

Научный электронный журнал ГеоИнфо

Предварительная оценка исполнителей инженерно-геологических изысканий в части определения... Стр. 44

Трансформации в геотехнике с помощью искусственного интеллекта: достижения, проблемы и перспективы Стр. 52

Мониторинг фильтрации в пределах и вокруг плотин с использованием геофизических методов... Стр. 82



GEOINFO

ISSN 2949-0677 (ONLINE)

WWW.GEOINFO.RU

TOM VII • 4-2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ НАУЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЖУРНАЛА «ГЕОИНФО»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Самарин Евгений Николаевич

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной и экологической геологии, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
samarinen@mail.ru

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Абрамов Владимир Юрьевич

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии имени В.М. Швеца, МГРИ имени С. Орджоникидзе
Avlad1961@yandex.ru

Артюшенко Игорь Александрович

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Проектирование и строительство железных дорог», Российский университет транспорта (МИИТ)
i.art95@mail.ru

Баборыкин Максим Юрьевич

Кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог, ООО «Аэрогеоматика», имеет степень MBA
baborykin@ya.ru

Белов Константин Владимирович

Кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой гидрогеологии имени В.М. Швеца, гидрогеологический факультет МГРИ имени С. Орджоникидзе
belovkv@mgi.ru

Бершов Алексей Викторович

Ассистент кафедры инженерной и экологической геологии, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, генеральный директор, ООО «Петромоделинг»
alexey.berшов@petromodeling.com

Бучкин Виталий Алексеевич

Доктор технических наук, доцент
buchkin@mail.ru

Ван Пин (Wang Ping)

Кандидат геолого-минералогических наук, профессор, Институт географических наук и исследования природных ресурсов Академии наук, КНР
wangping@igsnr.ac.cn

Галкин Александр Николаевич

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры экологии и географии, УО «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова»
galkin-alexandr@yandex.ru

Еременко Виталий Андреевич

Доктор технических наук, профессор РАН, директор научно-исследовательского центра «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии», Горный институт НИТУ «МИСиС»
prof.eremenko@gmail.com

Ермолов Александр Александрович

Кандидат географических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории геоэкологии Севера, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
ermolov@geogr.msu.ru

Жидков Роман Юрьевич

Кандидат геолого-минералогических наук, главный инженер отдела цифровой картографии, ГБУ «Мосгоргеотрест»
rzhidkov@gmail.com

Зайцев Андрей Александрович

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», Российский университет транспорта (МИИТ)
andrei.zaitsev2010@yandex.ru

Исаев Владислав Сергеевич

Кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Университет МГУ ППИ (Шэньчжэнь, КНР)
6620240023@smbu.edu.com

Королев Владимир Александрович

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной и экологической геологии, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, член-корреспондент РАЕН
va-korolev@bk.ru

Кошурников Андрей Викторович

Доктор геолого-минералогических наук, научный сотрудник кафедры криолитологии и гляциологии, старший научный сотрудник лаборатории математических методов и геокриологического прогноза, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, генеральный директор, ООО «МГУ-Геофизика»
koshurnikov@msu-geophysics.ru

Латыпов Айрат Исламгалиевич

Доктор геолого-минералогических наук, руководитель лаборатории по исследованию грунтов в строительстве, доцент по специальности «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение», Казанский федеральный университет
airatlat@mail.ru

Лю Цзянькунь (Jiankun Liu)

Кандидат геолого-минералогических наук, профессор, Университет Сунь Ятсена (Гуанчжоу, КНР)
liujiankun@mail.sysu.edu.cn

Мариничев Максим Борисович

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры оснований и фундаментов, Кубанский государственный аграрный университет
marinichev@list.ru

Матерухин Андрей Викторович

Доктор технических наук, декан факультета геоинформатики и информационной безопасности, МИИГАиК
materukhinav@edu.miigaik.ru

Маштаков Александр Сергеевич

Кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры географии и картографии, Волгоградский государственный университет, директор, ООО «ВОЛГАСТРОИТЕХНОЛОГИЯ»
alsergmast@yandex.ru

Мирный Анатолий Юрьевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной и экологической геологии, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, генеральный директор, ООО «Независимая геотехника»
MirnyyAY@mail.ru

Миронюк Сергей Григорьевич

Кандидат геолого-минералогических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова; научный сотрудник, ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова»
mironyuksg@gmail.com

Молдобеков Болот Дуйшеналиевич

Кандидат геолого-минералогических наук, доцент, содиректор, Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли
b.moldobekov@caiag.kg

Пиоро Екатерина Владимировна

Кандидат геолого-минералогических наук, генеральный директор, ООО «Петромоделинг Лаб»
ekaterina.pioro@petromodeling.com

Погорелов Анатолий Валерьевич

Доктор геологических наук, профессор кафедры геоинформатики, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»
pogorelov_av@bk.ru

Салихов Фарид Салохиддинович

Доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры математики и естественных наук, филиал МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Душанбе
ffaarriidd@bk.ru

Самсонов Тимофей Евгеньевич

Доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, и.о. заведующего кафедрой картографии и геоинформатики географического факультета, МГУ имени М.В. Ломоносова
tsamsonov@geogr.msu.ru

Слободян Владимир Юрьевич

Генеральный директор АО «Институт экологического проектирования и изысканий» (АО «ИЕПИ»)
v.slobodyan@iepi.ru

Степаненко Виктор Михайлович

Доктор физико-математических наук, заместитель директора, Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова
v.stepanenko@rcc.msu.ru

Судакова Мария Сергеевна

Кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры сейсмологии и геоакустики, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова; научный сотрудник Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН
m.s.sudakova@yandex.ru

Труфанов Александр Николаевич

Кандидат технических наук, заведующий лабораторией методов исследования грунтов, НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство»
trufanov54@gmail.com

Федоренко Евгений Николаевич

Доктор технических наук, научный консультант, ООО «НИП-Информатика»
Evgeniy.Fedorenko@nipinfor.ru

Фоменко Игорь Константинович

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной геологии МГРИ имени С. Орджоникидзе
fomenkoik@mgri.ru

Фролова Юлия Владимировна

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной и экологической геологии, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
ju_frolova@mail.ru

Харитонов Наталья Александровна

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
tchenat@mail.ru

Цимбельман Никита Яковлевич

Доктор технических наук, доцент, профессор и директор департамента геоинформационных технологий Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ)
tsimbelman.nya@dvfu.ru

Чалов Сергей Романович

Доктор геологических наук, заведующий НИ лабораторией эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, профессор кафедры гидрологии суши, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
hydroserg@mail.ru

Черепанский Михаил Михайлович

Доктор геологических наук, профессор кафедры гидрогеологии имени В.М. Швеца, гидрогеологический факультет МГРИ имени С. Орджоникидзе
vodamch@mail.ru

Чибуничев Александр Георгиевич

Доктор технических наук, профессор кафедры фотограмметрии, МИИГАиК
agchib@mail.ru

Чжан Шэнжун (Zhang Shengrong)

Кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Северо-Восточный университет лесного хозяйства (Харбин, КНР)
zhangshengrong1988@nefu.edu.cn

Чжан Цзе (Zhang Ze)

Кандидат геолого-минералогических наук, профессор факультета гражданского строительства и транспорта, Северо-Восточный университет лесного хозяйства (Харбин, КНР), директор Китайско-Российской лаборатории инженерии и экологии холодных регионов
zez@nefu.edu.cn

Шаповалов Владимир Леонидович

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство», ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»
shapovalovvl@rgups.ru

Шарафутдинов Рафаэль Фаритович

Доктор технических наук, директор НИИОСП имени Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», учёный секретарь Российского общества по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению (РОМГГиФ)
linegeo@mail.ru

Шепитько Таисия Васильевна

Доктор технических наук, профессор, директор Института пути, строительства и сооружений МИИТ, председатель ученого совета института.
shepitko-tv@mail.ru

ГЕНЕРАЛЬНЫЕ СПОНСОРЫ ЖУРНАЛА



Геотехническая лаборатория
АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ»



ООО «ПЕТРОМОДЕЛИНГ»



Институт
экологического
проектирования
и изысканий

АО «ИНСТИТУТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗЫСКАНИЙ»

СПОНСОРЫ ЖУРНАЛА



ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

ООО НПП «ГЕОТЕК»



MALININSOFT



ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» / FUGRO

EngGeo

Обработка и хранение результатов
инженерно-геологических
изысканий

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
«ENGGEO»



КАЗГЕОЛАБ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ



ПРОГРАМНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ДЛЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

MACCAFERRI

MACCAFERRI / ГАБИОНЫ
МАККАФЕРРИ СНГ

Организаторы:

Независимый электронный журнал
Геоинфо

К ДЕСЯТИЛЕТИЮ ЖУРНАЛА «ГЕОИНФО»
ОТМЕТИМ В ХОРОШЕЙ
КОМПАНИИ!

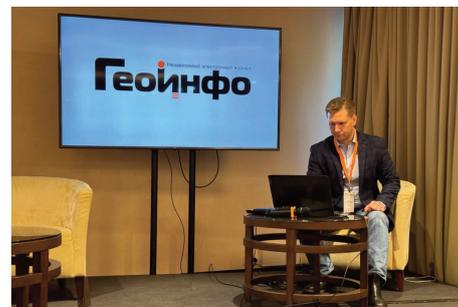
VI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА В ОБЛАСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ
ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, ГЕОТЕХНИКИ,
МОНИТОРИНГА И ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ТЕРРИТОРИИ
Геоинфо EXPO
2026

1000+ посетителей

30+ экспонентов

40+ мероприятий деловой программы

150+ докладов



Посещение выставки и всех мероприятий
деловой программы бесплатное

15-16 апреля 2026 года

Москва, Звезды Арбата 5*, Новый Арбат, 32

ГЕОИНФО

Электронное издание

Издается с марта 2016 года.

Периодичность: 4 выпуска в год.

ISSN: 2949-0677

Префикс DOI: 10.58339

Редакцией журнала принимаются к рассмотрению статьи по следующим темам: инженерные изыскания для строительства; геотехническое проектирование; инженерная и экологическая геология; механика грунтов, геотехника, проектирование оснований и фундаментов; экология и экологические исследования; проблемы инженерно-геологического риска; методы прогнозирования, предотвращения, минимизации и ликвидации последствий опасных природных процессов и явлений; инженерная защита территории.

Учредитель:

ИП Ананко Виктор Николаевич

Издательство:

ГеоИнфо, ИП Ананко В.Н.

Адрес:

119146, РФ, Москва,
ул. 3-я Фрунзенская, 10/12

Редакция:

Самарин Евгений Николаевич
Главный редактор

Васин Михаил Васильевич
Обозреватель

Дьяченко Людмила
Специальный корреспондент

Еремеева Мария
Специальный корреспондент

Виноградова Вера
Специальный корреспондент

Дизайн и верстка:

ИП Лившиц С.С.

Официальный сайт:

Geoinfo.ru

Адрес в НЭБ:

https://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=80357

Распространяется бесплатно.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.

Дата выхода в свет: 30.01.2026

© Ананко Виктор Николаевич, 2026

© ГеоИнфо, 2026

Фото на обложке: ГеоИнфо

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Концепция первой редакции проекта ГОСТ Р «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов». Приглашение к обсуждению 8
Иоспа А.В., Хайбулина Е.М.

ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Методы оценки параметров двойного электрического слоя глинистых грунтов 16
Королев В.А., Евтихов М.В.

МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Особенности определения параметров сопротивления сдвигу скальных грунтов. Экспериментальные и расчетные методы 22
Фролова Ю.В., Большаков И.Е., Зеркаль О.В.

ЦИФРОВИЗАЦИЯ

Инженерные изыскания в условиях новой реальности. Смогут ли цифровизация победить демпинг и фальсификации? 32
Шмелев Д.Г., Зепалов Ф.Н.

ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ

Предварительная оценка исполнителей инженерно-геологических изысканий в части определения физико-механических свойств грунтов 44
Беляев П.Ю., Селютин А.С., Балашова Н.Г., Харьков Н.С., Ефименко М.Н., Пашенко Ф.А.

ПЕРЕВОДНЫЕ СТАТЬИ

Трансформации в геотехнике с помощью искусственного интеллекта: достижения, проблемы и перспективы 52
Шейл Б., Анагностопулос К., Бакли Р., Чиантиа М.О., Фебрианто Э., Фу Ц., Гао Ч., Гэн С., Гун Б., Хэнли К., Хэ П., Коломватсос К., Лопес Б.К.Ф.Л., Нинич Й., Превитали М., Резания М., Руис-Лопес А., Сунь Ц., Сурьясентана С., Таборда Д., Утили С., Вайт С., Чжан П.

Мониторинг фильтрации в пределах и вокруг плотин с использованием геофизических методов: краткий обзор 82
Кайоде О.Т., Одукойя А.М., Адагунодо Т.А., Адениджи А.А.

Соответствие научным специальностям ВАК

Тематика публикаций журнала «ГеоИнфо» соответствует следующим научным специальностям, утвержденным Высшей аттестационной комиссией Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Естественные науки

1.6. Науки о Земле и окружающей среде

- 1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика
- 1.6.4. Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых
- 1.6.6. Гидрогеология
- 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение
- 1.6.8. Гляциология и криология Земли
- 1.6.9. Геофизика
- 1.6.15. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель
- 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия
- 1.6.17. Океанология
- 1.6.18. Науки об атмосфере и климате
- 1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия
- 1.6.20. Геоинформатика, картография
- 1.6.21. Геоэкология
- 1.6.22. Геодезия

2. Технические науки

2.1. Строительство и архитектура

- 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения
- 2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология
- 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей
- 2.9. Транспортное строительство
- 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог



METHODS AND TECHNIQUES OF INVESTIGATIONS

Concept of the first draft of GOST R “Soils. Sampling, packaging, transportation, and storage of samples”. Invitation to discussion8
Iospa A.V., Khaibulina E.M.

SOIL AND ROCK SCIENCE

Methods for evaluating the parameters of the electric double layer in clayey soils16
Korolev V.A., Evtikhov M.V.

SOIL AND ROCK MECHANICS

Specifics of determining shear strength parameters of rocks. Experimental and analytical methods22
Frolova Ju.V., Bol'shakov I.E., Zerkal' O.V.

DIGITALIZATION

Site investigations for construction in the new reality. Can digitalization overcome dumping and falsification?32
Shmelev D.G., Zepalov F.N.

SITE INVESTIGATIONS (ENGINEERING SURVEYS)

Preliminary assessment of site investigation contractors with regard to the determination of physical and mechanical properties of soils and rocks44
Belyaev P.Yu., Selyutin A.S., Balashova N.G., Kharkov N.S., Efimenko M.N., Pashchenko F.A.

TRANSLATED ARTICLES

Artificial intelligence transformations in geotechnics: progress, challenges and future enablers52
Sheil B., Anagnostopoulos C., Buckley R., Ciantia M.O., Febrianto E., Fu J., Gao Z., Geng X., Gong B., Hanley K., He P., Kolomvatsos K., Lopes B.C.F.L., Ninic J., Previtali M., Rezanian M., Ruiz-Lopez A., Sun J., Suryasentana S., Taborda D., Utili S., Whyte S., Zhang P.

Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review ...82
Kayode O.T., Odukoya A.M., Adagunodo T.A., Adeniji A.A.



GEOINFO

Electronic publication

Published since 2016

Publication frequency:
10 issues per year

ISSN: 2949-0677

DOI prefix: 10.58339

The editorial board of the journal accepts for consideration articles on the following topics: Site Investigation for Construction; Geotechnical Designing; Engineering and Ecological Geology; Soil Mechanics; Geotechnics; Design of Bases and Foundations; Ecology and Environmental Studies; Engineering-Geological Risk Problems; Methods for Forecasting, Preventing, Minimizing and Eliminating the Consequences of Hazardous Natural Processes and Phenomena; Engineering Protection of Territories.

Founder:
Ananko Viktor Nikolaevich

Publisher:
GeoInfo, individual entrepreneur
Ananko V.N.

Address:
10/12 3rd Frunzenskaya str., Moscow,
119146, Russian Federation

Editorial staff:
editor-in-chief:
Samarin Evgenii Nikolaevich;

analyst:
Vasin Mikhail Vasilyevich;

D'yachenko Lyudmila
Special Correspondent;

Eremeeva Mariya
Special Correspondent;

Vinogradova Vera
Special Correspondent;

Designer and layout designer:
individual entrepreneur
Livshic S.S.

Official website:
Geoinfo.ru

Address in the National Electronic Library of the RF:
https://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=80357

It is distributed for free

The editorial staff is not responsible for the content of advertising materials

Publication date: 30.01.2026

© Ananko Viktor Nikolaevich, 2026

© GeoInfo, 2026

Cover photo: GeoInfo



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к первой редакции проекта национального стандарта
**ГОСТ Р XXXXX—202X «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и
 хранение образцов»**
 (разработка ГОСТ Р XXXXX-XXXX на основе ГОСТ 12071—2014)
 (шифр темы ПНС 1.13.506-1.005.25)

1. Сведения о разработчике стандарта

АО «НИЦ «Строительство», институт НИИОСП им. Н.М. Герсевича. Юридический адрес организации: 141367, Российская Федерация, Московская область, Сергиево-Посадский район, г. Сергиев Посад, пос. Загорские Дали, дом 6-11. Фактический адрес организации: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6.

2. Наименование работ

Разработка национального стандарта ГОСТ Р XXXXX-XXXX «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов» на основе ГОСТ 12071-2014.

КОНЦЕПЦИЯ ПЕРВОЙ РЕДАКЦИИ ПРОЕКТА ГОСТ Р «ГРУНТЫ. ОТБОР, УПАКОВКА, ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ ОБРАЗЦОВ». ПРИГЛАШЕНИЕ К ОБСУЖДЕНИЮ

Поступила в редакцию: 16.12.2025

Принята к публикации 25.01.2026

Опубликована 30.01.2026

ИОСПА А.В.

Главный геолог лаборатории механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство»

ХАЙБУЛИНА Е.М.

Ведущий научный сотрудник лаборатории механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство»

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается первая редакция проекта национального стандарта ГОСТ Р XXXXX-202X «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов», подготовленного на основе действующего ГОСТ 12071-2014. Приведен анализ основных изменений по сравнению с предыдущей версией стандарта, а также обозначены вопросы, требующие дополнительного обсуждения профессиональным сообществом. Внимание уделено как некоторым практическим аспектам отбора и сохранения образцов грунта, так и значимости участия широкого круга специалистов в процессе разработки и публичного обсуждения проекта документа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

разработка нормативных документов; национальный стандарт; ГОСТ Р; грунты; отбор образцов; упаковка образцов; транспортирование образцов; хранение образцов.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Иоспа А.В., Хайбулина Е.М. Концепция первой редакции проекта ГОСТ Р «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов». Приглашение к обсуждению // Геоинфо. 2025. Т. 7. № 4. С. 8–14.
 DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-8-14.

CONCEPT OF THE FIRST DRAFT OF GOST R “SOILS. SAMPLING, PACKAGING, TRANSPORTATION, AND STORAGE OF SAMPLES”. INVITATION TO DISCUSSION

Received: 16.12.2025

Accepted for publication 25.01.2026

Published 30.01.2026

IOSPA A.V.

Chief Geologist, Laboratory for the Mechanics of Hazardous Natural and Man-Made Processes and the Development of Engineering Protection Methods, NIIOSTP named after N.M. Gersevanov, JSC “Research Center of Construction”

KHAIBULINA E.M.

Leading Research Scientist, Laboratory for the Mechanics of Hazardous Natural and Man-Made Processes and the Development of Engineering Protection Methods, NIIOSTP named after N.M. Gersevanov, JSC “Research Center of Construction”

ABSTRACT

This article discusses the first draft of the national standard GOST R XXXXX-202X “Soils. Sampling, packaging, transportation, and storage of samples” prepared on the basis of the current GOST 12071-2014. We analyze the main changes compared to the previous version of the standard, identify issues requiring further discussion by the professional community, pay attention to some practical aspects of sampling and preservation of samples, as well as to the importance of broad expert participation during the development and public discussion of the draft document.

KEYWORDS:

development of regulatory documents; national standard; GOST R; soils and rocks; sampling; sample packaging; sample transportation; sample storage.

FOR CITATION:

Iospa A.V., Khaibulina E.M. Kontseptsiya pervoi redaktsii proekta GOST R “Grunty. Otbor, upakovka, transportirovanie i khranenie obraztsov”. Priglasenie k obsuzhdeniyu [Concept of the first draft of GOST R “Soils. Sampling, packaging, transportation, and storage of samples”. Invitation to discussion] // Geoinfo. 2025. T. 7. № 4. S. 8–14. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-8-14 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

В связи с началом публичного обсуждения первой редакции проекта национального стандарта ГОСТ Р XXXXX-202X «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов» (на основе ГОСТ 12071-2014 [1]) разработчики документа приглашают профессиональное сообщество принять активное участие в разработке данного нормативного документа – как в виде дискуссии на сайте (в телеграм-канале), так и в виде замечаний и предложений, которые можно направлять по электронному адресу onmd_cstroy@mail.ru с обозначением темы: «Проект национального стандарта ГОСТ Р XXXXX-202X «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов (разработка ГОСТ Р XXXXX-XXXX на основе ГОСТ 12071-2014)».

Уведомление о разработке стандарта размещено на сайте Росстандарта.

В настоящей статье рассмотрены основные изменения по сравнению с ГОСТ 12071-2014 [1], на основе которого разрабатывался проект первой редакции рассматриваемого документа, а также поставлен ряд вопросов, которые, на взгляд разработчиков, требуют обсуждения.

Действующий ГОСТ 12071-2014, разработанный ОАО «ПНИИИС», является продуктом эволюции линейки ГОСТ 12071-2000 [2], ГОСТ 12071-84 [3], ГОСТ 12071-72 [4], ГОСТ 12071-66 [5]. При возникновении разночтений во время работы на основе действующего документа разработчики обращались и к более ранним версиям ГОСТ 12071, а также к рекомендациям ПНИИИС 1970 года [8], в которых обязательные требования развернуты в виде практических рекомендаций.

В настоящей статье НЕ обсуждается вопрос о том, что такое «разработка ГОСТ Р на основе действующего

ГОСТ», поскольку авторам неизвестны действующие нормативные документы, определяющие данную терминологию. Непосредственные исполнители впервые познакомились с этим словосочетанием в материалах открытого конкурса на право заключения государственного контракта на выполнение работ по разработке и подготовке к утверждению стандартов в области инженерных изысканий (лота 2.3.8), в рамках которого разрабатываются десять ГОСТ – пять новых, три проходящих пересмотр (ГОСТ 20276.1-2020, ГОСТ 20276.2-2020, ГОСТ 12248.3-2020) и два разрабатываемых с формулировкой «разработка ГОСТ Р на основе ГОСТ...» (предлагаемый к рассмотрению в настоящей статье ГОСТ Р «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов» на базе ГОСТ 12071-2014 и ГОСТ Р «Грунты. Определение плотности дисперсных

грунтов методом замещения объема» на базе ГОСТ 28514-90).

