsiya qilib, suv o'tkazuvchanligini kamaytirishi va uch o'qli siqilish sinovlarida mustahkamlikning ortishiga olib kelishini ko'rsatgan. Nano-gil asosidagi stabilizatsiya ham samarali yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Abbasi va boshq. [5] hamda Roustaei va boshq [6] tadqiqotlarida nano-gil zarrachalari grunt tuzilmasida flokulyatsiya jarayonini yuzaga keltirib, disperslikni kamaytirishi va mustahkamlik parametrlarini yaxshilashi aniqlangan. Naval va boshq [7] nano-MgO va nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> qo'llanilganda plastiklik ko'rsatkichlari va shishish potentsiali kamayishini qayd etgan bo'lsa, Bundan tashqari, Zomorodian va boshq [8] nanomateriallarning kichik (0.5–2.5%) miqdorlari ham gruntning mustahkamligi va qattiqligini sezilarli darajada oshirishini ko'rsatgan.

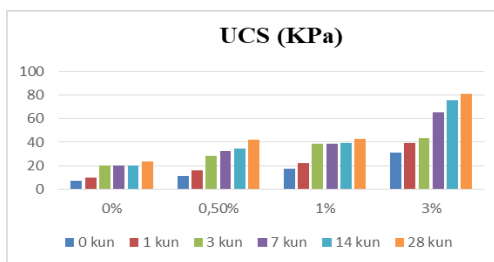
Umuman olganda, mavjud ilmiy tadqiqotlar natijalari nanomateriallarning gruntni mustahkamlashda yuqori samaradorlikka ega ekanligini ko'rsatadi. Ular gruntning mikrostrukturaviy tuzilishini modifikatsiya qilish, zarrachalararo bog'lanishni kuchaytirish va g'ovaklikni kamaytirish orqali uning mexanik va gidravlik xossalarini sezilarli darajada yaxshilaydi. Shu jihatdan nanomateriallar an'anaviy stabilizatorlarga nisbatan istiqbolli va innovatsion yechim sifatida qaralmoqda (1-rasm).



1-rasm. Turli xil nanomateriallar va ularning bog'lovchi materiallar bilan kombinatsiyasining gruntlarning cheklanmagan siqilish mustahkamligiga (UCS) ta'siri.

1-rasmga ko'ra turli xil nanomateriallar va ularning bog'lovchi materiallar bilan kombinatsiyasining gruntlarning cheklanmagan siqilish mustahkamligiga (UCS) ta'siri keltirilgan. Natijalar shuni ko'rsatadiki, nanomateriallar qo'llanilishi grunt mustahkamligini sezilarli darajada oshiradi, biroq bu ta'sir material turiga va miqdoriga bog'liq holda farqlanadi. Nano-silika (nano-SiO<sub>2</sub>) eng samarali nanomateriallardan biri bo'lib, hatto kichik miqdorlarda ham (0.7–1%) UCS qiymatini keskin oshiradi (1160–1180 kPa). Bundan tashqari, nano-silika sement bilan birgalikda qo'llanilganda yanada yuqori natijalar kuzatiladi. Xususan, 0.4% nano-SiO<sub>2</sub> va 8% OPC kombinatsiyasi eng yuqori mustahkamlikni (2000 kPa) ta'minlagan. Sement bilan kombinatsiyalangan tizimlar alohida e'tiborga loyiq bo'lib, nano-modifikatsiya oddiy sementga nisbatan ancha yuqori samaradorlik beradi. Masalan, 10% nCaO va 15% OPC qo'llanilganda UCS 2620 kPa ga yetgan, bu oddiy CaO (385 kPa) ga nisbatan bir necha barobar yuqori natijani ko'rsatadi.

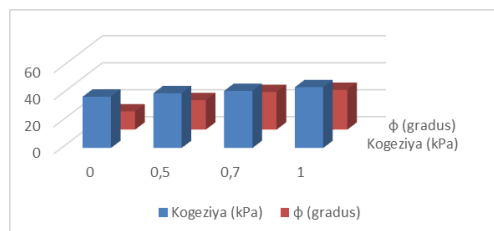
Nano-fly ash va nano-sement kombinatsiyasi ham yuqori samaradorlik ko'rsatib, oddiy fly ash + sement tizimiga nisbatan mustahkamlikni sezilarli darajada oshirgan (1416 kPa va 1175 kPa).