Авторы выражают огромную благодарность специалистам, принявшим активное участие в разработке первой редакции, – А.А. Свертилову, Э.С. Гречищевой, А.В. Ростовцеву и другим, а также специалистам из рабочей группы ТК506 «Инженерные изыскания и геотехника» Росстандарта – Е.А. Вознесенскому, Г.Г. Болдыреву, В.Н. Широкову, сделавшим полезные замечания и рекомендации в процессе рассмотрения проекта первой редакции ГОСТ Р и его выноса на публичное обсуждение.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ►

На взгляд разработчиков, процедуры получения образцов грунта и их сохранение до начала лабораторных исследований – одна из важных тем, на которые подчас обращается недостаточно внимания при планировании и проведении инженерно-геологических изысканий (ИГИ).

Действующий ГОСТ 12071-2014, с точки зрения авторов, является вполне сбалансированным документом. Он, конечно, не лишен недостатков, с которыми приходится сталкиваться в случаях, когда он применяется формально, с полным отсутствием ответственности исполнителей за результат на каждом этапе «жизненного пути» образца. Однако осознанное соблюдение требований ГОСТ 12071-2014 позволяет получить качественные образцы, а дополнительные требования лаборатории по каким-то видам испытаний для образцов природного сложения отлично обеспечиваются при ответственном отношении.

Но в настоящий момент, как считают авторы, вполне допустимо предложить назревшие изменения, обсудить накопившиеся замечания (принимаясь Росстандартом и разработчиками каждого ГОСТ постоянно) и противоречия в том или ином виде.

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНОГО ДОКУМЕНТА ►

Обоснование необходимости разработки документов производилось в недрах ТК-506 Росстандарта, и выбор именно рассматриваемого в данной статье ГОСТ неочевиден, но по сроку действия (с 2015 года) ГОСТ 12071-2014 подлежит (через 5 лет после введения) оценке научно-технического уровня и/или проверке его содержания, что, как правило, осуществляется путем запроса о предоставлении предло-

жений по обновлению стандарта или его отмены.

Таким образом, если и не разработка нового ГОСТ Р, то по крайней мере ревизия действующего ГОСТ 12071-2014 давно назрела и с моральной, и с формальной точек зрения.

АНАЛИЗ НЕДОСТАТКОВ И ПРОБЕЛОВ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ГОСТ 12071-2014 ►

Обсуждаемый в статье нормативный документ составлен на основании опыта применения действующего ГОСТ 12071-2014, а также наиболее полезных предложений, частично принятых при подготовке этого действующего стандарта в 2014 году.

Основные недостатки ГОСТ 12071-2014, над которыми работали при подготовке первой редакции нового ГОСТ Р, перечислены ниже.

1. Область применения действующего ГОСТ 12071-2014 охватывает все грунты без исключений. По мнению экспертов рабочей группы ТК 506, область применения разрабатываемого ГОСТ Р необходимо ограничить, исключив крупнообломочные грунты.

2. При работах в рамках действующего ГОСТ 12071-2014 лаборатории нередко сталкиваются с недостаточным объемом грунтового материала для намеченных комплексов испытаний, особенно с учетом постоянного увеличения объема трехосных испытаний немерзлых грунтов, испытаний грунтов в различном проектном состоянии (мерзлые – при различных значениях температуры и при оттаивании, немерзлые – в различном напряженно-деформированном состоянии и пр.). При этом существуют и минимальные требования к образцам, отбираемым для определения только классификационных характеристик по сложению, составу и водно-физическим характеристикам. Расширены требования к объему отбора образцов природного сложения и нарушенного сложения. Эти изменения, по мнению авторов, позволят, с одной стороны, обеспечить достаточность отобранных образцов для лабораторных испытаний, а с другой стороны, будут оптимальны по объему, поскольку все процедуры отбора, упаковки, хранения и транспортирования весьма затратны и по времени, и по накладным расходам.

3. ГОСТ 12071-2014 характеризуется неоднозначностью требований к качеству отбора образцов, обусловленной тем, что большинство требований применяются к грунтам, очень разным

по составу и состоянию, с различными структурными связями. Обеспечение качества образцов на всех этапах от отбора до поступления на лабораторные исследования, помимо нередко наблюдаемых прямых нарушений порядка упаковки, в значительной степени зависит от условий транспортирования и должно контролироваться при сдаче-приемке в лабораторию.

4. В ГОСТ 12071-2014 регламентированы единые требования к срокам хранения без учета как очень разных особенностей логистики в нашей стране, так и вероятности и скорости изменений состава и свойств отобранных образцов природного сложения, а также возможностей контроля таких трансформаций.

5. Действующий ГОСТ 12071-2014 ориентирован в первую очередь на получение образцов из керна скважин. Недостаточное внимание уделено отбору образцов из других видов горных выработок – шурфов, котлованов, канав и пр.

6. Современные буровые установки позволяют применять более широкий спектр породоразрушающих инструментов и пробоотборников, чем предусмотрено действующим ГОСТ 12071-2014.

7. В части применения различных материалов для упаковки образцов грунта природного сложения ГОСТ 12071-2014 предлагает в случае парафинирования проб использовать только смесь нефтяного парафина с гудроном, представляющую собой материал с неплохими изолирующими свойствами и невысокой стоимостью. Однако в том же классе материалов применяются (в том числе указаны в зарубежных стандартах) воск, цезезин и даже чистый парафин (пусть и с оговорками). Использование же смеси парафина с гудроном является более затратным, требуя больше времени, материалов и трудовых ресурсов, и нуждается в устройстве вентиляции в помещениях, в которых производится работа с этой смесью. Кроме того, данный метод далеко не всегда применим при упаковке образцов непосредственно на месте их отбора при проходке горных выработок, что резко сокращает возможность сохранения ненарушенности монолитов грунтов. В ГОСТ 12071-2014 описываются довольно старые приемы и материалы в отношении использования керноприемных гильз при отборе образцов ненарушенного сложения, не учитываются современные конструкции пробоотборных гильз. Рабочая группа ТК 506 также выступает против рекомендации ГОСТ 12071-2014 использо-

вать при изоляции соединений гильз изолянту (современным аналогом которой является клейкая лента, например скотч). Применение современных паровлагонепроницаемых материалов (например, полиэтиленовой пленки) в этом действующем документе допускается, однако не описан порядок их использования для обеспечения надежной защиты образцов грунта природного сложения. Рабочая группа ТК 506 настаивает на том, что полиэтиленовая пленка не является достаточной защитой, в первую очередь с точки зрения механической сохранности монолитов грунта.

8. Действующий ГОСТ 12071-2014 предписывает заполнять этикетки монолитов исключительно простым карандашом. Однако современные технологии позволяют оптимизировать подготовку полевой документации, используя широкий спектр материалов и технических средств – вплоть до печати этикеток (на бумаге или на самоклеящейся основе) непосредственно при отборе и упаковке образцов.

9. Требования к отбору образцов нарушенного сложения в действующем ГОСТ 12071-2014 представлены очень скудно, а указанные объемы таких проб недостаточны для ряда методов лабораторных исследований.

10. В действующем ГОСТ 12071-2014 практически отсутствуют требования к отбору образцов скальных грунтов.

11. Приложения А, Б действующего ГОСТ 12071-2014 имеют ряд незначительных противоречий с текстовой частью. В них также не определяется область применимости отдельных методов, например отбора несвязных грунтов (песков различного сложения или др.) с использованием грунтоносов, в том числе в водоносных горизонтах ниже уровней подземных вод, что приводит к разночтениям среди разных специалистов и организаций.

ОБЗОР СТАНДАРТОВ-АНАЛОГОВ В МЕЖДУНАРОДНОЙ ПРАКТИКЕ И В СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЯХ В РОССИИ

У разрабатываемого ГОСТ Р есть международные аналоги: ASTM D4220 [7]; ISO 22475-1 [8].

Кроме того, у отдельных разделов разрабатываемого ГОСТ Р есть следующие международные аналоги: ASTM D1587 [9]; ASTM D3550 [10]; ASTM D5079 [11]; ASTM D6151 [12]; ASTM D6169 [13]; ASTM D6519 [14]; ASTM D7015 [15].

Подходы систем ASTM и ISO, как в целом, так и в области инженерной геологии и геотехники, принципиально отличаются в части методологии нормирования. ISO – это глобально согласованные, универсальные стандарты, ориентированные на глобальную совместимость, управление и широкий спектр отраслей, в то время как ASTM – более практико-ориентированные стандарты для конкретных методов и методик с соответствующими ограничениями. Соответственно, по содержанию и объему нормирования ASTM и ISO, включая вышеперечисленные, сильно различаются между собой. Среди ASTM каждый документ предельно лаконичен и может использоваться как методические рекомендации по производству работ каждым специалистом, «помещааясь в карман рабочей одежды». В то время как, например, ISO 22475-1 содержит около 200 страниц и описывает все процедуры от методик горнопроходческих работ до полевого отчета, в том числе приводит схематические чертежи различного оборудования, однако в части применения рекомендаций сохраняет значительную гибкость. К примеру, формулировка «соответствие категории отбора проб определенному классу качества возможно лишь при определенных благоприятных грунтовых условиях, которые требуют отдельного описания (обоснования) в каждом случае» приводит к необходимости тщательной проработки программы ИГИ с обоснованием каждой входящей в нее процедуры, что очень хорошо соответствует логике сводов правил, однако трудно реализуемо в рамках системы документов, имеющих статус обязательного применения.

По сравнению с ASTM и ISO система ГОСТ находится в промежуточном положении. Она содержит как глобальные ГОСТ ИСО, так и ГОСТ, содержащие лаконичные требования к методам или продукции. ГОСТ 12071 до сих пор развивался как краткий стандарт на методику проведения операций от получения образца из горной выработки до начала лабораторных исследований для использования всеми участвующими специалистами – от техника, выполняющего конкретные операции, до специалиста по организации ИГИ на этапе планирования работ. Такое позиционирование нового ГОСТ Р разработчики старались сохранить при подготовке проекта его первой редакции.

В российской системе нормативных документов действует ГОСТ Р ИСО 22475-

1-2017 «Геотехнические исследования и испытания. Методы отбора проб и измерения подземных вод. Часть 1. Технические принципы для выполнения» [16]. Данный стандарт является переводом зарубежного стандарта ISO 22475-1 и не унифицирован с остальной российской системой нормативных документов в строительстве (в частности, с СП 446.1325800-2019), а в настоящее время постепенно устаревает по мере принятия новых глобальных версий ISO (сейчас действует ISO 22475-1:2021 [17]). Тем не менее при разработке проекта ГОСТ Р приходится учитывать, что многие термины, конструкции и т.д. уже нормированы в действующем ГОСТ Р ИСО 22475-1-2017.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Структура предлагаемого нормативного документа

Структура нового ГОСТ Р «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов» включает следующие разделы.

1. Область применения
2. Нормативные ссылки.
3. Термины и определения.
4. Общие положения.
5. Оборудование и материалы.
6. Отбор образцов нарушенного сложения.
7. Отбор монолитов.
8. Упаковка образцов.
9. Транспортирование и хранение образцов.

Приложение А. Виды бурового инструмента для отбора образцов грунта из скважин.

Приложение Б. Основные типы грунтоносов.

Приложение В. Минимальные размеры монолитов, отбираемых из буровых скважин.

Приложение Г. Оценка качества образцов грунта.

Также члены рабочей группы ТК506 внесли предложение добавить приложение «Стандартная форма ведомости образцов». Аргументы в его пользу были приняты.

В целом, содержание и структура будущего документа будут соответствовать требованиям ГОСТ Р 1.5-2012 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные. Правила построения, изложения, оформления и обозначения» [18] и ГОСТ 1.5-2001 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударствен-

ные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению» [19].

Ключевые нововведения в предложенной первой редакции ГОСТ Р ►

Была проведена комплексная переработка всего ГОСТ 12071-2014 «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов». При этом мы выделяем следующие основные нововведения.

1. Область распространения по требованию экспертов рабочей группы ТК 506 ограничена, исключены крупнообломочные грунты, хотя требования к методике отбора образцов крупнообломочных грунтов, по мнению авторов, к настоящему времени проработаны в достаточной степени и были бы полезны при использовании документа.

2. В раздел 9 «Транспортирование и хранение образцов» добавлено указание о возможности использования увеличенных сроков хранения образцов грунта природного сложения при соблюдении дополнительных требований. Это нововведение, по мнению разработчиков, позволит проводить изыскания без вынужденных отступлений от ГОСТ Р при работе в удаленных регионах, а также при длительных циклах испытаний, например многолетнемерзлых грунтов, и при необходимости проведения дополнительных испытаний при изменении окончательных проектных решений по фундаментам в процессе разработки проектной документации.

3. Во все разделы добавлены требования к отбору, упаковке, хранению и транспортировке образцов скальных грунтов.

4. Требования по оценке качества образцов (пункт 7.12 приложения Г) дополнены указанием о применимости проб различного качества для определения тех или иных классификационных характеристик, механических свойств грунтов для образцов как нарушенного, так и природного сложения. По мнению разработчиков, это нововведение позволит лучше formalизовать взаимодействие между специалистами, ответственными за отбор проб, определение состава необходимых лабораторных исследований и выбор лабораторий, а также отслеживать достаточность объема пробоотбора при выполнении изысканий. Например, если целью отбора образца нена-

рушенного сложения является определение характеристик плотности грунта по ГОСТ 5180, то он может быть совсем небольшого размера, однако для проведения комплекса испытаний методом трехосного сжатия (включающего четыре опыта и определение классификационных характеристик) требования к габаритам образца будут другими.

5. Для связных немерзлых грунтов исключена возможность упаковки образцов природного сложения в полиэтиленовую пленку без помещения в каскету (трубу, гильзу) и последующей заливки парафиновыми смесями. Этот полный запрет введен по требованию экспертов рабочей группы ТК 506, хотя разработчики видят проблему скорее не в недостатках полиэтиленовой пленки как материала, а в огромном количестве нарушений требований действующего ГОСТ в части правил упаковки, транспортировки и хранения образцов грунта природного сложения. Испытательные лаборатории вынуждены отбраковывать огромное количество ценных образцов по причине легкомысленного отношения изыскательских организаций к логистическим процедурам, регламентированным ГОСТ и нацеленным на сохранение состава, строения и состояния образцов.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ СЛОЖНОСТЕЙ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО ГОСТ Р ►

Российская Федерация – огромная страна, очень неоднородная как по транспортной доступности, так и по обеспеченности различных регионов техническими средствами, с очень разнообразными погодными условиями, на большей части территории весьма суровыми, определяющими и сезонность работ, и большое количество активированных дней (простоев), например в зимний период. Геологическая среда также чрезвычайно разнообразна как по составу грунтов, так и по набору возможных опасных природных процессов, явлений и их сочетаний.

Одним из следствий такого разнообразия является сложность разработки единых правил, не противоречащих региональной специфике требований ГОСТ, которые фактически становятся обязательными к применению (в отличие от зарубежных систем ASTM и ISO).

Расширение некоторых возможностей, предложенных в представлен-

ной первой редакции проекта ГОСТ Р по сравнению с действующим ГОСТ 12071-2014, на взгляд разработчиков, требует широкого обсуждения. Например, возможность применения при парафинировании не только смеси парафина с гудроном, но и других материалов, в том числе чистого нефтяного парафина. Нефтяной парафин обладает значительно более высокой паропроницаемостью по сравнению с воском или гудроном и, по нашим наблюдениям, при длительном хранении способствует дегидратации (иссушению) образца. Однако при герметизации монолитов методом заливки в пластиковые или картонные гильзы намного практичнее использовать чистый парафин. Также парафин, хотя и с оговорками, рекомендован основными зарубежными нормами в качестве изолирующего материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Разрабатываемый ГОСТ Р XXXXX-2025 «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов (разработка ГОСТ Р на основе ГОСТ 12071-2014)» позволяет устранить некоторые неоднозначные требования по сравнению с действующим ГОСТ 12071-2014, добавить недостающие разделы, при этом сохраняя имеющиеся преимущества, в первую очередь лаконичность (по возможности) по сравнению с ГОСТ Р ИСО 22475-1-2017).

Разработка новых нормативных документов практически всегда сопряжена с проблемами их внедрения в практику, что часто связано со сложностями применимости тех или иных методов в конкретных региональных или отраслевых условиях. В существующей структуре профессиональных объединений (НОПРИЗ, СРО, ТК 506 Росстандарта) обязанность ответственного контроля разрабатываемых документов возложена именно на эти объединения, которые должны привлекать профильных специалистов из своих организаций-членов. Однако их активность в отношении еще не принятых нормативных документов крайне низка.

Чтобы минимизировать проблемы применения разрабатываемого ГОСТ Р, организация-разработчик (НИИОСП им. Н.М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство») приглашает всех заинтересованных к широкому общественному обсуждению проекта этого документа. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ►

1. ГОСТ 12071-2014. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. М.: Стандартиформ, 2015.
2. ГОСТ 12071-2000. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. М.: ИПК «Издательство стандартов», 2001.
3. ГОСТ 12071-84. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. М.: Издательство стандартов, 1985.
4. ГОСТ 12071-72. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. М.: Издательство стандартов, 1972.
5. ГОСТ 12071-66. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. М.: Издательство стандартов, 1966.
6. Рекомендации по отбору, упаковке, транспортированию и хранению образцов грунтов при инженерно-геологических изысканиях для строительства. М.: ПНИИИС Госстроя СССР, Изд-во литературы по строительству, 1970.
7. ASTM D4220-14. Standard practices for preserving and transporting soil samples.
8. ISO 22475-1. Geotechnical investigation and testing – sampling methods and groundwater measurements. Part 1. Technical principles for the sampling of soil, rock and groundwater.
9. ASTM D1587-15. Standard practice for thin-walled tube sampling of fine-grained soils for geotechnical purposes.
10. ASTM D3550-17. Standard practice for thick wall, ring-lined, split barrel, drive sampling of soils.
11. ASTM D5079-25. Standard practices for preserving and transporting rock core samples.
12. ASTM D6151-15. Standard practice for using hollow-stem augers for geotechnical exploration and soil sampling.
13. ASTM D6169-21. Standard guide for selection of subsurface soil and rock sampling devices for environmental and geotechnical investigations.
14. ASTM D6519-08. Standard practice for sampling of soil using the hydraulically operated stationary piston sampler.
15. ASTM D7015-18. Standard practices for obtaining intact block (cubical and cylindrical) samples of soils.
16. ГОСТ Р ИСО 22475-1-2017. Геотехнические исследования и испытания. Методы отбора проб и измерения подземных вод. Часть 1. Технические принципы для выполнения. М.: Стандартиформ, 2017.
17. ISO 22475-1:2021. Geotechnical investigation and testing.
18. ГОСТ Р 1.5-2012. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные. Правила построения, изложения, оформления и обозначения. М.: Стандартиформ, 2013.
19. ГОСТ 1.5-2001. Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению. М.: ИПК «Издательство стандартов», 2002.

REFERENCES ►

1. GOST 12071-2014. Grunty. Otbor, upakovka, transportirovanie i khranenie obraztsov [Soils. Sampling, packing, transportation, and storage of samples]. М.: Standartinform, 2015 (in Rus.).
2. GOST 12071-2000. Grunty. Otbor, upakovka, transportirovanie i khranenie obraztsov [Soils. Sampling, packing, transportation, and storage of samples]. М.: IPK «Izdatel'stvo standartov», 2001 (in Rus.).
3. GOST 12071-84. Grunty. Otbor, upakovka, transportirovanie i khranenie obraztsov [Soils. Sampling, packing, transportation, and storage of samples]. М.: Izdatel'stvo standartov, 1985 (in Rus.).
4. GOST 12071-72. Grunty. Otbor, upakovka, transportirovanie i khranenie obraztsov [Soils. Sampling, packing, transportation, and storage of samples]. М.: Izdatel'stvo standartov, 1972 (in Rus.).
5. GOST 12071-66. Grunty. Otbor, upakovka, transportirovanie i khranenie obraztsov [Soils. Sampling, packing, transportation, and storage of samples]. М.: Izdatel'stvo standartov, 1966 (in Rus.).
6. Rekomendatsii po otboru, upakovke, transportirovaniyu i khraneniyu obraztsov gruntov pri inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh dlya stroitel'stva [Recommendations on sampling, packing, transportation, and storage of soil samples during engineering geological investigations for construction]. М.: PNIIS Gosstroya SSSR, Izd-vo literatury po stroitel'stvu, 1970 (in Rus.).
7. ASTM D4220-14. Standard practices for preserving and transporting soil samples.
8. ISO 22475-1. Geotechnical investigation and testing – sampling methods and groundwater measurements. Part 1. Technical principles for the sampling of soil, rock and groundwater.
9. ASTM D1587-15. Standard practice for thin-walled tube sampling of fine-grained soils for geotechnical purposes.
10. ASTM D3550-17. Standard practice for thick wall, ring-lined, split barrel, drive sampling of soils.
11. ASTM D5079-25. Standard practices for preserving and transporting rock core samples.
12. ASTM D6151-15. Standard practice for using hollow-stem augers for geotechnical exploration and soil sampling.
13. ASTM D6169-21. Standard guide for selection of subsurface soil and rock sampling devices for environmental and geotechnical investigations.
14. ASTM D6519-08. Standard practice for sampling of soil using the hydraulically operated stationary piston sampler.

15. ASTM D7015-18. Standard practices for obtaining intact block (cubical and cylindrical) samples of soils.
16. GOST R ISO 22475-1-2017. Geotekhnicheskie issledovaniya i ispytaniya. Metody otbora prob i izmereniya podzemnykh vod. Chast' 1. Tekhnicheskie printsipy dlya vypolneniya [Geotechnical investigation and testing. Sampling methods and groundwater measurements. Part 1: Technical principles for execution]. M.: Standartinform, 2017 (in Rus.).
17. ISO 22475-1:2021. Geotechnical investigation and testing.
18. GOST R 1.5-2012. Standartizatsiya v Rossiiskoi Federatsii. Standarty natsional'nye. Pravila postroeniya, izlozheniya, oformleniya i oboznacheniya [Standardization in the Russian Federation. National standards. Rules for structure, drafting, presentation and designation]. M.: Standartinform, 2013 (in Rus.).
19. GOST 1.5-2001. Mezhhgosudarstvennaya sistema standartizatsii. Standarty mezhhgosudarstvennye, pravila i rekomendatsii po mezhhgosudarstvennoi standartizatsii. Obshchie trebovaniya k postroeniyu, izlozheniyu, oformleniyu, sodержaniyu i oboznacheniyu [Interstate system for standardization. Interstate standards, rules and recommendations on interstate standardization. General requirements for structure, drafting, presentation, content and designation]. M.: IPK «Izdatel'stvo standartov», 2002 (in Rus.).

Независимый электронный журнал ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
выходит в формате *PDF.
4 выпуска в 2025 году.



WWW.GEOINFO.RU

Организаторы:

Независимый электронный журнал
Геоинфо

К ДЕСЯТИЛЕТИЮ ЖУРНАЛА «ГЕОИНФО»
ОТМЕТИМ В ХОРОШЕЙ
КОМПАНИИ!

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА В ОБЛАСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ
ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, ГЕОТЕХНИКИ,
МОНИТОРИНГА И ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ТЕРРИТОРИИ

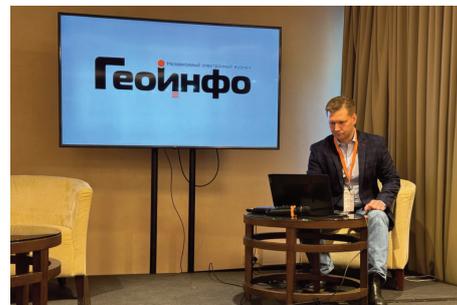
Геоинфо EXPO
2026

1000+ посетителей

30+ экспонентов

40+ мероприятий деловой программы

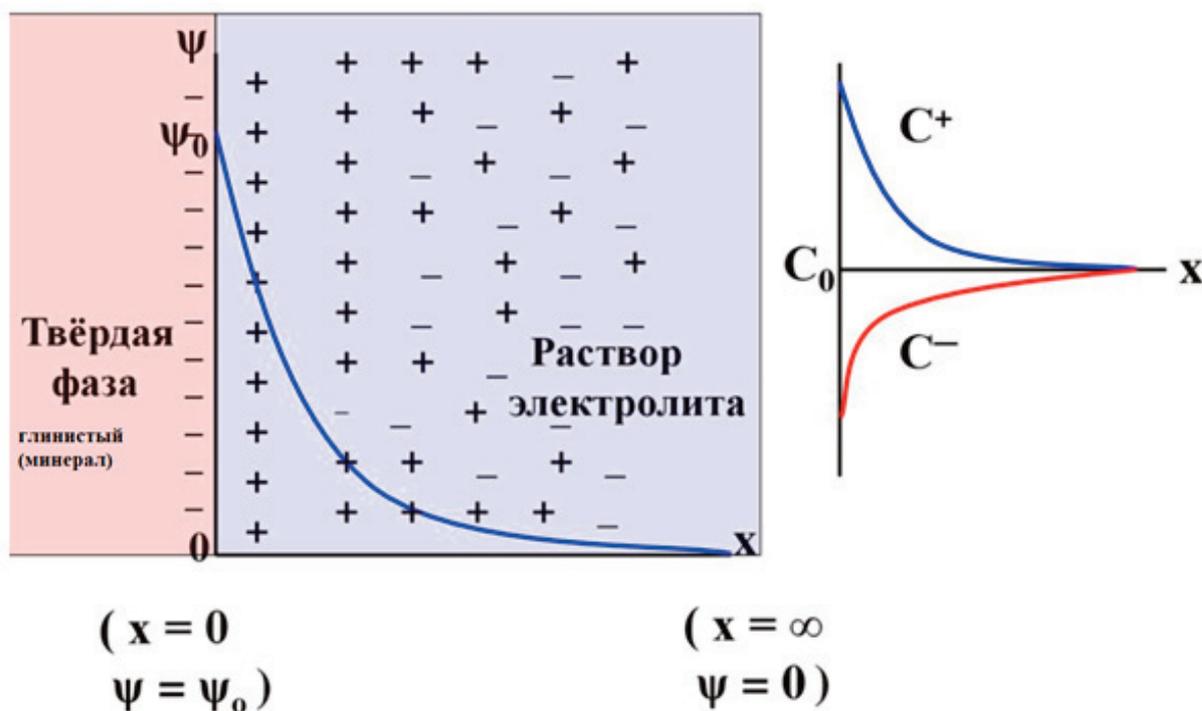
150+ докладов



Посещение выставки и всех мероприятий
деловой программы бесплатное

15-16 апреля 2026 года

Москва, Звезды Арбата 5*, Новый Арбат, 32



МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Поступила в редакцию: 22.12.2025

Принята к публикации 22.01.2026

Опубликована 30.01.2026

КОРОЛЁВ В.А.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., профессор, г. Москва, Россия
va-korolev@bk.ru

ЕВТИХОВ М.В.

Магистрант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
emv649@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Параметры двойного электрического слоя (ДЭС) глинистых частиц (толщина слоя, знак и величина заряда, поверхностная плотность и др.) обуславливают основные физико-химические свойства грунтов, такие как набухаемость, усадка и диффузионно-осмотические явления. Кроме того, они играют ключевую роль в формировании структурных связей и прочности коагуляционных контактов, что в конечном итоге предопределяет деформационные и прочностные характеристики грунтов. Поэтому разработка простых и надежных методов оценки параметров ДЭС глинистых грунтов имеет большое практическое значение, в том числе при инженерно-геологических исследованиях и изысканиях. В этой связи в статье анализируются возможности современных методов оценки параметров ДЭС в глинистых грунтах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

глинистые грунты; двойной электрический слой; электрофорез; электроосмос; поверхностная проводимость; суспензионный эффект.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Королев В.А., Евтихов М.В. Методы оценки параметров двойного электрического слоя глинистых грунтов // Геоинфо. 2025. Т. 7. № 4. С. 16–20.
DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-16-20.

METHODS FOR EVALUATING THE PARAMETERS OF THE ELECTRIC DOUBLE LAYER IN CLAYEY SOILS

Received: 22.12.2025

Accepted for publication 22.01.2026

Published 30.01.2026

KOROLEV V.A.

DSc (Geology and Mineralogy), professor at the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
va-korolev@bk.ru

EVTIKHOV M.V.

Master's student at the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
emv649@yandex.ru

ABSTRACT

The parameters of the electric double layer (EDL) of clay particles (layer thickness, sign and magnitude of charge, surface charge density, etc.) determine the main physicochemical properties of soils, such as swelling, shrinkage, and diffusion-osmotic phenomena. In addition, they play a key role in the formation of structural bonds and the strength of coagulation contacts, which ultimately determine the deformation and strength characteristics of soils. Therefore, the development of simple and reliable methods for evaluating the parameters of the EDL in clayey soils is of great practical importance, including for engineering-geological studies and site investigations (surveys). In this regard, the paper analyzes the capabilities of modern methods for evaluating EDL parameters in clayey soils.

KEYWORDS:

clayey soils; electric double layer (EDL); electrophoresis; electroosmosis; surface conductivity; suspension effect.

FOR CITATION:

Korolev V.A., Evtikhov M.V. *Metody otsenki parametrov dvojnogo elektricheskogo sloya glinistykh gruntov [Methods for evaluating the parameters of the electric double layer in clayey soils]* // *GeoInfo*. 2025. T. 7. № 4. S. 16–20. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-16-20 (in Rus.).

Введение ►

Классическими методами оценки параметров двойного электрического слоя в глинистых грунтах считаются методы электрофореза, электроосмоса и поверхностной проводимости. Но для их использования требуется проведение достаточно сложных испытаний с применением специализированного оборудования, в связи с чем весьма актуальной представляется разработка более простых методов, не требующих специализированного оборудования, основанных, например, на суспензионном эффекте [1].

Объектом исследования выступают глинистые грунты различного состава, а также различные коллоидные системы, такие как золи, эмульсии, суспензии.

Предметом исследования является оценка параметров ДЭС глинистых частиц, найденных по результатам определения суспензионного эффекта в этих грунтах.

Цель работы – обзор методов определения параметров ДЭС глинистых ча-

стиц и обоснование метода, основанного на суспензионном эффекте.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выполнить анализ основных методов электроповерхностных исследований.
2. Обосновать возможность оценки величины заряда глинистых частиц на основе суспензионного эффекта.
3. Обосновать возможность оценки толщины ДЭС (дебаевского радиуса экранирования) глинистых частиц на основе параметров, получаемых при измерении суспензионного эффекта.
4. Обосновать возможность оценки потенциала частиц на основе сведений о суспензионном эффекте.

Метод оценки параметров двойного электрического слоя на основе поверхностной проводимости ►

При протекании электрического тока через глинистый грунт общая проводимость χ последнего складывается из объемной проводимости порового раствора χ_v и поверхностной проводимо-

сти χ_s за счет двойных электрических слоев глинистых частиц [2].

На основе величины χ_s , измеренной по проводимости грунта, можно рассчитать удельную поверхностную электрическую проводимость K_s по формуле:

$$K_s = \frac{\chi_s n_0}{S_0}, \quad (1)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения грунта; n_0 – пористость грунта.

Величина K_s определяется проводимостью двойных электрических слоев глинистых частиц [3], что позволяет на ее основе определить их параметры, но методика расчета этих параметров достаточно сложна и не будет подробно описываться в рамках данной работы.

Метод оценки параметров двойного электрического слоя на основе электрофореза ►

При приложении к суспензии глинистого грунта разности потенциалов наблюдается движение заряженных глинистых частиц к противоположно заряженному электроду относительно счи-

тающейся неподвижной жидкой фазы, причем скорость такого движения определяется геометрией и электрическим зарядом глинистых частиц, а также параметрами раствора, благодаря чему представляется возможным оценить параметры двойных электрических слоев.

Основным законом, связывающим скорость движения глинистых частиц в электрическом поле с параметрами их двойных электрических слоев, считается теория Гельмгольца – Смолуховского, предполагающая линейную зависимость скорости от электрокинетического потенциала (ζ -потенциала) [3, 4]:

$$v_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta E}{4\pi\eta} = K_{\text{эф}}E, \quad (2)$$

где $v_{\text{эф}}$ – скорость движения глинистых частиц; ε_0 – электрическая постоянная, ε – относительная диэлектрическая проницаемость раствора; η – вязкость раствора; E – напряженность электрического поля.

Позже формула (2) была уточнена Духиным и Дерягиным [4] за счет учета релаксационного эффекта и сил электрофоретического торможения, вызванных электроосмотическим потоком раствора. Полученное ими уравнение обычно записывают в следующем виде:

$$v_{\text{эф}} = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0\zeta E}{3\pi\eta} f\left(\frac{d}{\delta}\right), \quad (3)$$

где d – диаметр частицы; δ – толщина дебаевской ионной атмосферы; $f(d/\delta)$ – функция, описывающая релаксационный эффект.

Таким образом, для определения электрокинетического потенциала на основе электрофореза требуется заполнить часть капилляра суспензией, остальную часть – раствором, аналогичным по составу поровому, а затем приложить разность потенциалов. В таком случае по перемещению границы «раствор – суспензия» представляется возможным определить скорость перемещения глинистых частиц, что позволяет рассчитать электрокинетический потенциал на основе уравнения уравнения (2) или уравнения (3) [5].

Метод оценки параметров двойного электрического слоя на основе электроосмоса ►

Согласно современным представлениям диффузные части двойных электрических слоев имеют противоположный по отношению к глинистым части-

цам электрический заряд, благодаря чему при приложении к грунту разности потенциалов наблюдается возникновение потока жидкой фазы относительно неподвижного твердого компонента [3, 4].

Как было показано многими исследователями, в первом приближении электроосмотический поток также описывается теорией Гельмгольца – Смолуховского:

$$v_{\text{зо}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta E}{4\pi\eta} = K_{\text{зо}}E, \quad (4)$$

где $v_{\text{зо}}$ – скорость движения жидкой фазы; ε_0 – электрическая постоянная; ε – относительная диэлектрическая проницаемость раствора; η – вязкость раствора; E – напряженность электрического поля.

Истинную скорость движения порового раствора определить достаточно сложно в связи с неоднородностью геометрии порового пространства, обусловленной полиминеральностью глинистых грунтов, различиями в геометрии глинистых частиц и образуемых ими микроструктур, которые значительно изменяются в зависимости от состава и степени литификации таких грунтов. В связи с этим на практике вместо истинной скорости движения порового раствора гораздо чаще пользуются его расходом $Q_{\text{зо}}$, в связи с чем уравнение (4) принято записывать в следующем виде [5]:

$$Q_{\text{зо}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta FE}{4\pi\eta}, \quad (5)$$

где F – суммарная площадь пор.

Согласно теории Гельмгольца – Смолуховского ζ -потенциал не зависит от ширины зазора между частицами глины или радиуса пор, а следовательно, не должен зависеть от влажности водонасыщенных глин при их уплотнении. Однако на практике многие данные свидетельствуют об обратном, что привело исследователей к выводу о необходимости введения поправок в уравнение (5). Это связано в первую очередь с тем, что толщина ДЭС становится сопоставимой с размером пор и требуется учет перекрытия ДЭС различных глинистых частиц, для чего вводится поправочный коэффициент γ , имеющий разные значения [3]:

$$\zeta = \gamma\zeta', \quad (6)$$

где ζ – истинное значение электрокине-

тического потенциала, ζ' – значение электрокинетического потенциала, определенное по теории Гельмгольца – Смолуховского.

На основе теории термодинамики необратимых процессов Н.В. Чураевым и Б.В. Дерягиным (1966) было выведено уравнение, учитывающее взаимодействие диффузных слоев ДЭС с помощью введения поправочного множителя в классическое уравнение Гельмгольца – Смолуховского. Аналогичная формула с поправкой для коэффициента электроосмоса было получено Н.Ф. Бондаренко (1973), которое применимо к капиллярно-пористым системам, в том числе к глинистым грунтам. Согласно этому уравнению поправочный коэффициент γ можно определить следующим образом [3]:

$$\gamma = \frac{1}{1 - \frac{\delta}{H} \tanh \frac{H}{\delta}}, \quad (7)$$

где δ – толщина дебаевской ионной атмосферы; H – зазор (расстояние) между сближающимися частицами.

Использование формулы (7) и ей подобных для оценки электрокинетического потенциала глинистых частиц осложняется отсутствием практических методов определения величин H и δ , которые к тому же имеют разные значения в разных точках в связи с полидисперсностью глин и наличием контактов между частицами.

Метод оценки параметров двойного электрического слоя на основе суспензионного эффекта ►

Концентрации ионов в пределах двойного электрического слоя и за его пределами значительно различаются, благодаря чему измеренные концентрации различных ионов в суспензии и в равновесном поровом растворе тоже будут различаться. Наиболее исследованным проявлением данного эффекта является суспензионный эффект, проявляющийся в различии измеряемых концентраций ионов водорода, что выражается в несовпадении величин рН в суспензии и равновесном поровом растворе. Величину суспензионного эффекта принято определять следующим образом [1, 3, 5–7]:

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{сусп}} - \text{pH}_{\text{раств}}, \quad (8)$$

где $\text{pH}_{\text{сусп}}$ – значение рН в суспензии; $\text{pH}_{\text{раств}}$ – величина рН в равновесном растворе.

На величину суспензионного эффекта влияют те же факторы, что и на строение ДЭС. Среди них стоит отметить следующие факторы [3, 5]:

- *концентрация суспензии или влажность грунта*, с ростом которых суспензионный эффект (ΔpH) сначала увеличивается, а затем снижается, что может быть связано со степенью пептизации глинистых частиц [6] (однако в литературе содержатся противоречивые сведения);
- *концентрация порового раствора (электролита)*: увеличение которой приводит к снижению величины суспензионного эффекта [3];
- *минеральный состав и дисперсность*, так как различные глинистые минералы обладают разными удельной поверхностью, формой кристаллов и количеством изоморфных замещений, что определяет общий заряд частиц [3, 8] (однако в литературе содержатся противоречивые сведения);
- *величина pH порового раствора*, которая определяет перезарядку глинистых частиц и концентрацию электролита (за счет увеличения или уменьшения концентраций кислот и оснований) [8] (но зависимость суспензионного эффекта ΔpH от pH для глинистых грунтов остается слабо изученной) [3];
- *время отстаивания суспензии* – этот фактор практически не изучен для глинистых грунтов [9].

Еще раз подчеркнем, что на величину суспензионного эффекта влияют те же факторы, что и на параметры двойных электрических слоев глинистых частиц, что позволяет оценивать эти параметры на основе суспензионного эффекта [1].

В частности, отрицательный заряд глинистых частиц способствует концентрированию вблизи их поверхности ионов водорода, что проявляется в отрицательных величинах суспензионного эффекта, а положительный заряд частиц, наоборот способствует концентрированию гидроксильных групп, что выражается в положительных величинах суспензионного эффекта. В точке нулевого заряда суспензионный эффект не регистрируется. Таким образом, *знак суспензионного эффекта соответствует знаку заряда глинистых частиц*.

Зависимость величины суспензионного эффекта ΔpH от величины общего заряда частиц q является гораздо более сложной, но ее можно представить в виде некоторой функции $\Delta pH = \Delta pH(q)$ [1].

Если предположить, что радиус сходимости разложения функции $\Delta pH(q)$

в ряд Маклорена превосходит предполагаемые величины q (необходимым условием является конечность производной ΔpH по q при $q=0$), то функцию $\Delta pH(q)$ можно заменить соответствующим рядом $\sum_{n=0}^{\infty} (K_n q^n)$. Из общих сведений о суспензионном эффекте известно, что при среднем заряде глинистых частиц, равном или близком к нулю, суспензионный эффект не проявляется, а значит можно считать, что коэффициент K_0 равен нулю. Практически для всех глинистых грунтов средние заряды их частиц значительно меньше 1 Кл/г, а значит при общей массе глинистого грунта в суспензии не более 1 г членами q^n при $n \geq 2$ также можно пренебречь ввиду их относительной малости [1].

Таким образом, в первом приближении можно предположить, что *величина суспензионного эффекта прямо пропорциональна общему заряду глинистых частиц* и коэффициентом пропорциональности служит некоторая константа $K_{\Delta pH}$ (так называемая постоянная суспензионного эффекта). Эта постоянная зависит от температуры суспензии, ее объема, концентрации и pH электролита, но при соблюдении равенства этих параметров для суспензий различных глинистых грунтов ее также можно считать одинаковой. Важным следствием изложенного является то, что в суспензиях с одинаковыми концентрациями и электролитами величины суспензионного эффекта оказываются пропорциональными общему заряду частиц, а значит оказывается возможным сравнение средних зарядов глинистых грунтов на основе следующего равенства [1]:

$$\left(\frac{\Delta pH}{mq}\right)_{sol,C,T} = K_{\Delta pH} \equiv const, \quad (9)$$

где ΔpH – величина суспензионного эффекта, m – масса навески грунта, \bar{q} – средний заряд глинистых частиц; нижний индекс sol,C,T обозначает постоянство электролита, концентрации суспензии и температуры.

Толщина двойного электрического слоя δ согласно основным теориям (Гуи – Чепмена, Дебая – Гюккеля, Штерна и др.) приблизительно одинакова, не зависит от свойств частиц и определяется исключительно концентрацией раствора электролита. Согласно теории Гуи – Чепмена [10, 11] толщина ДЭС определяется следующим образом [1]:

$$\delta = \frac{1}{F} \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 RT}{2\pi \sum_i Z_i^2 C_{\infty,i}}}, \quad (10)$$

где F – постоянная Фарадея; $\epsilon \epsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость среды;

R – универсальная газовая постоянная; T – температура, Z_i – заряд иона i ; $C_{\infty,i}$ – концентрация иона i в условиях отсутствия электростатического потенциала.

С учетом того, что для определения суспензионного эффекта требуется измерить pH равновесного раствора ($pH_{раст}$), *толщину двойного электрического слоя представляется возможным оценить сверху (оценить ее максимально возможную при данных условиях величину) следующим образом*:

$$\delta \lesssim \frac{1}{2F} \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 RT}{\pi}} \times 10^{\frac{4-pH_{раст}-7}{2}} \approx \approx 389 \times 10^{\frac{|pH_{раст}-7|}{2}} \text{ м} \quad (11)$$

По сведениям о заряде глинистых частиц и толщине ДЭС можно оценить электростатический потенциал их поверхности φ_0 . Этого не позволяет ни один из перечисленных ранее методов. Метод же суспензионного эффекта не требует движения частиц и их ДЭС относительно друг друга – следовательно, не нуждается в возникновении поверхности скольжения. На основе теории Гуи – Чепмена *электростатический потенциал φ_0 можно оценить сверху следующим образом* [1]:

$$\varphi_0 = \frac{\bar{q}\delta}{\epsilon \epsilon_0} \lesssim \frac{\Delta pH}{mK_{\Delta pH}} \frac{1}{2F} \sqrt{\frac{RT}{\epsilon \epsilon_0 \pi}} \times 10^{\frac{4-pH-7}{2}} \approx \approx \frac{\Delta pH}{mK_{\Delta pH}} \times 542 \times 10^{\frac{|pH-7|}{2}} \quad (12)$$

Таким образом, на основе сведений о суспензионном эффекте представляется возможным оценить основные параметры ДЭС глинистых частиц. Также стоит отметить, что эксперимент по определению суспензионного эффекта может быть произведен в автоматическом режиме [1] с использованием технологии интернет-вещей [12], что делает дальнейшее развитие данного направления достаточно перспективным.

Заключение

На основе суспензионного эффекта представляется возможным оценить основные параметры ДЭС наравне с классическими методами, такими как метод поверхностной проводимости, электрофорез и электроосмос, но в то же время для него не требуется применения специализированного оборудования или проведения сложных испытаний.