2-rasm. Nano-fly ash miqdori va qotish vaqti ta'sirida gruntning cheklanmagan siqilish mustahkamligi (UCS) o'zgarishi

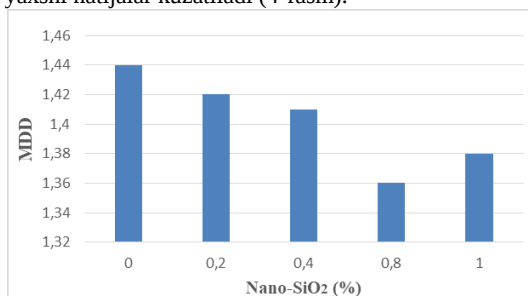
2-rasm natijalari nano-fly ash miqdori va quritish vaqti ortishi bilan gruntning UCS qiymati sezilarli darajada oshishini ko'rsatadi. Eng yuqori mustahkamlik 3% nano-fly ash va 28 kunlik qotish davrida kuzatilgan. Bu jarayon pozzolan reaksiyalari va sementlovchi birikmalarning asta-sekin hosil bo'lishi bilan izohlanadi. [9]

Xususan, nano-SiO<sub>2</sub> qo'shilmagan (0%) holatga nisbatan 0.5%, 0.7% va 1% miqdorlarda kogeziyon qiymati sezilarli darajada ortgan. Shu bilan birga, ichki ishqalanish burchagi ham barqaror ravishda oshib, gruntning kesilish mustahkamligi yaxshilanganini ko'rsatadi (3-rasm).



3-rasm. Nanosilikat miqdorining gruntning kogeziyon mustahkamligi (c) va ichki ishqalanish burchagi (φ) ga ta'siri

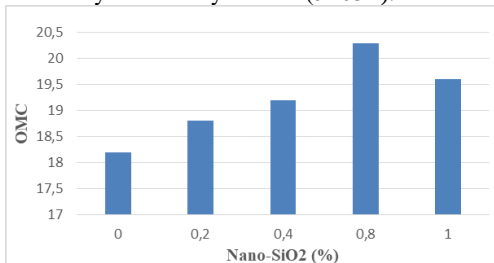
Ushbu holat nano-SiO<sub>2</sub> zarrachalarining yuqori sirt faolligi va mayda o'lchamlari hisobiga grunt zarrachalari orasidagi bo'shliqlarni to'ldirishi hamda ular o'rtasida mustahkam bog'lanish hosil qilishi bilan izohlanadi. Bundan tashqari, nano-SiO<sub>2</sub> suv bilan o'zaro ta'sirlashib gel hosil qiladi, bu esa gruntning mikrostrukturasi zichlashishiga va kesilish qarshiligining ortishiga olib keladi [10]. Umuman olganda, nano-SiO<sub>2</sub> stabilizatori gruntning kesilish parametrlarini yaxshilovchi samarali qo'shimcha bo'lib, ayniqsa 1% atrofidagi miqdorda eng yaxshi natijalar kuzatiladi (4-rasm).



4-rasm. Nano-SiO<sub>2</sub> miqdorining gruntning maksimal zichligi (MDD) ga ta'siri

4-rasmda nano-kremniy dioksidi (nano-SiO<sub>2</sub>) stabilizatori miqdorining ortishi bilan gruntning maksimal quruq zichligi (MDD) ning o'zgarishi tasvirlangan. Natijalardan ko'rinadiki, nano-SiO<sub>2</sub> miqdori oshishi bilan MDD qiymati dastlab izchil ravishda kamayadi. Xususan, 0% dan 0.8% gacha nano-SiO<sub>2</sub> qo'shilganda maksimal zichlik 1.44 dan 1.36 g/cm<sup>3</sup> gacha pasaygan [11].

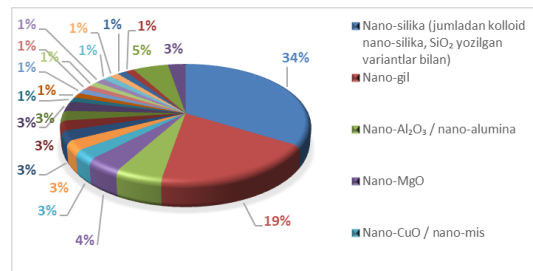
Umuman olganda, nano-SiO<sub>2</sub> qo'shilishi gruntning maksimal zichligiga murakkab ta'sir ko'rsatib, ma'lum miqdorgacha kamayish, so'ngra esa qisman tiklanish tendensiyasini namoyon etadi (5-rasm).



5-rasm. Nano-SiO<sub>2</sub> miqdorining gruntning optimal namligi (OMC) ga ta'siri.

Natijalardan ko'rinadiki, nano-SiO<sub>2</sub> miqdori oshishi bilan OMC qiymati izchil ravishda ortib boradi. Bu holat nano-SiO<sub>2</sub> zarrachalarining yuqori sirt maydoni va suvni adsorbsiya qilish qobiliyati bilan bog'liq bo'lib, ular grunt tarkibida ko'proq suvni ushlab qoladi. Natijada gruntni maksimal zichlash uchun zarur bo'lgan suv miqdori ortadi. Bundan tashqari, nanozarrachalar grunt strukturasi o'zgartirib, zarrachalararo bo'shliqlarni to'ldiradi va suvning taqsimlanishiga ta'sir ko'rsatadi. Bu esa optimal namlikning oshishiga olib keladi. Umuman olganda, nano-SiO<sub>2</sub> qo'shilishi gruntning suvga bo'lgan talabini oshiradi va optimal zichlashish uchun yuqoriroq namlik sharoitlarini talab qiladi.