Классические методы предполагают движение диффузных частей двойных электрических слоев относительно глинистых частиц – следовательно, позволяют оценить не истинный потенциал

поверхности, а только электрокинетический потенциал (ζ -потенциал), то есть потенциал на поверхности скольжения, положение которой до сих пор считается неясным. Метод же суспензионного эффекта не требует движения частиц и их ДЭС относительно друг друга, благодаря чему в отличие от классических методов позволяет оценить истинный потенциал поверхности, но не позволяет оценить потенциал на поверхности скольжения. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ►

1. Королёв В.А., Евтихов М.В. Методика определения суспензионного эффекта в глинистых грунтах // Грунтоведение. 2025. Т. 24. № 1. С. 43–49.
2. Злочевская Р.И., Королёв В.А. Электроповерхностные явления в глинистых породах. М.: Изд-во Московского университета, 1988. 177 с.
3. Королёв В.А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение: монография (2-е изд., перераб. и доп.). М.: КДУ, Добросвет, 2023. 498 с. ISBN 978-5-7913-1302-7. DOI 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1302-7-2023-498. Текст: электронный. URL: bookonlime.ru.
4. Духин С.С., Дерягин Б.В. Электрофорез. М.: Наука, 1976. 332 с.
5. Королёв В.А. Лабораторные работы по электроповерхностным явлениям в грунтах. М.: ООО «Самполиграфист», 2022. 136 с.
6. Тронина С.Г., Королёв В.А. Оценка параметров двойного электрического слоя глин на основе суспензионного эффекта // Материалы XI Международной научно-практической конференции студентов и магистрантов «Молодость. Интеллект. Инициатива» в 2-х т. Витебск, 2023. Т. 1. С. 164–166.
7. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. Ленинград: Химия, 1984.
8. Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. Грунтоведение / под ред. В.Т. Трофимова (6-е изд., переработ. и доп.). М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с. ISBN 5-211-04848-2.
9. Евтихов М.В., Королев В.А. Суспензионные эффекты pH и Eh в каолиновой и иллитовой глинах // Материалы XXXII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2025». М.: Изд-во МГУ, 2025.
10. Chapman D.L. A contribution to the theory of electrocapillarity // Philosophical Magazine. 1913. Vol. 25. P. 475–481.
11. Gouy G. Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte // Journal de Physique Theorique et Appliquée. 1910. Vol. 9. P. 457–468.
12. Евтихов, В.Г. Введение в интернет вещей: учебник / В.Г. Евтихов, Н.В. Евтихова, М.В. Евтихов. – Москва: Московский Политех, 2025. – 1 CD-R. – Загл. с титул. экрана. – Текст: электронный. ISBN 978-5-2760-2925-2.

REFERENCES ►

1. Korolev V.A., Evtikhov M.V. Metodika opredeleniya suspenszionnogo effekta v glinistykh gruntakh [Method for determining the suspension effect in clayey soils] // Gruntovedenie. 2025. T. 24. № 1. S. 43–49 (in Rus.).
2. Zlochevskaya R.I., Korolev V.A. Elektropoverkhnostnye yavleniya v glinistykh porodakh [Electrosurface phenomena in clayey soils]. M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1988. 177 s. (in Rus.).
3. Korolev V.A. Teoriya elektropoverkhnostnykh yavleniy v gruntakh i ikh primenenie: monografiya [Theory of electrosurface phenomena in soils and their application] (2-e izd., pererab. i dop.). M.: KDU, Dobrosvet, 2023. 498 s. ISBN 978-5-7913-1302-7. DOI 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1302-7-2023-498. Tekst: elektronnyi. URL: bookonlime.ru (in Rus.).
4. Dukhin S.S., Deryagin B.V. Elektroforez [Electrophoresis]. M.: Nauka, 1976. 332 s. (in Rus.).
5. Korolev V.A. Laboratornye raboty po elektropoverkhnostnym yavleniyam v gruntakh [Laboratory works on electrosurface phenomena in soils]. M.: ООО «Самполиграфист», 2022. 136 s. (in Rus.).
6. Tronina S.G., Korolev V.A. Otsenka parametrov dvoynogo elektricheskogo sloya glin na osnove suspenszionnogo effekta [Evaluation of electric double layer parameters in clays based on the suspension effect] // Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i magistrantov "Molodost'. Intellekt. Initsiativa". Vitebsk, 2023. T. 1. S. 164–166 (in Rus.).
7. Fridrikhsberg D.A. Kurs kolloidnoy khimii [Course of colloid chemistry]. Leningrad: Khimiya, 1984 (in Rus.).
8. Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesenskiy E.A., Golodkovskaya G.A., Vasil'chuk Yu.K., Ziangiroy R.S. Gruntovedenie [Soil and rock science] / pod red. V.T. Trofimova (6-e izd., pererab. i dop.). M.: Izd-vo MGU, 2005. 1024 s. ISBN 5-211-04848-2 (in Rus.).
9. Evtikhov M.V., Korolev V.A. Suspenszionnye efekty pH i Eh v kaolinovoy i illitovoy glinakh [Suspension effects of pH and Eh in kaolinite and illite clays] // Materialy XXXII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh "Lomonosov-2025". M.: Izd-vo MGU, 2025 (in Rus.).
10. Chapman D.L. A contribution to the theory of electrocapillarity // Philosophical Magazine. 1913. Vol. 25. P. 475–481.
11. Gouy G. Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte [On the structure of electric charge at the surface of an electrolyte] // Journal de Physique Theorique et Appliquée. 1910. Vol. 9. P. 457–468 (in French).
12. Evtikhov, V.G. Vvedenie v internet veshchey: uchebnik / V.G. Evtikhov, N.V. Evtikhova, M.V. Evtikhov. – Moskva: Moskovskiy Politekh, 2025. – 1 CD-R. – Zagl. s titul. ekrana. – Tekst: elektronnyi. ISBN 978-5-2760-2925-2

Организаторы:

Независимый электронный журнал
Геоинфо

К ДЕСЯТИЛЕТИЮ ЖУРНАЛА «ГЕОИНФО»
ОТМЕТИМ В ХОРОШЕЙ
КОМПАНИИ!

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА В ОБЛАСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ
ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, ГЕОТЕХНИКИ,
МОНИТОРИНГА И ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ТЕРРИТОРИИ

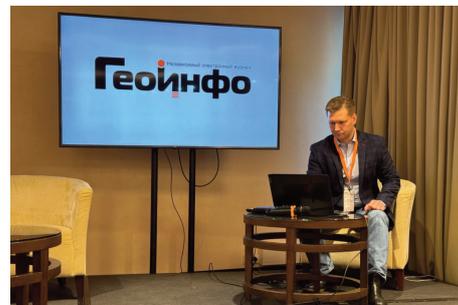
Геоинфо EXPO
2026

1000+ посетителей

30+ экспонентов

40+ мероприятий деловой программы

150+ докладов



Посещение выставки и всех мероприятий
деловой программы бесплатное

15-16 апреля 2026 года

Москва, Звезды Арбата 5*, Новый Арбат, 32



ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ

Поступила в редакцию: 8.12.2025

Принята к публикации 23.12.2025

Опубликована 30.01.2026

ФРОЛОВА Ю.В.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., доцент, г. Москва, Россия
ju_frolova@mail.ru

БОЛЬШАКОВ И.Е.

Старший научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к. г.-м. н., г. Москва, Россия
bolshakov.ilya.210@yandex.ru.

ЗЕРКАЛЬ О.В.

Старший научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., г. Москва, Россия
igzov@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены основные методы определения параметров прочности на сдвиг скальных грунтов – удельного сцепления и угла внутреннего трения, которые необходимы при решении многих инженерно-геологических задач, например при расчетах устойчивости склонов различной природы, откосов и бортов карьеров, при проектировании гидротехнических сооружений и пр. В зависимости от решаемой задачи определение сдвиговых характеристик может быть проведено на образцах ненарушенной породы, по поверхностям ослабления или для скального массива.

Описаны три разных метода определения прочности на сдвиг и получения предельной огибающей для стандартных образцов скальных грунтов. На примере известняков Московского региона проведено сопоставление результатов использования разных методов. Рассмотрены основные методы определения сдвиговых характеристик по трещине и приведены результаты выполненных экспериментов на срез по трещине для метавулканитов одного из месторождений Дальневосточного региона. Показаны тенденции изменений сцепления и угла внутреннего трения в зависимости от величины нормального напряжения и, соответственно, от глубины отбора образца. Сравнение сдвиговых характеристик метавулканитов, полученных при испытаниях стандартных образцов и трещин, выявило различия в величинах сцепления на 2–3 порядка. Рассмотрены основные методы определения прочности на сдвиг для массивов скальных грунтов. Приведен пример получения предельной огибающей и расчета сцепления и угла внутреннего трения по модели Хоека – Брауна для массива метавулканитов. Показана зависимость сдвиговых характеристик скального массива от величины действующих напряжений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

скальный грунт; прочность на сдвиг; удельное сцепление; угол внутреннего трения; предельная огибающая; трещина; методы определения прочности на сдвиг

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Фролова Ю.В., Большаков И.Е., Зеркаль О.В. Особенности определения параметров сопротивления сдвигу скальных грунтов. Экспериментальные и расчетные методы // Геоинфо. 2025. Т. 7. № 4. С. 22–31. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-22-31.

SPECIFICS OF DETERMINING SHEAR STRENGTH PARAMETERS OF ROCKS. EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL METHODS

Received: 8.12.2025

Accepted for publication 23.12.2025

Published 30.01.2026

FROLOVA Ju.V.

Professor at the Department of Engineering and Environmental Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc, Associate Professor, Moscow, Russia
ju_frolova@mail.ru

BOL'SHAKOV I.E.

Senior Researcher at the Department of Engineering and Environmental Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD, Moscow, Russia
bolshakov.ilya.210@yandex.ru

ZERKAL' O.V.

Senior Researcher at the Department of Engineering and Environmental Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc
igzov@mail.ru

ABSTRACT

The article discusses the key methods to determine the shear strength parameters of rocks such as cohesion and internal friction angle. These parameters are required for solving many engineering-geological problems such as stability analysis for various types of slopes, cut slopes, embankment slopes, quarry walls, as well as for the design of hydraulic engineering structures, etc. Depending on the problem being solved, the determination of shear characteristics can be performed for intact rock specimens, along discontinuity surfaces (joints), or for a rock mass as a whole.

We describe three different methods for determining shear strength and obtaining failure envelopes for standard rock specimens. Using limestones from the Moscow region as an example, the results obtained by these different methods are compared. The study considers the key methods for determining shear characteristics along rock joints and presents joint shear test results for metavolcanic rocks from the Far East region. The article demonstrates how cohesion and internal friction angle change with normal stress and, consequently, with depth. A comparison of the shear strength characteristics of metavolcanic rocks obtained by testing of intact specimens and rock joints revealed differences in cohesion by 2–3 orders of magnitude. The paper also discusses the key methods for determining shear strength of rock masses. We present an example of obtaining a failure envelope and calculating cohesion and internal friction angle using the Hoek-Brown model for a metavolcanic rock mass. The dependence of rock mass shear characteristics on the magnitude of the applied stresses is shown.

KEYWORDS:

rock; shear strength; cohesion; internal friction angle; failure envelope; joint; shear strength determination methods.

FOR CITATION:

Frolova Ju.V., Bol'shakov I.E., Zerkal' O.V. Osobennosti opredeleniya parametrov soprotivleniya sdvigu skal'nykh gruntov. Eksperimental'nye i raschetnye metody [Specifics of determining shear strength parameters of rocks. Experimental and analytical methods] // *GeoInfo*. 2025. T. 7. № 4. S. 22–31. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-22-31 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

При решении многих инженерно-геологических задач, в частности для расчетов устойчивости склонов, откосов, бортов карьеров, необходимы параметры прочности на сдвиг – удельное сцепление (C) и угол внутреннего трения (φ) [1]. Традиционно они определяются по закону Кулона, который предполагает линейную зависимость между касательными и нормальными напряжениями:

$$\tau = \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (1)$$

где τ – касательное напряжение; σ_n – нормальное напряжение.

Однако линейная форма зависимости является лишь частным случаем, тогда как в общем случае данная зависимость имеет нелинейный характер. Соответственно, сдвиговые характеристики не являются константами, а зависят от величин напряжений, при которых они определяются: чем выше напряжения, тем больше сцепление и меньше угол внутреннего трения. Тенденции изменений параметров прочности на сдвиг в зависимости от нормальных напряжений наглядно показана на рисунке 1, заимствованном из работы Э. Хоека (Э. Хука) и Э.Т. Брауна [2].

Сложность определения сдвиговых характеристик скальных грунтов заключается не только в нелинейном характере предельной огибающей, но также и в том, что ее форма и степень нелинейности различны у разных типов грунтов. Другая проблема заключается в том, что массивы скальных грунтов находятся в напряженном состоянии вследствие воздействия гравитационных сил, которые на больших глубинах могут достигать значительных величин (например, при строительстве подземных сооружений – горных выработок, тоннелей, хранилищ и пр.), а также тектонических сил, характерных для гор-

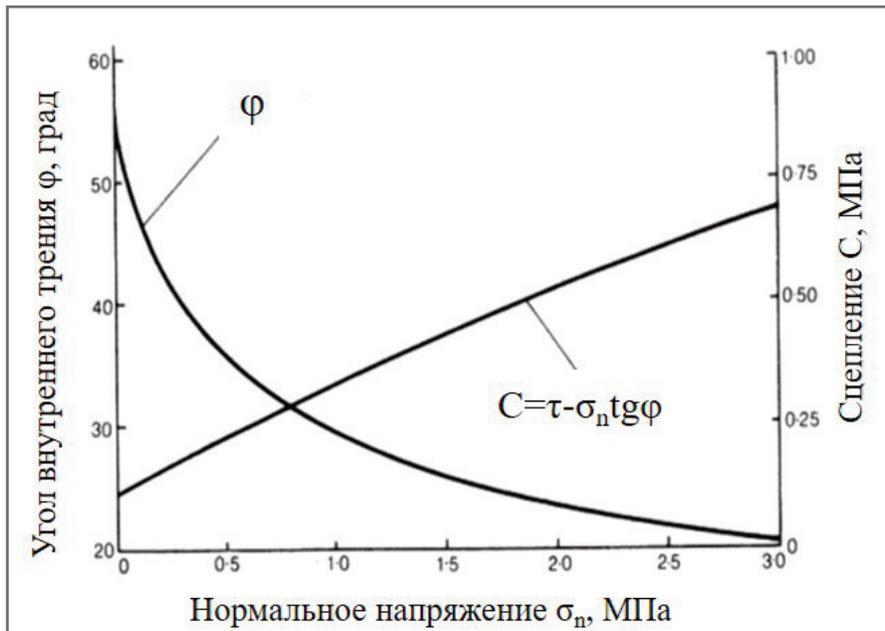


Рис. 1. Тенденции изменений сцепления C и угла внутреннего трения φ в зависимости от величины нормального напряжения [2]

но-складчатых областей. Соответственно, это необходимо учитывать при определении прочности на сдвиг.

В зависимости от решаемой задачи определить параметры прочности на сдвиг можно на образцах ненарушенной породы, по трещине или для скального массива.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ НА СДВИГ НА ОБРАЗЦАХ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ▶

Есть три основных способа определения сдвиговых характеристик образцов скальных грунтов [3, 4]:

1. Построение паспорта прочности по данным прочности на одноосное сжатие и растяжение.
2. Срез со сжатием.
3. Объемное сжатие.

Построение предельной огибающей по результатам определения прочности на одноосное сжатие (R_c) и растяжение (R_p) является наиболее простым и часто используемым методом. Он заключается в том, что в координатах «касательные напряжения (τ) – нормальные напряжения (σ_n)» строятся предельные круги Мора, соответствующие прочности на одноосное сжатие [5] и растяжение [6], и проводится их оги-

бающая – либо линейная в виде касательной к кругам, либо нелинейная, с использованием эмпирического уравнения, указанного в ГОСТ 21153.8-88 [3] (рис. 2). Преимуществом данного метода является то, что он не требует специального оборудования кроме пресса. Однако его можно применять для определения сдвиговых характеристик лишь при небольших давлениях, тогда как в области высоких напряжений можно ожидать большой погрешности и расхождения результатов с реальными величинами.

Срез со сжатием, являющийся еще одним способом получения предельной огибающей и определения сдвиговых характеристик, предполагает наличие специального устройства [7] (рис. 3). Авторы проводили испытания при помощи устройства, разработанного и сконструированного И.Е. Большаковым согласно ГОСТ 21153.5-88 [7]. Метод заключается в разрушении образца по заданной плоскости среза при приложении к нему вертикальной сжимающей нагрузки. В комплект испытательного устройства входит от трех до пяти пар разъемных матриц (пару составляют верхняя и нижняя матрицы) с вкладышами-обоймами для фиксирования образца. Зазор между верхней и нижней матрицами расположен под разными углами по отношению к вертикали (обычно 25, 35, 45, 55, 65 градусов). Нижняя матрица помещается на специальную подвижную платформу с шарнирным устройством. Собранный испытательный устройство с помещенным в него образцом скального грунта устанавливается в испытательную маши-



Рис. 2. Паспорт прочности скального грунта, построенный по результатам определения прочности на одноосное сжатие (R_c) и растяжение (R_p)

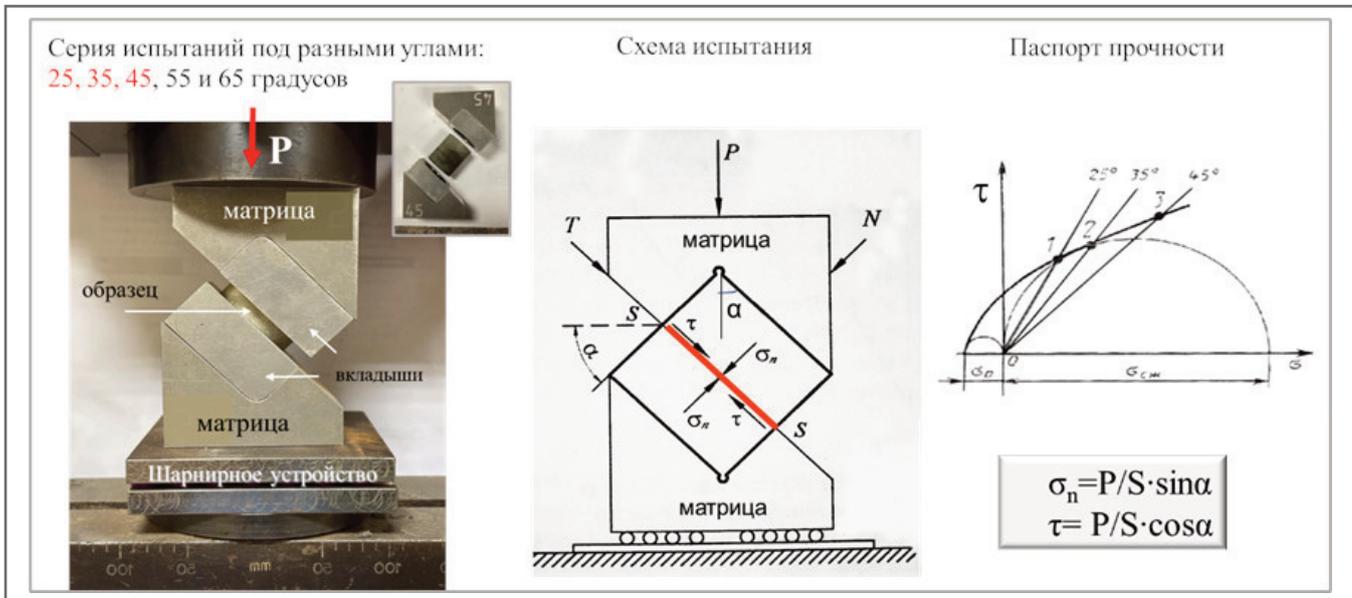


Рис. 3. Построение предельной огибающей по результатам среза со сжатием

ну (пресс), где через стальные плиты к нему прикладывается сжимающая нагрузка. При достижении критической величины нагрузки происходит срез образца по заданной плоскости между обоймами. По результатам испытания рассчитывают нормальное (σ_n) и касательное (τ) напряжения, действующие в плоскости среза:

$$\sigma_n = P/S \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

$$\tau = P/S \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

где P – разрушающее усилие; S – площадь среза; α – угол наклона плоскости среза к направлению внешнего усилия.

Проводят серию испытаний образца на срез под разными углами (минимум три теста). По результатам опытов строят предельную огибающую $\tau=f(\sigma_n)$, по которой определяют сцепление и угол внутреннего трения. Паспорт прочности, полученный по результатам среза со сжатием, можно дополнить кругами Мора, построенными по данным для R_c и R_p (см. рис. 3) [3].

Объемное сжатие является наиболее точным, но и наиболее трудоемким методом определения значений C и ϕ . Он предполагает наличие специальной камеры для объемного сжатия [3, 4]. Его преимуществом является то, что он позволяет получить сдвиговые характеристики в условиях, максимально приближенных к естественным, в том числе и при высоких давлениях. Для получения предельной огибающей необходимо провести не менее трех испытаний в специальной камере для объемного сжатия при разных боковых давлениях по схеме

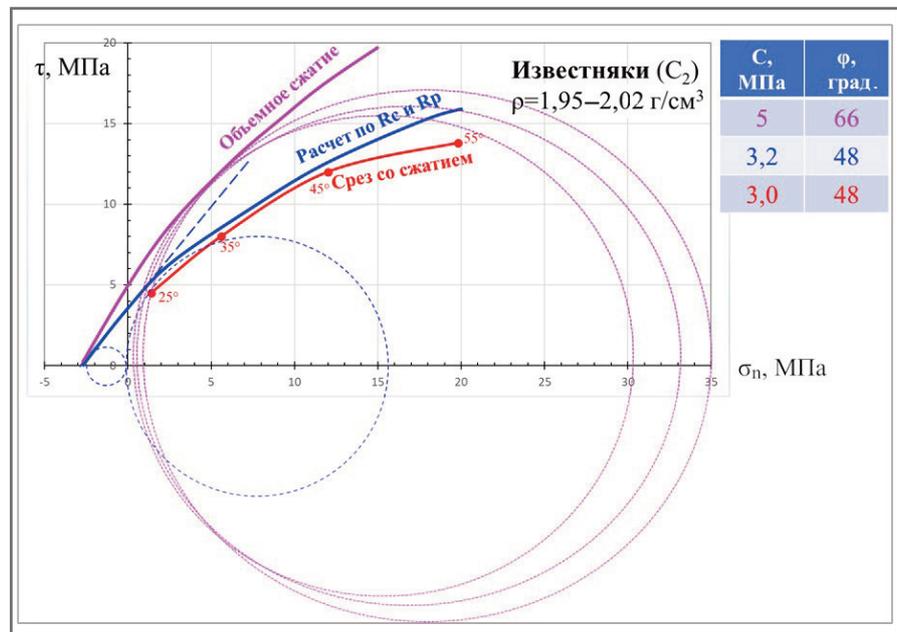


Рис. 4. Предельные огибающие, построенные по данным испытаний образцов известняка тремя разными методами

$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. По результатам нескольких испытаний в координатах « τ – σ_n » строится серия предельных кругов Мора, к которым проводится огибающая. Полученный по результатам объемного сжатия паспорт прочности можно дополнить кругами Мора, построенными по данным одноосного сжатия и растяжения.

Сравнение результатов определения сдвиговых характеристик разными методами на примере известняков ▶

Для известняков Московского региона (C_2 мс) проведена серия испытаний

по определению сдвиговых характеристик с использованием трех вышеописанных методов. Известняки – без примесей, относительно однородные, мелкозернистые, тонкопористые, с плотностью 1,95–2,02 г/см³ и пористостью 25–30%. На рисунке 4 представлен пример наиболее типичных результатов, полученных тремя разными методами.