**Xulosa va takliflar.** 6-grafikda keltirilgan ma'lumotlar asosida nanozarrachalar orasida nano-silika eng ko'p o'rganilgan va qo'llanilgan material bo'lib, umumiy tadqiqotlarning 34 % ini tashkil etadi. Bu nano-silikaning yuqori puzolanlik faolligi, sementatsion mahsulotlar hosil qilish qobiliyati hamda gruntning mustahkamlik va deformatsion xossalarini sezilarli yaxshilashi bilan izohlanadi (6-rasm).



6-rasm. Gruntlarni stabilizatsiya qilishda qo'llanilgan nanomaterial stabilizatorlarning taqsimoti (%)

Ikkinchi o'rinda nano-gil (19 %) turib, u gruntning mikrostrukturasi va zarrachalararo bog'lanishini yaxshilashda samarali ekanligi sababli keng tadqiq etilgan. Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5 %) va nano-MgO (4 %) ham mustahkamlik va zichlikni oshirish xususiyatlari tufayli muhim o'rin egallaydi.

Nano-CuO, CNT/MWCNT va boshqa nanoqo'shimchalar ulushi asosan 3 % atrofida bo'lib, ular nisbatan kamroq o'rganilgan. Biroq ushbu materiallar gruntning mexanik, termik va elektr xossalarini yaxshilash bo'yicha istiqbolli yo'nalish sifatida qaralmoqda. Diagrammadagi qolgan nanozarrachalar (TiO<sub>2</sub>, ZnO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, nano-CaCO<sub>3</sub> va boshqalar) har biri 1–3 % ulushni tashkil etib, hozircha cheklangan miqdordagi tadqiqotlarda uchraydi.

Xulosa qilib aytganda, gruntlarni nanomodifikatsiyalash bo'yicha ilmiy izlanishlarda nano-silika mutlaq yetakchi material hisoblanadi. Shu bilan birga, nano-gil, nano-alumina va nano-magniy oksidi ham istiqbolli stabilizatorlar sifatida e'tirof etilgan. Kelgusida kam o'rganilgan nanozarrachalarning gruntlarning uzoq muddatli mustahkamligi, seysmik barqarorligi va ekologik xavfsizligiga ta'sirini chuqurroq tadqiq etish maqsadga muvofiqdir.

#### ADABIYOTLAR

1. Feynman, R. P. (1960). *There's Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics*. Engineering and Science, 23(5), 22–36.
2. Changizi, F., and Haddad, A. "Effect of Nano-SiO<sub>2</sub> on the Geotechnical Properties of Cohesive Soil." *Geotechnical and Geological Eng*, Vol. 34, No. 2, 2016, pp. 725–733. doi:10.1007/s10706-015-9962-9.
3. Kong, R., Zhang, F., Wang, G., Peng, J. (2018). Stabilization of loess using nano-SiO<sub>2</sub>. *Materials* 11(6), 1014. <https://doi.org/10.3390/ma11061014>
4. Kalhor, A., Ghazavi, M., Roustaei, M. (2022). Impacts of Nano-silica on Physical Properties and Shear Strength of Clayey Soil. *Arab J Sci Eng* 47(4), 5271–5279. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06453-2>
5. Abbasi, N., Farjad, A., Sepehri, S. (2018). The Use of Nanoclay Particles for Stabilization of Dispersive Clayey Soils. *Geotech Geol Eng* 36(1), 327–335. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0330-9>
6. Roustaei, M., Sabetraftar, M., Taherabadi, E., Bayat, M. (2023). Compressive and Tensile Strength of Nano-clay Stabilised Soil Subjected to Repeated Freeze–Thaw Cycles. *Studia Geotechnica et Mechanica* 45(3), 221–230. <https://doi.org/10.2478/sgem-2023-0009>
7. Naval, S., and Chandan, K. *Stabilization of Expansive Soil Using Nanomaterials*. Singapore, 2017.
8. Zomorodian, S. A., Shabnam, M., Armina, S., O'Kelly, B. C. (2017). Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives. *Applied Clay Science* 140, 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.004>
9. Waychunas, A. G. Christopher S. Kim., & Jillian F. B. (2005). *Nanoparticulate iron oxide minerals in soils and sediments: unique properties and contaminant scavenging mechanisms*. Springer, 409–433
10. Garcia, S., Treju, P., Ramirez, O., Lopez-Molina, J., & Hernandez, N. (2017). Influence of Nano silica on Compressive strength of lacustrine soft clays. *Proceedings of the 19th International conference on soil mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul
11. Ghazavi, M., Kalhor, A., and Roustaei, M. (2022). Impacts of Nano-silica on Physical Properties and Shear Strength of Clayey Soil. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(4): 5271–5279.]