Все испытания выполнены на образцах цилиндрической формы диаметром 38 мм. Значения показателей прочности на одноосное сжатие ($R_c=16$ МПа) и растяжение ($R_p=2,3$ МПа), использованные для построения предельной огибающей, получены как среднее

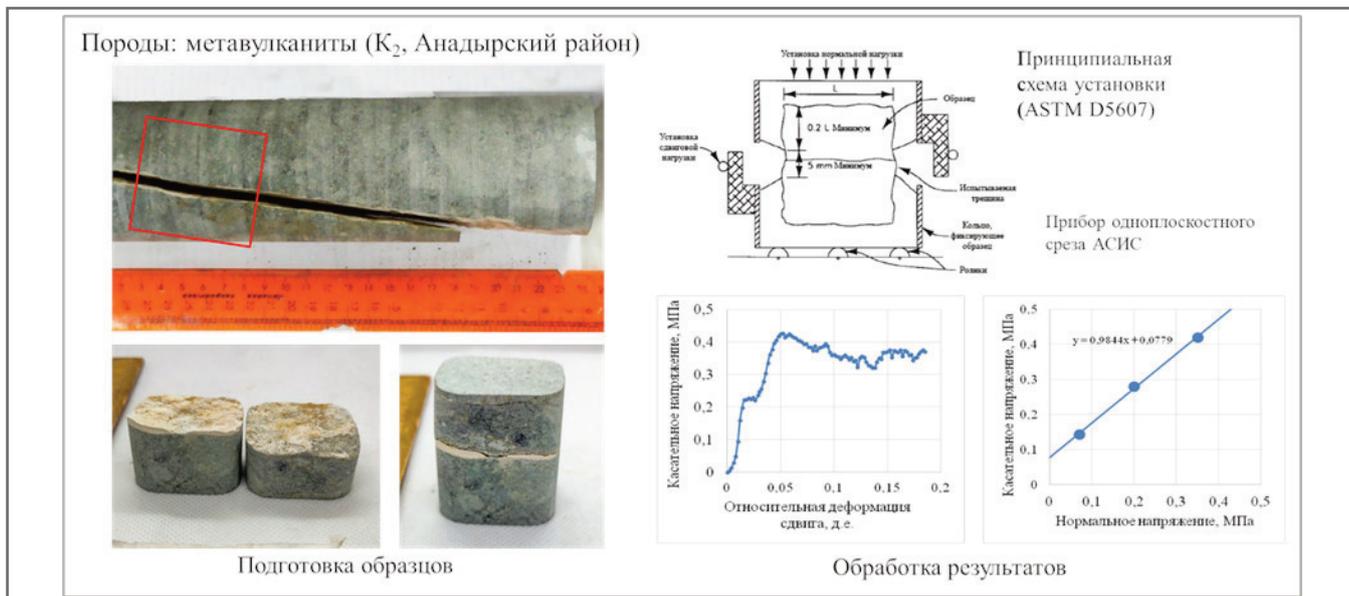


Рис. 5. Процедура проведения и обработки результатов испытания на срез по трещине

арифметическое по результатам шести определений на прессе ZDM-10. Трехосные испытания выполнены на прессе Controls-1500, оснащенной камерой Хоека. Испытания проведены по схеме нагружения Кармана, согласно которой на образец задается фиксированное боковое давление ($\sigma_2 = \sigma_3$), а затем производится его нагружение по вертикали вплоть до разрушения (σ_{1max}). Проведено три испытания при величинах бокового обжатия 0,5; 0,7 и 1 МПа. Срез со сжатием выполнен на прессе ZDM-10. Проведено 4 испытания с разными углами плоскости среза по отношению к вертикали (25, 35, 45 и 55 градусов).

Предельные огибающие, построенные по результатам первых двух методов, практически совпадают, тогда как огибающая, характеризующая объемное сжатие, проходит значительно выше и под большим углом. Чтобы объяснить выявленную закономерность, необходимо провести дополнительные эксперименты, в том числе при объемном сжатии с более высокими величинами бокового давления.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ НА СДВИГ ПО ТРЕЩИАМ В СКАЛЬНЫХ ГРУНТАХ ►

Все массивы горных пород содержат неоднородности в виде поверхностей напластования, ослабленных зон контактов, трещин различной природы, разрывных нарушений с зеркалами скольжения и др., и в ряде случаев устойчивость склона определяется не

прочностью самих пород, а прочностью по поверхностям ослабления [1, 8]. К неблагоприятным сценариям относятся случаи, когда слои или трещины падают в направлении склона и поверхность скольжения может частично или полностью совпадать с поверхностью ослабления. В этих случаях при расчетах устойчивости склонов необходимо знать параметры прочности на сдвиг по трещине.

Методы определения сдвиговых характеристик по трещине делятся на экспериментальные (полевые и лабораторные) и расчетные эмпирические.

Среди *экспериментальных методов* используются:

1. крупномасштабные полевые опыты *in situ* по срезу больших целиков с трещиной в основании (уникальные, трудоемкие, дорогие);
2. лабораторные испытания образца с трещиной (естественной или модельной) в приборе плоскостного среза [8–10];
3. лабораторные трехосные испытания образца с трещиной [9].

Среди *расчетных методов* применяются различные эмпирические уравнения, позволяющие оценить прочность трещины на сдвиг с учетом морфологических особенностей поверхности, геометрических размеров, наличия и типа заполнителя, прочности стенок и иных факторов [8, 11–13]. Одним из наиболее известных является уравнение Н. Бартона [12]:

$$\tau_{тр} = \sigma_n \cdot \text{tg}[JRC \cdot \lg(JCS/\sigma_n) + \varphi_j], \quad (4)$$

где JRC – коэффициент шероховатости

трещины (оценивается в баллах от нуля до 20); JCS – прочность на сжатие материала стенки трещины; σ_n – действующее нормальное напряжение; φ_j – угол трения по трещине ($\approx \varphi_{ост}$, где $\varphi_{ост}$ – угол остаточной прочности, или остаточный угол трения); слагаемое $JRC \cdot \lg(JCS/\sigma_n) = i$ характеризует угол наклона макровыступа.

В настоящее время для моделирования сдвига по трещине и определения параметров прочности используют программный комплекс Particle Flow Code (PFC^{2D}), в котором учитываются: прочность материала стенок трещины, геометрические размеры, различные параметры неровности и шероховатости поверхностей, размер частиц/кристаллов породы и прочность связей между ними в процессе сдвига [14]. Морфологические особенности поверхности трещины, используемые в расчетах, отражены на ее цифровой модели, получаемой с помощью оптического сканирования.

Лабораторные испытания на срез по трещине проведены на образцах метавулканитов (K_2) Анадырского района в связи с проектированием карьера и расчетами устойчивости его бортов. Испытание производилось при помощи прибора одноплоскостного среза АСИС в соответствии с требованиями стандарта ASTM D5607 [10] (рис. 5).

Из керна производился отбор образцов с наиболее значимыми и потенциально опасными для устойчивости бортов карьера трещинами. Из каждого образца с трещиной при помощи камнерезного станка вырезалась призма, состоявшая из двух частей, разделенных

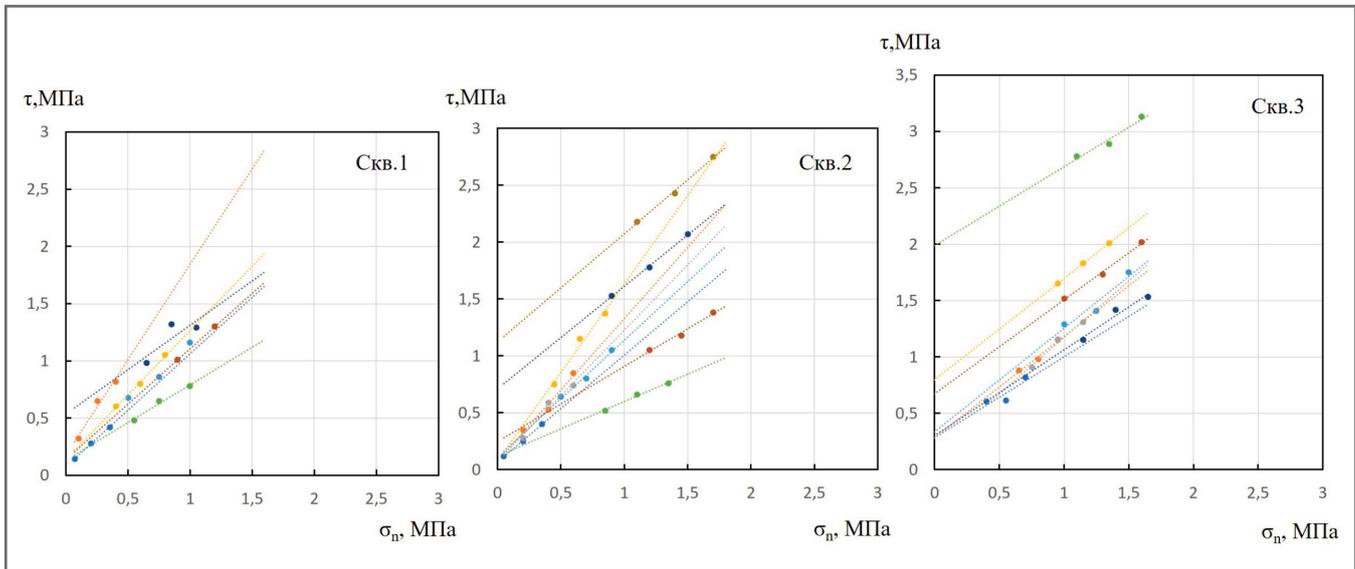


Рис. 6. Идеализированная модель среза по шероховатой трещине [9]: а – предельная огибающая; б – срез при низких величинах нормальной нагрузки по зубцам шероховатостей; в – срез при высоких величинах нормальной нагрузки с разрушением неровностей на поверхности трещины

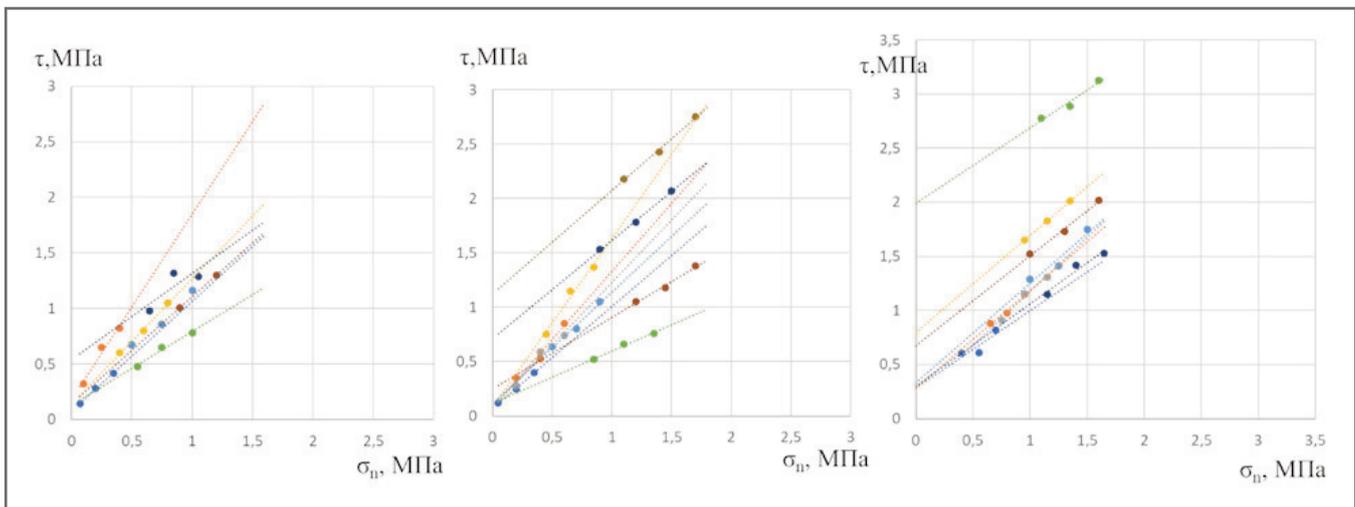


Рис. 7. Графики зависимости касательных напряжений от нормальных напряжений, полученные по данным испытаний на срез по трещине для метавулканитов

трещиной (с плоскостью трещины, параллельной торцевым поверхностям призмы). Подготовленные образцы фиксировались в специальных кольцах (сконструированных И.Е. Большаковым, чтобы избежать использования цементирующих материалов) и помещались в сдвиговой прибор, где выполнялось испытание на срез по трещине при трех различных величинах нормальной нагрузки. В качестве первой ступени выбиралась бытовая нагрузка, определенная исходя из глубины залегания образца. Две последующие ступени принимались в соответствии с первой величиной нормальной нагрузки. Испытание завершалось при достижении относительной деформации, равной 15–20%. Всего было испытано 38 образцов с трещиной.

По итогам трех опытов при различных нормальных нагрузках были построены графики зависимости касательных напряжений от нормальных напряжений (рис. 6) в виде аппроксимирующей прямой, по которой вычислялись сцепление и угол внутреннего трения для трещины. На рисунке 7 представлены диаграммы сдвига для исследованных трещин.

Выполненные испытания на срез по трещине показали изменчивость значений C и φ в зависимости от величины нормальной нагрузки и, соответственно, от глубины отбора образца (рис. 8).

Величина сцепления в целом повышается с увеличением глубины, однако на кривой (см. рис. 8, а, в) выделяются два участка, что в целом соответствует идеализированной модели сдвига по трещине с регулярной макрошерохова-

той поверхностью пилообразного типа (см. рис. 6) [8, 15]. Первый участок пологий, он отражает минимальные значения сцепления при низких величинах нормального напряжения (см. рис. 8, а, в). На этом этапе происходит сдвиг по поверхности имеющихся макровыступов и неровностей, за счет чего угол внутреннего трения становится больше на величину, равную углу неровности (зубца) (см. рис. 6, б). При этом, если микрошероховатость отсутствует, то есть поверхности гладкие, то сцепления между ними практически нет. При увеличении нормальной нагрузки начинается сдвиг с разрушением и срезом зубцов, при этом угол внутреннего трения снижается, но появляется сцепление за счет сопротивления зубцов (см. рис. 6, в). Угол внутреннего трения сни-

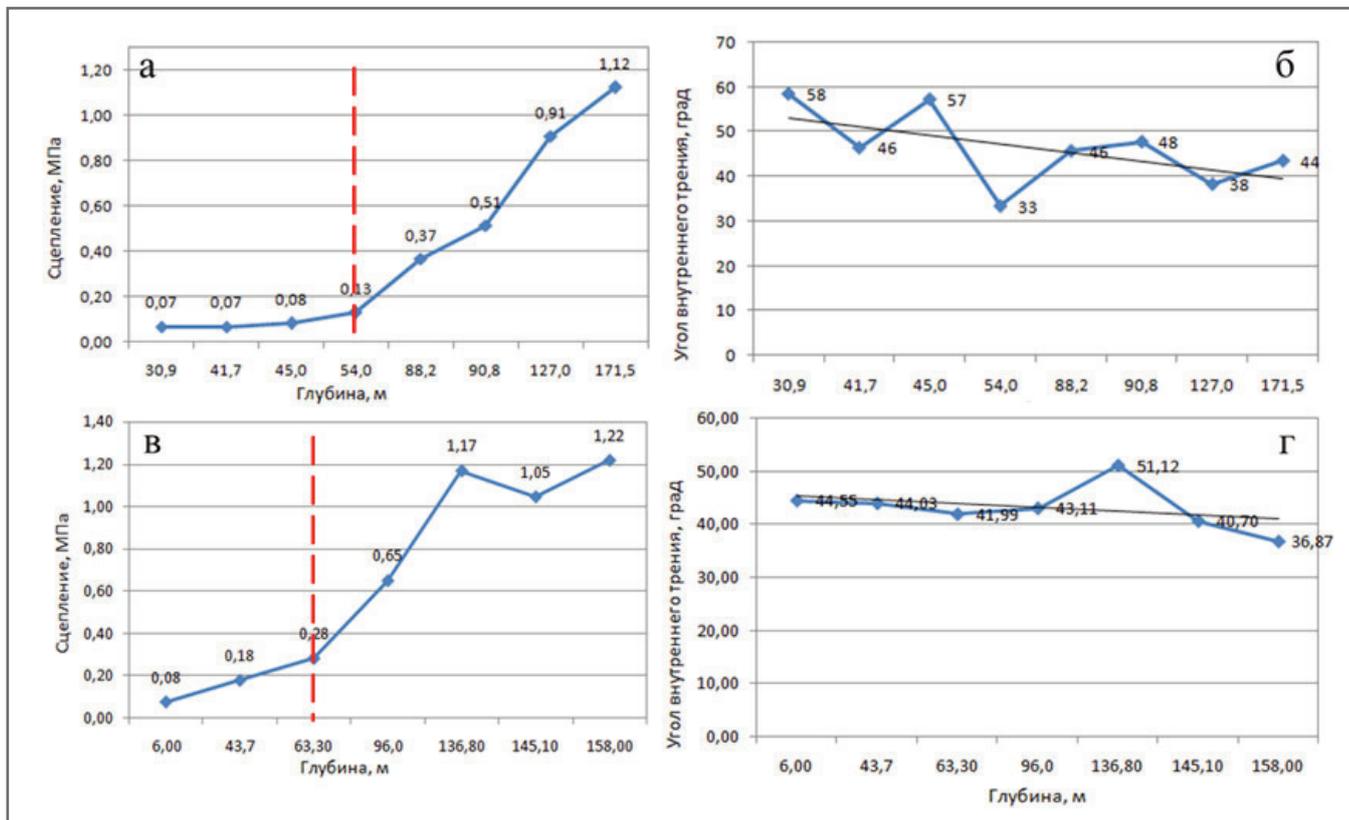


Рис. 8. Зависимость сцепления и угла внутреннего трения по поверхности трещины от глубины отбора образца: а, б – первая система трещин; в, г – вторая система трещин

жается с увеличением нормальной нагрузки (см. рис. 8, б, г).

Таким образом, при определении сдвиговых характеристик по трещине необходимо учитывать их зависимость от нормальной нагрузки и выбирать величины последней с учетом глубины интересующего интервала.

Сравнение сдвиговых характеристик, определенных для ненарушенных образцов и по трещинам, показали, что в первом случае сцепление выше на 2–3 порядка ($C_{cp} = 11$ МПа у образцов; $C_{cp} = 0,07 \div 0,28$ МПа по трещинам). Угол внутреннего трения также выше у образцов, но разница в этом случае не столь существенна ($\varphi_{cp} = 53^\circ$ у образцов; $\varphi_{cp} = 42 \div 50^\circ$ по трещинам). Следует отметить, что параметры прочности на сдвиг по трещинам зависят от многих факторов, в первую очередь от морфологии стенок, геометрических размеров, выветрелости, заполнителя, наличия воды. Влияние перечисленных факторов на сдвиговые характеристики требует отдельного анализа.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ НА СДВИГ МАССИВА СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ▶

В инженерной геологии во многих случаях при решении практических задач

требуются изучение и оценка горных пород в естественных условиях, для которых характерна изменчивость состава, строения и состояния, наличие различного рода неоднородностей (выветрелости, трещиноватости, сланцеватости и т.д.), а также анизотропия физико-механических свойств. При этом традиционный подход к изучению грунтов – разностороннее исследование отобранных образцов – не обеспечивает полноты оценки состояния и характеристик скальных массивов [16–18]. Вместе с тем оценка прочностных свойств скальных массивов является весьма сложной, неоднозначной и трудоемкой задачей. Традиционно применяются три группы методов:

1. полевые крупномасштабные испытания *in situ*;
2. косвенные методы, позволяющие осуществлять переход от свойств образца к свойствам массива на основе сочетания геологических, лабораторных инженерно-геологических и геофизических данных;
3. эмпирические геомеханические классификации и критерии прочности, основанные на учете свойств грунта и некоторых параметров массива, в наибольшей степени влияющих на его свойства (трещиноватость, обводненность, напряженно-деформированное состояние (НДС) и др.).

Расчет сдвиговых характеристик массива метавулканитов с использованием эмпирического критерия прочности Хоека – Брауна ▶

В настоящее время для оценки свойств скальных массивов широко используется эмпирический критерий прочности, предложенный Э. Хоеком и Э. Брауном (Hoek-Brown failure criterion) [2, 19]. Он является развитием критерия прочности Кулона – Мора. Усовершенствование заключается в нелинейной форме предельной огибающей, которая в большей степени соответствует реальному деформированию скального грунта, особенно в области высоких напряжений. Предложенная методика оценки прочностных свойств скального массива основана на многолетнем анализе большого количества экспериментальных данных, полученных как при лабораторных испытаниях, так и при крупномасштабных полевых опытах. В модель Хоека – Брауна входят две группы параметров:

1. показатели, характеризующие прочностные свойства образца скального грунта, – прочность на одноосное сжатие образца (σ_c) и эмпирический коэффициент, отражающий степень взаимного зацепления минеральных частиц ненарушенного скального грунта и влияю-

ший на степень нелинейности предельной огибающей Хоека – Брауна (m_i); 2. параметры, характеризующие нарушенность скального массива, – геологический индекс прочности (GSI) и показатель техногенной нарушенности массива (D) [2, 19].

Обобщенный критерий Хоека – Брауна для трещиноватых массивов имеет вид:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} (m_b \sigma_1 / \sigma_{ci} + s)^a, \quad (5)$$

где σ_1, σ_3 – главные нормальные напряжения (максимальное и минимальное соответственно); m_b, s, a – безразмерные эмпирические коэффициенты, влияющие на форму и степень нелинейности предельной огибающей Хоека. Они зависят от геологического индекса прочности GSI и коэффициента техногенной нарушенности D .

Геологический индекс прочности GSI представляет собой эмпирический показатель, позволяющий количественно (в баллах от нуля до 100) оценить состояние скального массива в зависимости от его трещиноватости и степени сохранности. По сути, это двухпараметровая рейтинговая эмпирическая классификация, в которую в качестве параметров входят блочность (степень нарушенности массива) и характер поверхности трещин. Существуют различные методики определения величины GSI [20]. В данной работе расчет GSI производился по керну скважин через показатель трещиноватости J_{Cond89} [21] и показатель качества керна RQD [22]:

$$\text{GSI} = 1,5J_{\text{Cond89}} + \text{RQD}/2. \quad (6)$$

Зная значения параметров GSI и D , рассчитывали эмпирические коэффициенты m_b, s, a , входящие в критерий Хоека – Брауна, а затем вычисляли показатели прочностных свойств скального массива, в том числе действующие угол внутреннего трения (φ') и удельное сцепление (C') [19]:

$$\varphi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}} \right]; \quad (7)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n}'] (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + (6am_b(s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}) / ((1+a)(2+a))}}. \quad (8)$$

Вычисления производились с помощью программного обеспечения RocLab (Rocscience Inc.).

На рисунке 9 представлена предельная огибающая, полученная для массива метавулканитов. В качестве входных параметров: использовано среднее значение

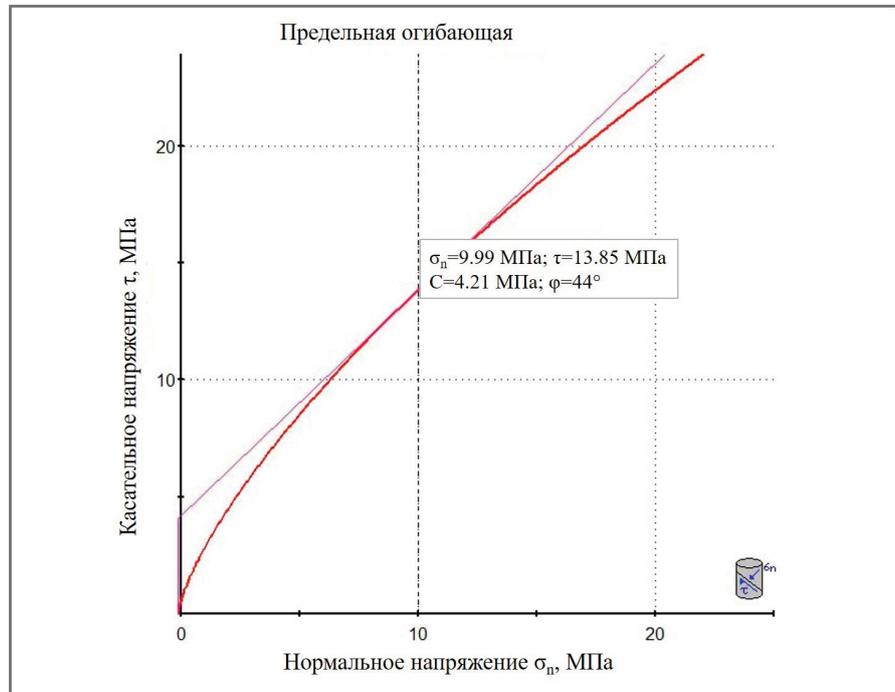


Рис. 9. Предельная огибающая Хоека – Брауна, полученная для массива метавулканитов

Таблица. Зависимость значений C и φ от величины нормального напряжения для массива метавулканитов

σ_n , МПа	C , МПа	φ , °
1	1,05	61
3	1,9	54
5	2,6	50
7	3,3	47
10	4,2	44

показателя $R_c = 64$ МПа, определенное по результатам испытаний 43 образцов; выбрано наиболее характерное для дацитов значение коэффициента $m_i = 22$ (по табличным данным); рассчитано среднее значение геологического индекса прочности GSI=61. В таблице приведены полученные значения C и φ при различных величинах нормального напряжения. Так, при увеличении величины σ_n от 1 до 10 МПа сцепление увеличивается в 4 раза, а угол внутреннего трения снижается с 61 до 44 градусов.

Вычисленные для массива величины сцепления примерно на порядок меньше, чем сцепление, характерное для образцов ненарушенной породы ($C_{cp} = 11$ МПа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Обобщение научно-практической и методической литературы по вопросу сопротивления скальных грунтов сдвигу и проведенные эксперименты и рас-

четы для конкретных объектов позволили сделать следующие выводы.

1. В зависимости от особенностей исследуемого массива и решаемой задачи инженер-геолог должен четко представлять, для какого объекта следует определять параметры прочности на сдвиг – для образца, для поверхностей ослабления (трещин) или для скального массива.

2. Важным вопросом является рациональный выбор и научное обоснование методики определения показателей сопротивления сдвигу. Это могут быть как прямые испытания (полевые или лабораторные), так и расчетные способы и эмпирические уравнения – у каждого метода есть свои преимущества и недостатки.

3. При выборе значений сдвиговых характеристик (C, φ), которые будут использоваться в расчетах, необходимо учитывать нелинейность предельной огибающей и, соответственно, их зависимость от интервала напряжений, для которого они определяются. ■

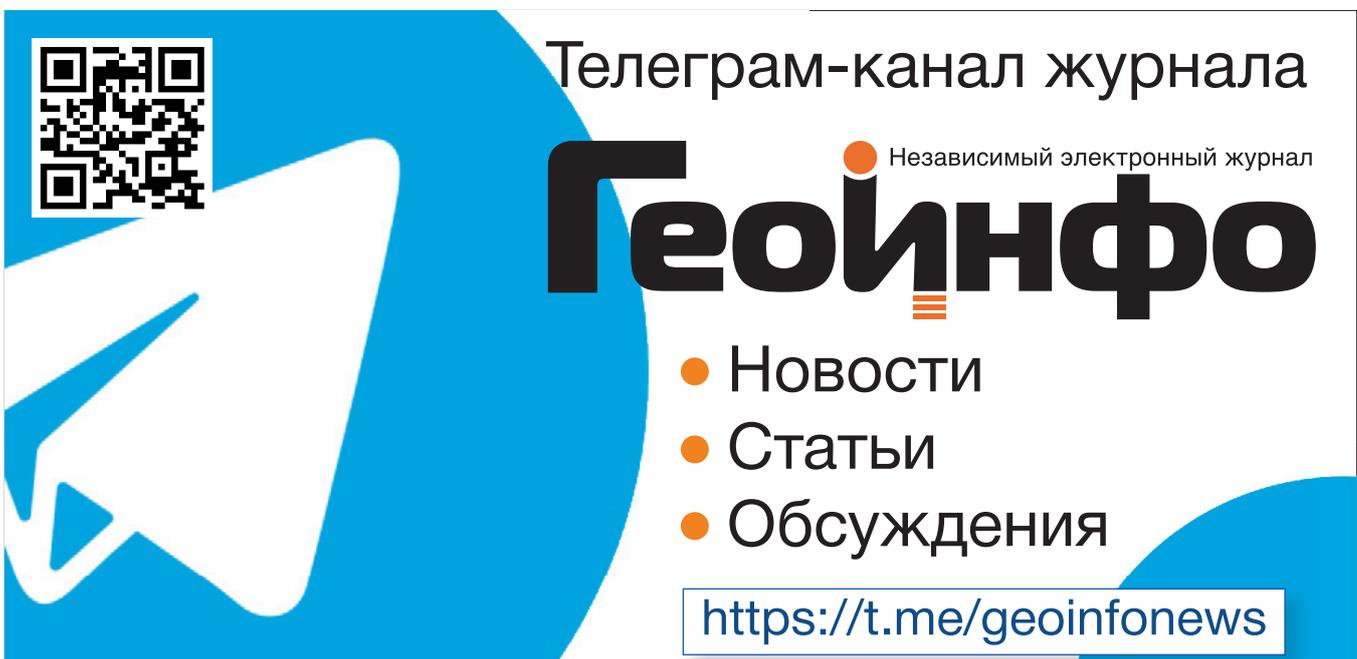
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ►

1. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оползни в скальных грунтах и оценка их устойчивости // Инженерная геология. 2016. № 4. С. 4–21.
2. Hoek E., Brown E.T. Empirical strength criterion for rock masses // J. Geotech. Engin. Div. ASCE, 1980. Vol. 106, № GT9. P. 1013–1035.
3. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Методы определения предела прочности при объемном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 1989.
4. Фролова Ю.В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения. М.: КДУ, 2015. 222 с.
5. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 2001 (с изм. № 1 и № 2).
6. ГОСТ 21153.3-85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. М.: Изд-во стандартов, 1985.
7. ГОСТ 21153.5-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием. М.: Изд-во стандартов, 1988.
8. Могилевская С.Е. Экспресс-метод определения параметров сопротивления сдвигу скальных пород по трещинам. Основные положения. Экспериментальное и теоретическое обоснование. СПб., 2011. 236 с.
9. Зерцалов М.Г. Механика грунтов (введение в механику скальных массивов). М.: Ассоциация строительных вузов, 2006.
10. ASTM D5607-16. Standard test method for performing laboratory direct shear strength tests of rock specimens under constant normal force. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2016.
11. Газиев Э.М. Устойчивость скальных массивов и методы их закрепления. М.: Стройиздат. 1977.
12. Barton N., Bandis S., Bakhtar K. Strength, deformation, and conductivity coupling of rock joints // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 1985. Vol. 22. № 3. P. 121–140.
13. Ladanyi B., Archambault G. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass // Proceedings of the 11th US Symp. on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, 1969.
14. Rios-Bayona F., Johansson F., Mas-Ivars D., Sanchez-Juncal A., Bolin A. Using PFC2D to simulate the shear behavior of joints in hard crystalline rock // Bulletin of Engineering Geology. 2022. Vol. 81. Article 381. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02885-8>.
15. Patton F. Multiple modes of shear failure in rocks // Proceeding of the 1st Congress Int. Soc. Rock Mech., Lisboa. 1966. Vol. 1. P. 509–513.
16. Зеркаль О.В., Фоменко И.К., Фролова Ю.В. Классификация массивов скальных грунтов как инструмент изучения и оценки их поведения // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Сергеевские чтения «Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества». М.: Геоинфо, 2025. № 26. С. 94–98.
17. Фролова Ю.В., Зеркаль О.В. Современные методы определения прочностных свойств скальных и полускальных грунтов при оценке устойчивости склонов // Труды Юбилейной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора Г.С. Золотарева «Современные проблемы инженерной геодинамики». М.: Изд-во Моск. ун-та, 2014. С. 146–150.
18. Фролова Ю.В., Зеркаль О.В. Современные методы определения прочностных свойств скальных и полускальных грунтов // Материалы 3-й Региональной научно-практической конференции «Инженерная геология Северо-Западного Кавказа и Предкавказья: современное состояние и основные задачи», Краснодар, 24–25 ноября 2016 г. Краснодар: Изд-во Кубан. гос. ун-та, 2016. С. 273–277.
19. Hoek E., Brown E.T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition // J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. P. 445–463.
20. Hoek E., Diederichs M.S. Quantification of the geological strength index chart // Proceedings of the 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA, June 23–26, 2013.
21. Bieniawski Z.T. Engineering rock mass classifications. New York: Wiley, 1989. 251 p.
22. Deere D.U. Technical description of rock cores for engineering purposes // Rock. Mech and Eng. Geol. 1963. Vol. 1. № 1. P. 16–22.

REFERENCES ►

1. Zerkal' O.V., Fomenko I.K. Opolzni v skal'nykh gruntakh i otsenka ikh ustoichivosti [Landslides in rocks and assessment of their stability] // Inzhenernaya Geologiya. 2016. № 4. S. 4–21 (in Rus.).
2. Hoek E., Brown E.T. Empirical strength criterion for rock masses // J. Geotech. Engin. Div. ASCE, 1980. Vol. 106, № GT9. P. 1013–1035.
3. GOST 21153.8-88. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri ob'emnom szhatii [Rocks and soils. Methods for determining the ultimate strength under triaxial compression]. M.: Izd-vo standartov, 1989 (in Rus.).
4. Frolova Yu.V. Skal'nye grunty i metody ikh laboratornogo izucheniya [Rocks and laboratory methods for their investigation]. M.: KDU, 2015. 222 s. (in Rus.).
5. GOST 21153.2-84. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii [Rocks and soils. Methods for determining the ultimate uniaxial compressive strength]. M.: Izd-vo standartov, 2001 (s izm. № 1 i № 2) (in Rus.).
6. GOST 21153.3-85. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom rastyazhenii [Rocks and soils. Methods for determining the ultimate uniaxial tensile strength]. M.: Izd-vo standartov, 1985 (in Rus.).

7. GOST 21153.5-88. Porody gornye. Metod opredeleniya predela prochnosti pri srezе so szhatiem [Rocks and soils. Method for determining the ultimate shear strength under compression]. M.: Izd-vo standartov, 1988 (in Rus.).
8. Mogilevskaya S.E. Ekspress-metod opredeleniya parametrov soprotivleniya sdvigu skal'nykh porod po treshchinam. Osnovnye polozeniya. Eksperimental'noe i teoreticheskoe obosnovanie [Express-method for determining shear strength parameters of rock joints. Fundamentals. Experimental and theoretical substantiation]. SPb., 2011. 236 s. (in Rus.).
9. Zertsalov M.G. Mekhanika gruntov (vvedenie v mekhaniku skal'nykh massivov) [Rock mechanics (introduction to rock mass mechanics)]. M.: Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov, 2006 (in Rus.).
10. ASTM D5607-16. Standard test method for performing laboratory direct shear strength tests of rock specimens under constant normal force. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2016.
11. Gaziev E.M. Ustoichivost' skal'nykh massivov i metody ikh zakrepleniya [Stability of rock masses and methods for their reinforcement]. M.: Stroizdat. 1977 (in Rus.).
12. Barton N., Bandis S., Bakhtar K. Strength, deformation, and conductivity coupling of rock joints // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 1985. Vol. 22. № 3. P. 121–140.
13. Ladanyi B., Archambault G. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass // Proceedings of the 11th US Symp. on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, 1969.
14. Rios-Bayona F., Johansson F., Mas-Ivars D., Sanchez-Juncal A., Bolin A. Using PFC2D to simulate the shear behavior of joints in hard crystalline rock // Bulletin of Engineering Geology. 2022. Vol. 81. Article 381. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02885-8>.
15. Patton F. Multiple modes of shear failure in rocks // Proceeding of the 1st Congress Int. Soc. Rock Mech., Lisboa. 1966. Vol. 1. P. 509–513.
16. Zerkal' O.V., Fomenko I.K., Frolova Yu.V. Klassifikatsiya massivov skal'nykh gruntov kak instrument izucheniya i otsenki ikh povedeniya [Classification of rock masses as a tool for studying and evaluating their behavior] // Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii. Sergeevskie chteniya "Massivy gruntov kak zhizneobespechivayushchii resurs obshchestva". M.: Geoinfo, 2025. № 26. S. 94–98 (in Rus.).
17. Frolova Yu.V., Zerkal' O.V. Sovremennye metody opredeleniya prochnostnykh svoystv skal'nykh i poluskal'nykh gruntov pri otsenke ustoichivosti sklonov [Modern methods for determining strength properties of hard and soft rocks for slope stability assessment] // Trudy Yubileinoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora G.S. Zolotareva "Sovremennye problemy inzhenernoi geodinamiki". M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2014. S. 146–150 (in Rus.).
18. Frolova Yu.V., Zerkal' O.V. Sovremennye metody opredeleniya prochnostnykh svoystv skal'nykh i poluskal'nykh gruntov [Modern methods for determining strength properties of hard and soft rocks] // Materialy 3-i Regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Inzhenernaya geologiya Severo-Zapadnogo Kavkaza i Predkavkaz'ya: sovremennoe sostoyanie i osnovnye zadachi", Krasnodar, 24–25 noyabrya 2016 g. Krasnodar: Izd-vo Kuban. gos. un-ta, 2016. S. 273–277 (in Rus.).
19. Hoek E., Brown E.T. The Hoek-Brown failure criterion and GS – 2018 edition // J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. P. 445–463.
20. Hoek E., Diederichs M.S. Quantification of the geological strength index chart // Proceedings of the 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA, June 23–26, 2013.
21. Bieniawski Z.T. Engineering rock mass classifications. New York: Wiley, 1989. 251 p.
22. Deere D.U. Technical description of rock cores for engineering purposes // Rock. Mech and Eng. Geol. 1963. Vol. 1. № 1. P. 16–22.



Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал

ГеоИнфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>



ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ В УСЛОВИЯХ НОВОЙ РЕАЛЬНОСТИ. СМОЖЕТ ЛИ ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПОБЕДИТЬ ДЕМПИНГ И ФАЛЬСИФИКАЦИИ?

Поступила в редакцию: 1.12.2025

Принята к публикации 27.12.2025

Опубликована 30.01.2026

ШМЕЛЕВ Д.Г.

Директор по изысканиям
ООО «ГеоСиб», к.г.н., г. Барнаул, Россия
d.shmelev@geosib.org

ЗЕПАЛОВ Ф.Н.

Без аффилиации
г. Москва, Россия
zepalovfn@pf-eng.ru

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена анализу системного кризиса инженерных изысканий в России в контексте цифровой трансформации. Рассматриваются влияние демпинга и дефицита кадров, несовершенство нормативной базы и недофинансирование. Особое внимание уделено оценке эффекта внедрения новых технологий и изменения бизнес-процессов. Авторы предлагают инструменты, позволяющие снизить риски маргинализации рынка и сохранить устойчивое развитие отрасли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

инженерные изыскания; инженерно-геологические изыскания; системный кризис; демпинг цен; недостаток специалистов; недофинансирование; фальсификация данных; недобросовестные изыскатели; нормативная база; новые технологии; информационная трансформация; цифровизация; добросовестность исполнителей.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Шмелев Д.Г., Зепалов Ф.Н. Инженерные изыскания в условиях новой реальности. Сможет ли цифровизация победить демпинг и фальсификации? // Геоинфо. 2025. Т. 7. № 4. С. 32–42. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-32-42.

SITE INVESTIGATIONS FOR CONSTRUCTION IN THE NEW REALITY. CAN DIGITALIZATION OVERCOME DUMPING AND FALSIFICATION?

Received: 1.12.2025

Accepted for publication 27.12.2025

Published 30.01.2026

SHMELEV D.G.

Director of Engineering Surveys
GeoSib LLC, PhD (Geography), Barnaul,
Russia
d.shmelev@geosib.org

ZEPALOV F.N.

Without affiliation
zepalovfn@pf-eng.ru

ABSTRACT

The article analyzes the systemic crisis in site investigations (engineering surveys) in Russia in the context of digital transformation. It considers the impact of price dumping and workforce shortages, the shortcomings of the regulatory framework, and underfunding. Particular attention is given to assessing the effects of implementing new technologies and changing business processes. The authors propose tools aimed at reducing the risks of the market marginalization and at ensuring the sustainable development of the industry.

KEYWORDS:

site investigations (engineering surveys); engineering-geological surveys; systemic crisis; price dumping; workforce shortages; underfunding; data falsification; dishonest surveyors; regulatory framework; new technologies; IT-driven transformation; digitalization; contractors' reliability.

FOR CITATION:

Shmelev D.G., Zepalov F.N. Inzhenernye izyskaniya v usloviyakh novoy real'nosti. Smozhet li tsifrovizatsiya pobedit' demping i falsifikatsii? [Site investigations for construction in the new reality. Can digitalization overcome dumping and falsification?] // *GeoInfo*. 2025. T. 7. № 4. S. 32–42. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-32-42 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

В профессиональной среде широко распространено мнение о системном кризисе в сфере инженерных изысканий, который затрагивает практически все аспекты данной деятельности. В отраслевых журналах, на конференциях упоминают о недостатке специалистов, несовершенстве законодательной и нормативной базы, хроническом недофинансировании изысканий, недобросовестных конкурентах-изыскателях, которые за счет снижения качества и фальсификаций данных снижают цену ниже себестоимости у честных исполнителей. В качестве выхода в первую очередь часто предлагают решения, связанные с усилением роли государства и дополнительного финансирования с его стороны.

Современное общество живет в эпоху информационной трансформации, когда обладание информацией и умение ей управлять являются преимуществами. В настоящее время не только появляется новое оборудование, позволяющее получать информацию, но и меняются подходы к ее обработке, ко-

торые сами по себе становятся все более сложными и технологичными.

Внедрение новых технологий и подходов – это всегда затраты, связанные как с покупкой нового оборудования (приборов, станков, программных комплексов), так и с внедрением новых бизнес-процессов, перезапуском уже привычных технологических процессов и взаимодействий. С учетом неблагоприятной ситуации в изысканиях, может возникнуть ошибочное мнение о несвоевременности инноваций: мол, необходимо «законсервировать» имеющиеся практики, чтобы дожить до более богатых времен, отказаться от покупки нового оборудования, внедрения новых подходов, снизить затраты – словом, руководствоваться народной мудростью «не до жиру, быть бы живу».

В этой статье мы попытаемся рассмотреть основные проблемы, которые широко обсуждаются в сообществе изыскателей, и понять, какие инструменты помогут их преодолеть.

Для этого исследования мы изначально решили рассмотреть несколько следующих вопросов.

1. Действительно ли ценовая политика приводит к маргинализации рынка?
2. Есть ли дефицит специалистов в отрасли?
3. Есть ли эффект от внедрения новых технологий, позволяющий говорить о трансформации отрасли?
4. Что в целом ждет отрасль и есть ли шанс оставаться «в плюсе» в условиях новой реальности?

НЕПРОЗРАЧНОЕ ЦЕНООБРАЗОВАНИЕ И МАРГИНАЛИЗАЦИЯ РЫНКА ►

Согласно данным Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС) Росстата, оборот и общая стоимость оказанных услуг организаций, ведущих деятельность по Общероссийскому классификатору видов экономической деятельности (ОК-ВЭД) в сферах инженерных изысканий, инженерно-технического проектирования, управления проектами строительства, выполнения строительного контроля и авторского надзора, предоставления технических консультаций после кратного падения в 2020 году, в 2024

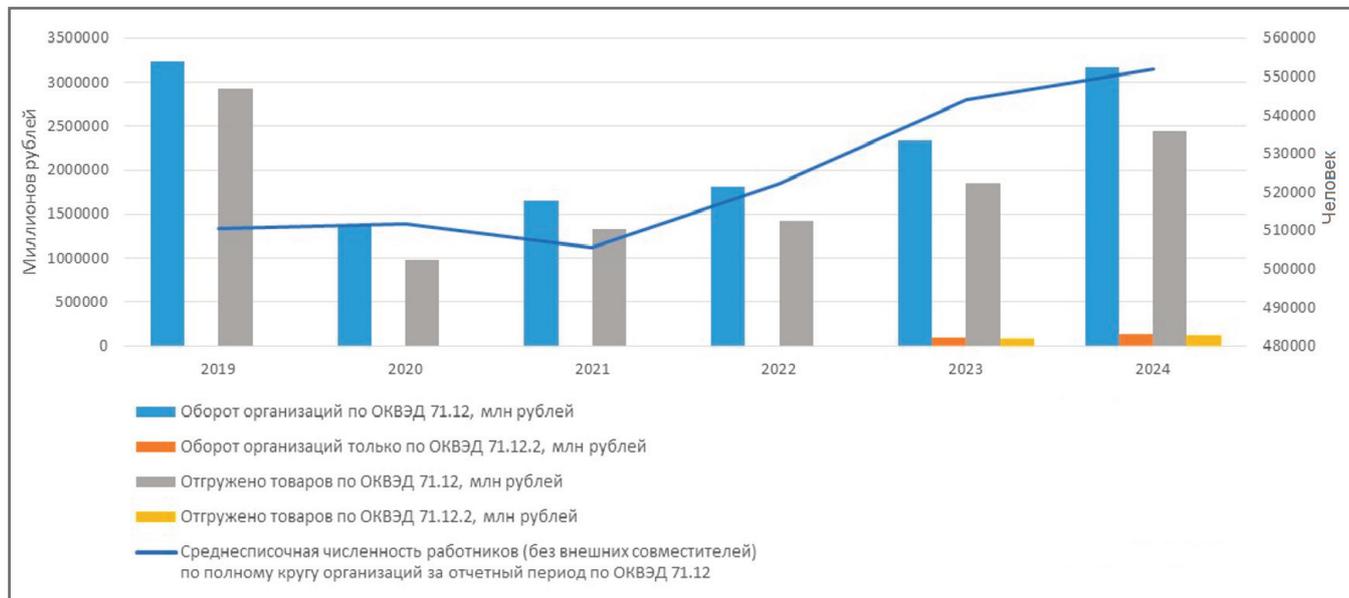


Рис. 1. Основные статистические показатели по ОКВЭД 71.12 согласно данным ЕМИСС [1]. Данные за 2023 и 2024 годы приведены с учетом новых регионов. Также с 2023 года отдельно ведется учет по ОКВЭД 71.12.2 («Инженерные изыскания в строительстве»)

году не достигли уровня 2019 года, составив только 97% по обороту и 83% по стоимости оказанных услуг. При этом число занятых в отрасли в 2024 году составляло около 552 тыс. человек, что на 8% больше, чем в 2019 году [1] (рис. 1). (Отметим, что доступных данных за 2025 год для этого и последующих примеров на момент подготовки статьи еще не было).

Если принять за базовый показатель стоимости работ цену одного погонного метра бурения «под ключ» (с учетом всех полевых, лабораторных и камеральных работ), то выяснится, что за последние 10 лет цена практически не изменилась. В интернете достаточно легко найти предложения по выполнению инженерно-геологических изысканий за 2500–3500 руб. за метр бурения как для промышленного, так и для частного жилищного строительства [2–4], что соответствует ценам десятилетней давности. Только в этом (2025) году авторы столкнулись с ситуацией, когда организация из Новосибирска готова была делать изыскания на Дальнем Востоке при общем объеме бурения около 1500 пог. м всего за 3 млн руб. При этом следует отметить, что стоимость работ только буровых бригад (бурения и отбора образцов) за последние 3 года выросла на 20–30% в зависимости от региона.

Согласно отчетам Росстата, за период с 2014 по 2024 год инфляция составила около 120%. Согласно данным сборников индексов пересчета сметной стоимости, индекс изменения сметной стоимости по отношению к ценам 1991

года вырос с 31,37 в III квартале 2008 года до 76,24 в III квартале 2025 года. То есть в реальном выражении стоимость метра изысканий упала более чем в два раза.

Таким образом, при сохранении подходов к ценообразованию многолетней давности изыскательские организации должны выполнять прежний объем работ с соблюдением всех требований технических регламентов и с тем же качеством, но при двукратном дефиците реального финансирования по сравнению с уровнем 2008 года. И это, по сути, маргинализировало рынок инженерных изысканий: многие участники, чтобы оставаться на плаву, вынуждены применять недобросовестные практики, которые будут рассмотрены далее.

Демпинг цен как единственная стратегия выживания ▶

В условиях, когда заказчик на, казалось бы, открытых конкурсных процедурах выбирает исполнителя по формальному критерию наименьшей цены, честная экономика работ становится невозможной. Компании, пытающиеся закладывать в сметы реальные затраты на оборудование, топливо, материалы и зарплаты квалифицированных специалистов, просто не проходят отбор. В результате рынок вынуждает игроков прибегать к демпингу цен [5, 6]. Так, в отдельных видах изысканий итоговая стоимость работ по результатам открытых закупок может составлять 10–25% от начальной цены, которую заказчик официально объявил стартовой при запуске торгов [6–8]. Экономия такого по-

рядка может быть объяснена либо полной некомпетентностью специалистов заказчика при определении начальной стоимости, либо распространением нечисто плотных практик при выполнении работ, которые будут описаны далее.

Системные фальсификации как бизнес-модель ▶

При экстремально низких ценах выживание компаний обеспечивается за счет повсеместного снижения качества изысканий и, что гораздо опаснее, массовой фальсификации данных. Нерентабельность честной работы порождает «серые» схемы оптимизации затрат. По оценкам отдельных экспертов [5–10], доля фальсифицированных данных по результатам полевых работ по инженерно-геологическим изысканиям может достигать 50% за счет следующих схем.

- «Бумажные» скважины. Когда количество и глубина реально пробуренных выработок не соответствуют программе работ и исполнительной смете, недостающие данные дополняются недобросовестными исполнителями в камеральных условиях.
- *Нарушение технологий и методов работ.* Распространены случаи, когда в реальности скважины бурятся шнековым или ударно-канатным методом, хотя в смете указан колонковый способ. Лабораторные испытания грунтов зачастую выполняются экспресс-методом с нарушением методик. При геодезических изысканиях типичными нарушениями являются разреживание нормативной съемочной сети, а также применение приборов и методов измерений,

точность которых ниже заявленной в программе работ.

КАДРЫ РЕШАЮТ ВСЕ ►

По данным специализированных рекрутинговых платформ HeadHunter, SuperJob, «Авито Работа» на ноябрь 2025 года, средняя по России зарплата изыскателей находилась в диапазоне 65–125 тыс. руб., при этом в Санкт-Петербурге она может достигать 150 тыс. руб., а в Москве – даже 170 тыс. руб. С 2019 года она выросла более чем на 20%.

На протяжении последних 5 лет профессия изыскателя стабильно входит в число самых востребованных. По данным на ноябрь 2025 года, на сервисах HeadHunter и SuperJob было размещено около 4000 вакансий, в описании которых указаны специальности «инженер-изыскатель», «инженер-геолог», «геодезист», «гидрометеоролог», «эколог-изыскатель», «геолог-камеральщик».

В 2024 году в России в бакалавриат и магистратуру по специальностям, связанным с инженерными изысканиями («геология», «геодезия», «география», «геоэкология», «гидрометеорология»), было принято 9467 человек, при среднем конкурсе 5 человек на место. Для сравнения, в 2022 году в сумме было зачислено 9879 человек. При этом выпустилось в 2024 году по вышеуказанным направлениям 6030 человек [11]. В 2025 году выпускники по данным специальностям могут рассчитывать на начальную зарплату 50–70 тысяч рублей согласно данным сервисов HeadHunter, SuperJob, «Авито Работа».

По данным исследовательского центра SuperJob, студенты-старшекурсники вузов, входящих в первую тридцатку национальных рейтингов (независимо от специальности и региона) рассчитывают на трудоустройство с начальным уровнем зарплат 80–100 тыс. руб. Медианная зарплата, которая предлагалась для выпускников в 2024 году, составила 68,9 тыс. руб., в то время как для IT-отрасли – 87,1 тыс. руб. [12]. При этом зарплатные предложения для выпускников IT-направлений из пяти лидирующих вузов (МФТИ, МГУ, ИТМО, МГТУ им. Н.Э. Баумана, СПбГУ) в 2025 году повысились 250 тыс. руб. [13].

Но в инженерных изысканиях такие зарплаты, как в IT-отрасли, не предлагаются не только выпускникам МГУ, МИИГАиК, МГРИ, но и большинству высококвалифицированных специалистов с многолетним опытом. В целом, зарплаты молодых специалистов в инженерных изысканиях оказываются ни-

же их ожиданий и медианной зарплаты выпускников по стране без привязки к отрасли. Для существенного повышения уровня дохода выпускник-изыскатель вынужден ориентироваться на работу вахтовым методом либо на переезд в регионы Крайнего Севера или Дальнего Востока. Для молодого специалиста обзавестись семьей и имуществом (жильем, автомобилем), работая в изыскательской сфере только в своем регионе, практически невозможно.

Согласно методике НИУ ВШЭ, принадлежность к среднему классу определяется по душевому доходу семьи. Нижний порог вхождения в эту категорию составляет 1,25 медианного дохода, сложившегося в регионе проживания человека. Таким образом, даже высокая по меркам отрасли зарплата инженера-изыскателя может не обеспечивать его семье статус среднего класса. Например, в 2024 году в России этот нижний порог составляет 78,854 тыс. руб. для одного человека, для семьи их трех человек – 236 тыс. руб., из четырех – 315 тыс. руб. [14]. Но такие зарплаты даже для опытных изыскателей являются максимальными в отрасли. Анализ открытых вакансий на платформах HeadHunter и SuperJob показывает, что зарплата более 200 тыс. руб. в месяц указана менее чем в 10% от всего количества объявлений, а более 300 тысяч – менее чем в 1%. Поэтому большой процент молодых специалистов, искренне желающих работать в отрасли инженерных изысканий, после нескольких лет работы вахтовым методом или с маленькой зарплатой в своем регионе начинают рассматривать варианты смены профессии.

Оценить количество специалистов, занятых в отрасли, можно несколькими способами. Так, согласно данным Росстата, в проектно-изыскательской деятельности в 2024 году было занято около 552 тыс. человек. А в реестре аттестованных специалистов в области инженерных изысканий по данным на 15 октября 2025 года состояло 35,471 тыс. человек [15]. Общее количество действующих членов СРО в области инженерных изысканий в I квартале 2025 года составило 19,912 тыс. юридических лиц и индивидуальных предпринимателей. Общее количество организаций, зарегистрированных по коду ОКВЭД 71.12.2 («Деятельность в области инженерных изысканий...»), по данным сервисов «Прозрачный бизнес» (ФНС), «СПАРК-Интерфакс» и Chesko составляет порядка 8–10 тыс. При этом коли-

чество специалистов, занятых в инженерных изысканиях в 2019 году, оценивалось в 31,1 тыс. человек [16].

На основании приведенных данных можно сделать вывод, что количество специалистов, занятых в сфере инженерных изысканий, с 2019 года увеличилось и может достигать 50–100 тыс. человек (нижняя граница рассчитывалась исходя из штата в 5 человек на одну организацию, а верхняя – как 20% от общего числа занятых по ОКВЭД 71.12). Общее количество профильных выпускников с высшим образованием ежегодно составляет не менее 6% от общего числа занятых в отрасли и превышает количество открытых вакансий.

Стоит отметить, что наши оценки отличаются от общепринятого в отрасли мнения, согласно которому дефицит специалистов на текущий момент составляет 20–30% (или до 20 тыс. человек для всей отрасли), а количество новых специалистов составляет менее 2% от всего количества специалистов [16, 17]. В то же время наше предположение достаточно хорошо коррелирует с общей тенденцией к снижению конкурса для поступающих в профильные вузы в последние годы.

ИННОВАЦИИ В ОТРАСЛИ: ДЕКЛАРИРУЕМОЕ И РЕАЛЬНОЕ ВНЕДРЕНИЕ ►

Технологическая трансформация последних десятилетий, естественно, не прошла мимо инженерных изысканий. Рассмотрим лишь некоторые примеры инноваций, которые внедряются и развиваются в нашей стране в области инженерных изысканий [6].

Инновации в инженерно-геодезических изысканиях ►

Развитие геодезических технологий привело к широкому применению высокоточных приборов и систем позиционирования. Это дальнейшее развитие спутниковой геодезической аппаратуры (ГНСС-оборудования), позволяющей выполнять позиционирование с точностью до сантиметров, высокоточных оптических тахеометров, лазерных нивелиров, внедрение лидаров (лазерных сканеров LiDAR). Совместно с программным обеспечением это оборудование значительно ускоряет обработку полевых материалов. В то же время стоимость такого оборудования, например высокоточных тахеометров и лидаров, составляет до 10 млн руб. и более.

Широкое распространение получили дистанционные методы исследования с

помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и космических снимков. Установка высокоточных сканеров на БПЛА позволяет выполнять геодезические работы с точностью до десяти сантиметров на больших площадях, что является достаточным для большинства видов работ [18]. Активно используются оптические снимки высокого и сверхвысокого разрешения (0,3–1,0 м/пиксель) с иностранных и российских спутников. К сожалению, на данный момент качество и доступность иностранных снимков значительно выше. Точность ортофотопланов на основе космической съемки составляет 0,5–3 м.

Новое лабораторное оборудование ►

В последние 18 лет в российских геотехнических лабораториях активно внедряется автоматизированное оборудование. Существенно ускорили процессы испытаний роботизированные системы определения механических свойств грунтов: например, длительное испытание может самостоятельно проводиться системой даже ночью, в то время как лаборант вместо наблюдений за ним занимается подготовкой следующей партии образцов. При этом наблюдается значительный дисбаланс между почти полной автоматизацией определения механических характеристик грунтов и минимальной автоматизацией исследований их физических свойств. Правда, предпринимаются, например, попытки ускорения процесса исследования гранулометрического состава с помощью лазерного гранулометра, но этот подход пока не регулируется нормативными документами.

Также происходит интеграция оборудования со специализированным программным обеспечением для управления испытаниями и обработки данных. Это позволяет создавать цифровые архивы результатов и исключать человеческие ошибки при расчетах.

Новая буровая техника ►

Одним из значимых направлений развития буровой техники является совершенствование и внедрение новых пневмоударных технологий, позволяющих существенно увеличить скорость проходки в крепких и скальных грунтах. Параллельно с этим отмечается активное использование специализированных устройств для выпрессовки керна (кернавыдавливателей), что минимизирует риск нарушения монолитности образца при его извлечении из трубы.

Важную роль в обеспечении эффективности пневмоударного бурения играет применение более совершенных и надежных компрессоров, способных стабильно обеспечивать требуемые параметры давления и расхода воздуха. Что касается бурового инструмента, то для бурения особо прочных пород широко используются алмазные коронки, в том числе китайского производства. В то же время в отношении твердосплавных коронок специалисты отмечают тенденцию к снижению их эксплуатационного ресурса, связанную с ухудшением качества применяемых сплавов.

Несмотря на отдельные попытки внедрения систем автоматизированного управления процессом бурения (спускоподъемными операциями), которые позволили бы сократить состав буровой бригады, данная задача до сих пор не нашла комплексного решения в массовой практике.

Новое программное обеспечение ►

Помимо уже упомянутого программного обеспечения (ПО) для обработки результатов геодезических работ и лабораторных испытаний, активно развиваются и другие программные комплексы. В первую очередь это системы контроля и управления, которые позволяют непосредственно отслеживать ход полевых работ, проверять полевые материалы и оценивать добросовестность исполнителей. При этом на рынке уже давно представлено ПО для камеральной обработки результатов полевых и лабораторных работ.

Лидерами в геотехнических расчетах являются иностранные программные комплексы PLAXIS и MIDAS, несмотря на сложности с лицензированием. Также разработано отечественное ПО для теплотехнических расчетов, расчетов устойчивости склонов, решения гидрогеологических задач. Стоимость и требования к компьютерному обеспечению для данных программ – самые разные, но для наиболее продвинутых из них требуется применение вычислительных машин стоимостью в десятки миллионов рублей, в том числе специально выделенных серверов.

Другие инновации ►

Отдельного внимания заслуживают инновационные подходы и оборудование для инженерно-геофизических исследований, для полевых испытаний грунтов (в первую очередь методами

статического и динамического зондирования) и многие другие направления. Но рамки одной статьи не позволяют детально рассмотреть весь спектр новых технологических решений.

Востребованность инноваций в отрасли инженерных изысканий ►

К сожалению, инновации часто бывают не нужны ни регулятору, ни заказчику, ни самим изыскателям. Например, объемы архивных материалов «Мосгоргеотреста» по инженерным изысканиям в Москве позволяют создать трехмерную геологическую модель и минимизировать объемы бурения, в том числе за счет виртуальных скважин, построенных искусственным интеллектом (алгоритмами машинного обучения) на основе архивных данных. Но данный подход никак не подкреплен нормативными требованиями и не может быть применен при изысканиях [19, 20].

Другой пример – внедрение БПЛА для геодезических работ. Их массовое применение пока ограничено рядом барьеров, таких как:

- нормативно-правовые ограничения (сложные процедуры согласования полетов, в том числе практически полное запрещение полетов гражданских дронов с большой полезной нагрузкой в ряде регионов, отсутствие единых стандартов обработки и оформления данных БПЛА для отчетной документации);
- технические и кадровые проблемы (нехватка квалифицированных операторов дронов с геодезической/изыскательской подготовкой, высокая стоимость профессиональных БПЛА и ПО для обработки данных и, как следствие, использование потребительских дронов, приобретенных на массовых онлайн-площадках (например, на AliExpress), не предназначенных для подобных задач, да и в целом консервативное и скептическое отношение профессионального сообщества к внедрению инноваций в отрасли) [21].

Широкое внедрение программных комплексов для геотехнических расчетов, к сожалению, тоже имеет свои нюансы. Авторы сталкивались, например, со следующим. Инженер-геолог одной из проектных организаций топливно-энергетического комплекса при выполнении расчетов устойчивости склона в одной из дорогостоящих программ с применением метода конечных элементов построил расчетный профиль склона в разных вертикальных и горизонтальных масштабах, как на инженер-

но-геологическом разрезе. Этот расчетный профиль попал в отчет по инженерной-геологическим изысканиям, который получил положительное заключение ФАУ «Главгосэкспертиза России», что было недопустимо.

Усложнение расчетных программ ведет к узкой специализации среди изыскателей. Расчеты выполняет специалист, который не был знаком с объектом исследования, не видел его в полевых условиях.

Другая проблема – это использование недостоверных, зачастую фальсифицированных, данных изысканий в качестве исходных данных для расчетов. Как отмечалось в статье ранее, часть данных (по геологическому строению, свойствам грунтов) сознательно фальсифицируется, а в таких случаях никакое точное моделирование с применением дорогостоящего ПО не обеспечит достоверного результата. Распространены случаи, когда при выполнении температурных наблюдений при инженерных изысканиях или геотехническом мониторинге результаты измерений фальсифицируются, а затем используются в качестве исходных данных для калибровки теплотехнических расчетов. Авторам известны неоднократные случаи фальсификаций результатов температурных наблюдений на объекте с оттаивающими грунтами, оснащенном системой термостабилизации. После установки термостабилизаторов в непосредственной близости от термоскважины (на расстоянии менее 1 м) сотрудники службы мониторинга еще в течение двух лет ежемесячно присылали данные измерений, которые не подтверждали охлаждение грунтов. Хотя они же в зимний период выполняли тепловизионную съемку тех же термостабилизаторов, которая подтверждала их работоспособность.

Еще одной проблемой является лишь формальное приобретение изыскательскими компаниями нового оборудования для соответствия требованиям конкурса. Например, авторы как-то столкнулись со следующим. Одна из компаний предоставила заказчику документы о наличии оборудования для лазерного сканирования, необходимость которого была прописана в техническом задании, и выиграла открытый конкурс. Но потом она достаточно долго пыталась убрать этот вид обследования зданий и сооружений из программы работ, заменив его на тахеометрическую съемку. Лишь после направ-

ления претензии с требованием выполнить именно лазерное сканирование данная компания наняла субподрядчика для проведения такого исследования. Получается, что в действительности у самой этой фирмы отсутствовало требуемое оборудование и соответствующие специалисты, несмотря на представленные документы.

КАК ОСТАТЬСЯ «В ПЛЮСЕ» В НОВОЙ РЕАЛЬНОСТИ ▶

Рентабельность инженерных изысканий в России обычно оценивается в пределах 10%. Например, в 2019 году эта оценка составляла 10–15% [22]. Результаты анализа финансовых показателей по ОКВЭД 71.12.15, взятые из открытых источников, показывают следующую динамику рентабельности и нормы чистой прибыли за 2021–2023 гг.: 10,5 и 5,9%; 12,1 и 7,0%; 9,4 и 5,6% соответственно [23]. В целом инженерные изыскания чувствуют себя несколько лучше, чем строительный сектор и многие другие отрасли в стране. Так, рентабельность строительной отрасли в I квартале 2025 года оценивалась в 3,9% [24], за период 2021–2023 гг. для строительства зданий (ОКВЭД 41) – в 3,3; 3,6; 4,0% соответственно, для строительства инженерных сооружений (ОКВЭД 42) – в 3,8; 3,9; 4,4% соответственно [23].

Таким образом, возникает вопрос: как, учитывая описанные выше проблемы (демпинг, дефляцию цен на изыскания, фальсификацию данных, отсутствие заинтересованности молодых специалистов в работе по профилю своего образования), удается поддерживать относительно высокую рентабельность инженерных изысканий, особенно по отношению к строительству? Мы видим, к сожалению, несколько факторов, которые могут объяснить эту ситуацию.

Во-первых, это фальсификация результатов полевых и лабораторных работ. Придумывание данных позволяет компаниям увеличивать свою прибыль, так как при таком подходе практически полностью отсутствуют производственные расходы, за исключением затрат на оплату труда составителей отчетов.

Второй фактор – это формальное трудоустройство специалистов сразу в нескольких организациях, широкое распространение «фриланса», «серые» зарплаты. Данный подход позволяет значительно оптимизировать зарплатный фонд, сэкономить на обязательных выплатах (пенсионных и других страховых взносах, НДФЛ). В то же время этот

подход снижает ответственность специалистов-исполнителей.

И в-третьих, это отсутствие обновления техники и оборудования, в первую очередь для бурения. Анализ объявлений о перепродаже на платформе «Авито» (которых было около 1000 по данным на ноябрь 2025 года) показал, что около 60% предложенного составляли советские и российские буровые установки средним возрастом 20–25 лет. Встречались и объявления о продаже установок 1970–1980-х годов выпуска (например, УГБ-1ВС на шасси ЗИЛ производства 1976 года). В целом 85% предложений приходилось на технику, бывшую в употреблении. Еще не менее чем в 10% объявлений было указано, что техника прошла капитальный ремонт.

В то же время поддерживать высокую рентабельность позволяет и использование таких добросовестных практик, как:

- активное внедрение нового оборудования, в первую очередь геодезического (лидаров, электронных нивелиров, тахеометров, БПЛА) и лабораторного;
- цифровизация отрасли: внедрение искусственного интеллекта для автоматизации рутинных операций, использование нового программного обеспечения для обработки данных, особенно их больших массивов, и для геотехнических расчетов.

Надо понимать, что в условиях уже достаточно длительного периода высокой ключевой ставки Центрального банка, ограниченного доступа к западным технологиям и инвестициям, стагнации строительного рынка (например, в связи с фактическим сужением возможностей использования льготной семейной ипотеки и с прекращением действия общей программы льготного кредитования) рентабельность инженерных изысканий будет снижаться вслед за ухудшением положения в строительной отрасли в целом. При этом усиление контроля функционирования отрасли со стороны государства будет уменьшать количество маргинальных практик, позволяющих обеспечивать недобросовестным компаниям высокую рентабельность. Так, налоговые службы с помощью банков уже сейчас следят за происхождением и оборотом денежных средств на счетах граждан, тем самым сокращая возможности для «серого» трудоустройства. Кроме того, в последнее время был возбужден ряд уголовных дел в связи с недобросовестным выполнением инженерных изысканий. Например, в 2023 году было открыто

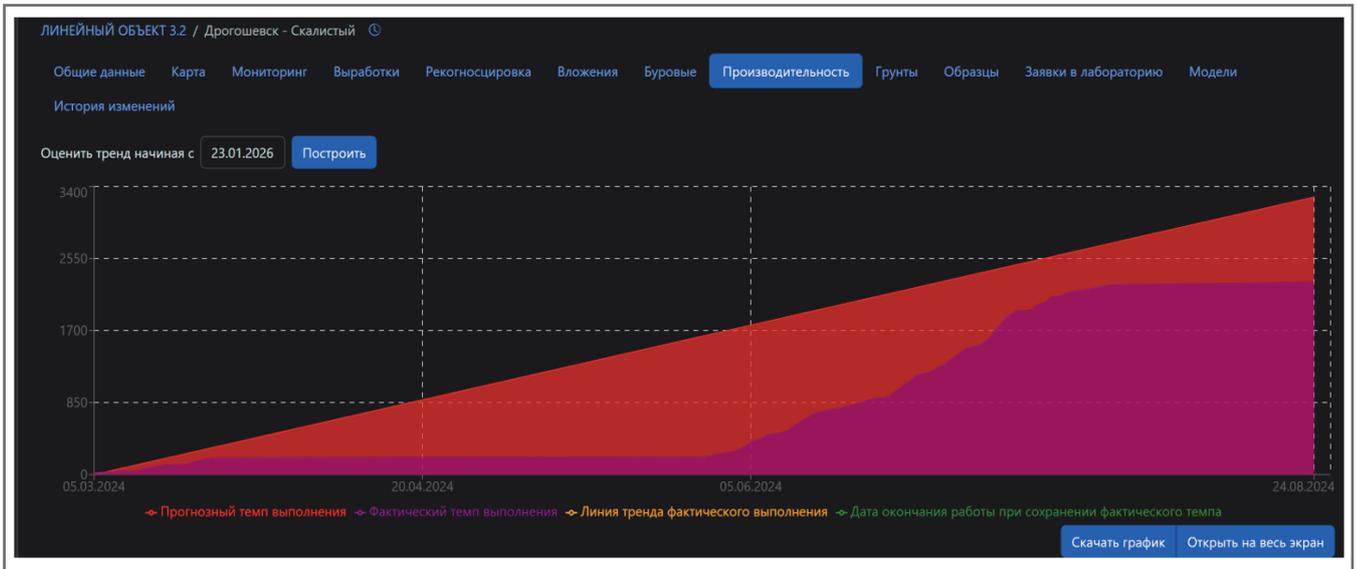


Рис. 2. Пример результатов анализа фактического выполнения плановых объемов бурения на объекте, выполненного в программном комплексе WebGeo ERP

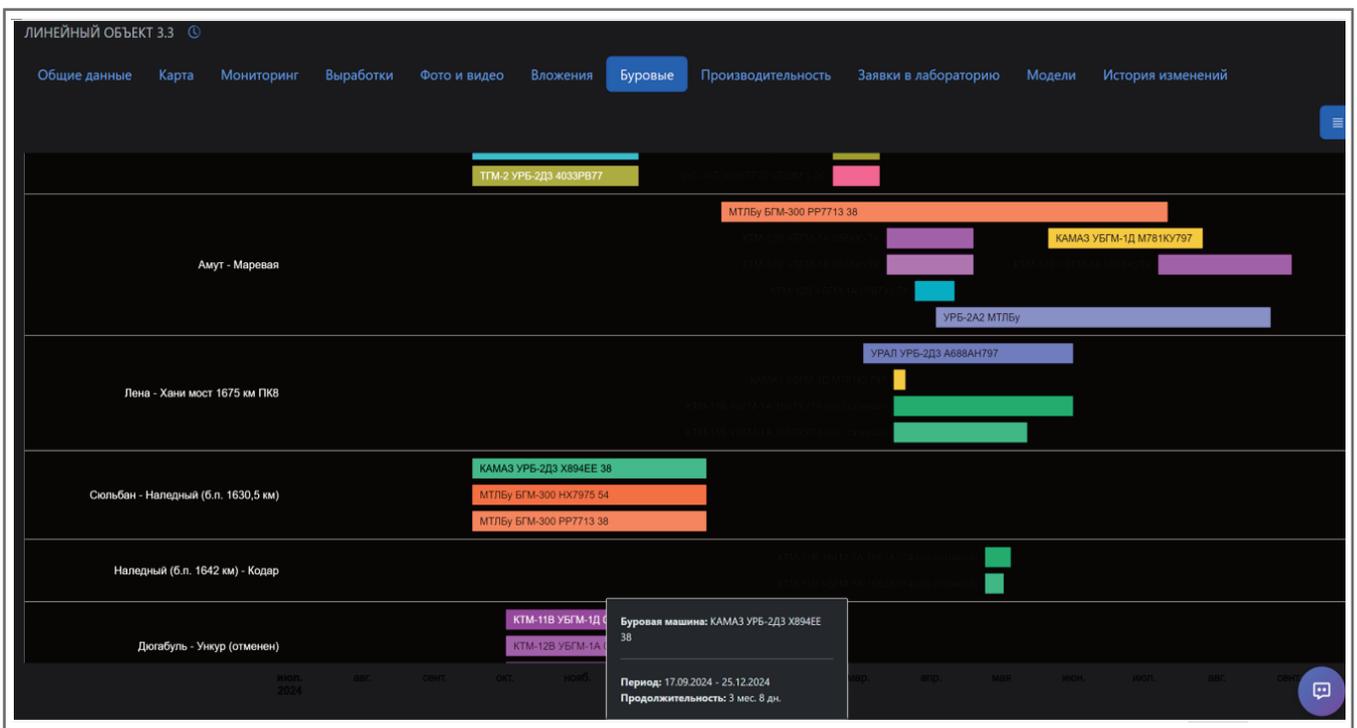


Рис. 3. Пример календарного графика загрузки буровых машин на объекте, составленного в программном комплексе WebGeo ERP

уголовное дело по факту мошенничества при реконструкции аэропорта в г. Архангельске [25], в 2024 году – дело о фальсификации результатов инженерно-геологических изысканий при строительстве метро в г. Красноярске [26]. И это примеры только самых громких историй, отраженных в прессе.

Таким образом, чтобы остаться «в плюсе» в условиях уменьшающейся рентабельности, сокращения рынка и ужесточения контроля, необходимо вспомнить цитату шведского экономиста и нобелевского лауреата Гуннара

Мюрдаля: «Единственный способ снизить затраты – это управлять каждым этапом работ с точностью до сантиметра и до цента». Для инженерных изысканий это означает:

- заказчики и руководители изыскательских компаний не должны позволять себя обманывать на стадиях полевых работ, лабораторных исследований, обработки результатов и составления отчетов;
- руководители и владельцы изыскательских компаний должны четко осознавать, какие работы, объекты, специа-

листы приносят прибыль, а какие – убыток (при этом необходимо видеть картину как в деталях, например до каждой скважины, так и в целом, понимая, что, к примеру, отдельные скважины на объекте могут быть убыточными, но в целом объект останется прибыльным);

- необходимо ускорить обработку получаемых полевых материалов, улучшить взаимодействие специалистов в рамках самих изысканий (полевые работы – лабораторные исследования – камеральная обработка), а также между изыскателями, проектировщиками,

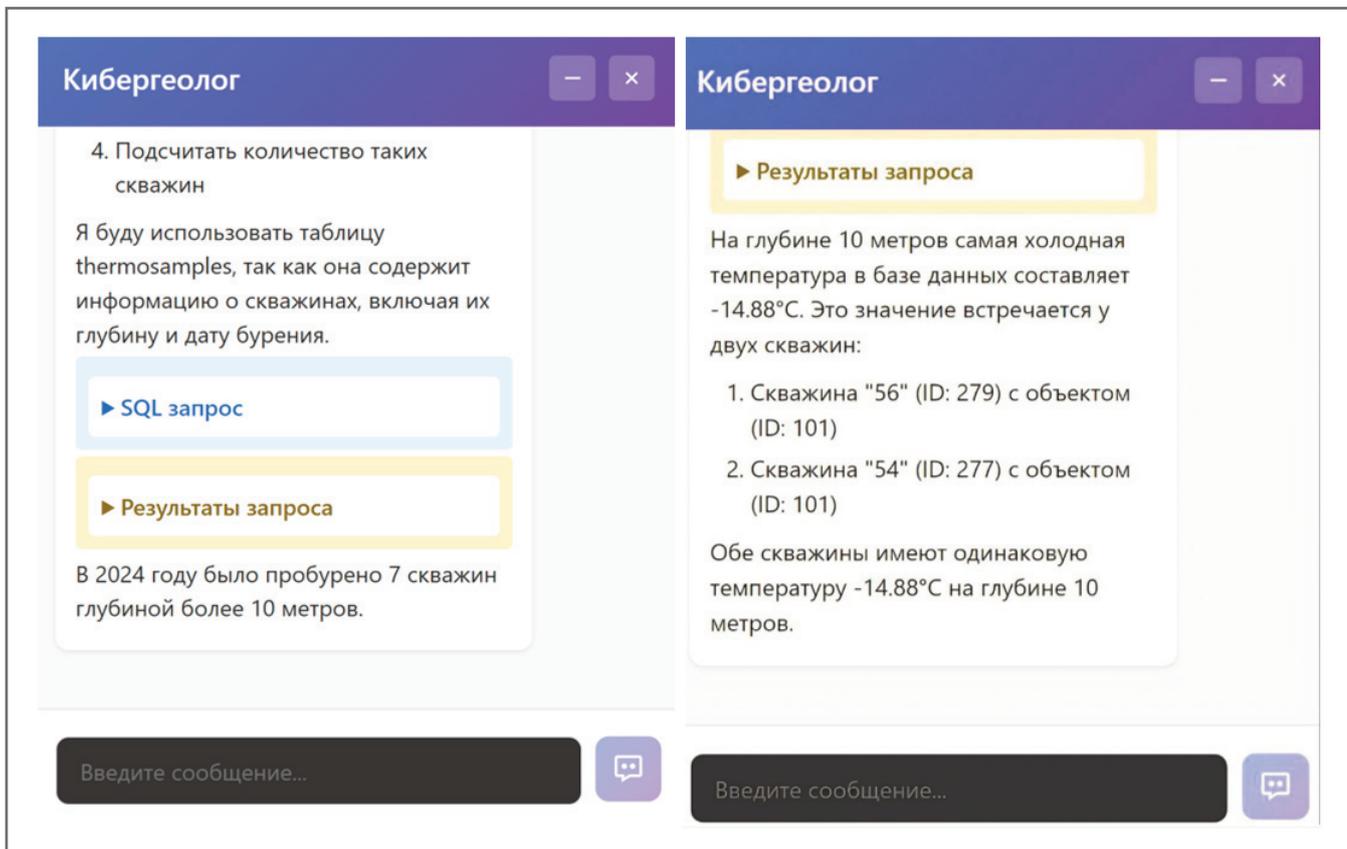


Рис. 4. Примеры формирования запросов и анализа базы данных с помощью искусственного интеллекта, выполненных в программном комплексе WebGeo ERP

строителями и заказчиком: уже при заполнении полевого журнала надо понимать, сколько образцов из какого геологического элемента отобрано, какие нужны испытания и какую лабораторию следует в этом задействовать, соответствуют ли образцы нормативным требованиям; следует осознавать также то, что обработка полевых материалов с применением технологий искусственного интеллекта позволяет параллельно с изысканиями начинать выполнять проектирование и геотехнические расчеты;

- необходимо постоянно выполнять систематизацию и анализ результатов уже выполненных работ на объектах-аналогах, чтобы использовать успешный опыт предшественников, из которого можно извлечь многое – вплоть до понимания того, какие буровые установки и какие буровые бригады

лучше или хуже работают на определенных грунтовых основаниях (наличие таких знаний и цифрового архива создаст огромное конкурентное преимущество).

Тот, кто будет использовать указанные подходы в своей работе, сможет оставаться рентабельным на рынке инженерных изысканий в будущем при сохранении хорошей репутации. По нашему мнению, на рынке сейчас представлен только один инструмент, в полной мере соответствующий данным подходам, – программный комплекс WebGeo ERP, предназначенный для управления бизнес-процессами и планирования ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning, ERP) в инженерных изысканиях. Он включает в себя целый набор инструментов, которые позволяют:

- проверять полевые материалы на предмет фальсификаций;

- обрабатывать полевые материалы с помощью искусственного интеллекта сразу после загрузки;
- формировать исполнительные сметы полевых и лабораторных работ по фактическому выполнению, сравнивать их с планируемыми затратами;
- анализировать ход выполнения буровых работ на объекте с точностью до буровой машины (рис. 2, 3);
- контролировать отбор образцов, лабораторные работы;
- экспортировать результаты в наиболее распространенные геотехнические программы, создавать трехмерные геологические модели для дальнейших геотехнических расчетов;
- вести цифровой архив изыскательских работ, выполнять постоянный анализ материалов этого архива с применением искусственного интеллекта (рис. 4). 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ►

1. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС): государственная статистика [сайт]. URL: <https://www.fedstat.ru/> (дата обращения: 25.11.2025).
2. Официальный сайт ООО «Гео Плюс Проект». URL: <https://geoplus.ru/service/geologicheskie-izyskaniya/#price> (дата обращения: 25.11.2025).
3. Тучкова Н.В. Какова базовая цена инженерных изысканий? // Официальный сайт ООО «ГеоКомпани». 2025. 12 июля. URL: <https://geocompani.ru/blog/kakova-bazovaya-czena-inzhenernyx-izyiskaniy/>.

4. Стоимость проведения инженерных изысканий // Официальный сайт ООО «НЭП» (ООО «Независимое Экспертное Партнерство»). URL: <https://www.nep.expert/inzhenernye-izyskaniya/stoimost-inzhenernykh-izyskaniy/> (дата обращения: 25.11.2025).
5. Инженерные изыскания 2020–2030. История, современность и перспективы: аналитическая записка // ГеоИнфо. 2019. 7 октября. URL: geoinfo.ru/products-pdf/inzhenernye-izyskaniya-2020-2030-istoriya-sovremennost-i-perspektivy-analiticheskaya-zapiska.pdf?ysclid=mhxur87gew344224709.
6. Кияев А. Демпинг в инженерных изысканиях: как подрывается безопасность строительства ради мнимой экономии // vc.ru: бизнес-платформа. 2025. 21 июня. URL: <https://vc.ru/invest/2055443-demping-v-inzhenernykh-izyskaniyakh>.
7. Никонов А.В. Особенности проведения закупок для определения исполнителя инженерно-геодезических работ // Геодезия и картография. 2020. № 1. С. 56–64. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-955-1-56-64. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-provedeniya-zakupok-dlya-opredeleniya-ispolnitelya-inzhenerno-geodezicheskikh-rabot>.
8. Есюнин О.Л. Инженерные изыскания за половину цены – преступление // ГеоИнфо. 2018. 27 апреля. URL: <https://geoinfo.ru/product/esyunin-oleg-leonidovich/inzhenernye-izyskaniya-za-polovinu-ceny-prestuplenie-37402.shtml>.
9. Архангельский И.В. О фальсификации результатов бурения скважин при инженерно-геологических изысканиях и путях ее устранения // ГеоИнфо. 2021. 5 апреля. URL: <https://geoinfo.ru/product/arhangel'skij-igor-vsevolodovich/o-falsifikacii-rezultatov-bureniya-skvazhin-pri-inzhenerno-geologicheskikh-izyskaniyah-i-putyah-ee-ustraneniya-44420.shtml>.
10. Могильный К. Необходимо полностью менять подходы к выполнению инженерных изысканий // ГеоИнфо. 2022. 30 июня. URL: <https://geoinfo.ru/product/mogilnyj-konstantin/konstantin-mogilnyj-neobhodimo-polnostyu-menyat-podhody-k-vypolneniyu-izyskaniy-47202.shtml>.
11. Высшее образование. Форма № ВПО-1 «Сведения об организации, осуществляющей образовательную деятельность по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры». Сведения за 2024 год // Официальный сайт Минобрнауки России. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/action/stat/highed/>.
12. Зотов А. Мечты и реальность: сколько зарабатывают выпускники вузов // Финансы Mail [сайт]. 2025. 7 июля. URL: <https://finance.mail.ru/article/mechty-i-realnost-kak-i-skolko-sejchas-zarabatyvayut-vypuskniki-rossijskikh-vuzov-i-66894949/>.
13. Зарплаты выпускников-айтишников лидера рейтинга вузов превысили 300 тыс. руб. // РБК [сайт]. 2025. 9 июня. URL: <https://www.rbc.ru/society/09/06/2025/6842e28d9a7947b2ca8a2f2a>.
14. Руднева Е. Что такое средний класс // Сайт ООО «Информационное агентство «Банки.ру». 2025. 31 июля. URL: https://www.banki.ru/wikibank/srednij_klass/.
15. Национальный реестр специалистов (НРС) [раздел сайта] // Реестр СРО: информационно-консультационный портал саморегулируемых организаций. URL: <https://www.reestr-sro.ru/nrs/> (дата обращения: 27.11.2025).
16. Анализ текущего состояния инженерных изысканий в Российской Федерации. Первая редакция проекта дорожной карты развития инженерных изысканий в Российской Федерации до 2030 года с прогнозом до 2035 года. М.: Национальное объединение изыскателей и проектировщиков (НОПРИЗ), 2025. URL: https://www.nopriz.ru/upload/iblock/7ba/q85ydnkpnkx4xcemgyvk4ayqpcs2mhk/Analiz-II-i-DK-razvitiya_-ver-1.0.pdf.
17. Федосеев Ю.Е. Современные проблемы кадрового и нормативного обеспечения топографической деятельности в составе инженерно-геодезических экспедиций // Инженерные изыскания. 2017. № 4. С. 20–26.
18. Хасиятуллин А. Как дроны показывают высший беспилотаж в изысканиях // ГеоИнфо. 2022. 13 июля. URL: <https://geoinfo.ru/product/hasiyatullin-artur/kak-drony-pokazyvayut-vyshshij-bespilotazh-v-izyskaniyah-47272.shtml>.
19. На форуме «Земли России» рассказали о цифровизации подземных пространств // РБК [сайт]. 2025. 22 сентября. URL: <https://www.rbc.ru/industries/news/68cd3f3c9a794731ef4471cf>.
20. Ракитина Н.М., Жидков Р.Ю. Цифровизация данных инженерно-геологических изысканий. Взгляд изнутри // ГеоИнфо. 2025. 16 января. URL: <https://geoinfo.ru/product/zhidkov-roman-yurevich/cifrovizaciya-dannyh-inzhenerno-geologicheskikh-izyskaniy-vzglyad-iznutri-54679.shtml>.
21. Дьяченко Л. Дроны могут ускорить работу изыскателей в 200 раз: почему они массово не используются и что для этого необходимо // ГеоИнфо. 2023. № 2. С. 52–55. URL: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://geoinfo.ru/files/vypusk-2-2023.pdf>.
22. Ананко В.Н. Не только коррупция. Почему строительство в России дорогое и недолговечное // ГеоИнфо. 2019. 11 декабря. URL: <https://geoinfo.ru/product/ananko-viktor-nikolaevich/ne-tolko-korrupciya-pochemu-stroitelstvo-v-rossii-dorogoe-i-nedolgovечноe-41846.shtml>.
23. Сравнение финансового состояния фирмы с отраслевыми показателями и конкурентами [сервис анализа финансовой отчетности] // ТестФирм: аналитический проект Audit-it.ru. URL: www.testfirm.ru (дата обращения: 28.11.2025).
24. Уконе А. Рентабельность в строительстве снизилась до 3,9% в 2025 году // Движение.ру: медиаплатформа для девелоперов. 2025. 15 мая. URL: <https://dvizhenie.ru/media/3469/rentabelnost-v-stroitelstve-sokratilas-do-39-v-2025-godu>.
25. В Архангельске возбуждено уголовное дело по факту мошенничества при реализации государственного контракта на реконструкцию аэропортового комплекса // Официальный сайт Западного межрегионального следственного управления на транспорте Следственного комитета Российской Федерации. 2023. 18 августа. URL: <https://zmsut.sledcom.ru/news/item/1817909/>.

26. В Красноярске вынесен обвинительный приговор по уголовному делу о взяточничестве и превышении должностных полномочий при строительстве метрополитена // Официальный сайт Следственного комитета Российской Федерации. 2025. 4 марта. URL: <https://sledcom.ru/news/item/1959084/?type=news®ion=34>.

REFERENCES ►

1. Edinaya mezhdovomstvennaya informatsionno-statisticheskaya sistema (EMISS): gosudarstvennaya statistika (sait) [Unified Interagency Information and Statistical System (EMISS): State Statistics (website)]. URL: <https://www.fedstat.ru/> (data obrashcheniya: 25.11.2025) (in Rus.).
2. Ofitsial'nyy sait OOO "Geo Plyus Proekt" [Official website of Geo Plyus Proekt LLC]. URL: <https://geoplus.ru/service/geologicheskie-izyskaniya/#price> (data obrashcheniya: 25.11.2025) (in Rus.).
3. Tuchkova N.V. Kakova bazovaya tsena inzhenernykh izyskaniy? [What is the base cost of engineering surveys?] // Ofitsial'nyy sayt OOO "GeoKompani". 2025. 12 iyulya. URL: <https://geocompani.ru/blog/kakova-bazovaya-czena-inzhenernykh-izyskaniy/> (in Rus.).
4. Stoimost' provedeniya inzhenernykh izyskaniy [Cost of site investigations (engineering surveys)] // Ofitsial'nyy sayt OOO "NEP" (OOO "Nezavisimoye Ekspertnoye Partnerstvo"). URL: <https://www.nep.expert/inzhenernye-izyskaniya/stoimost-inzhenernykh-izyskaniy/> (data obrashcheniya: 25.11.2025) (in Rus.).
5. Inzhenernye izyskaniya 2020–2030. Istoriya, sovremennost' i perspektivy: analiticheskaya zapiska [Engineering surveys 2020–2030: history, present state and prospects: analytical report] // GeoInfo. 2019. 7 oktyabrya. URL: geoinfo.ru/products-pdf/inzhenernye-izyskaniya-2020-2030-istoriya-sovremennost-i-perspektivy-analiticheskaya-zapiska.pdf?ysclid=mhxur87gew344224709 (in Rus.).
6. Kiyayev A. Demping v inzhenernykh izyskaniyakh: kak podryvayetsya bezopasnost' stroitel'stva radi mnimoy ekonomii [Dumping in site investigations (engineering surveys): how construction safety is undermined for imaginary savings] // vc.ru: biznes-platforma. 2025. 21 iyunya. URL: <https://vc.ru/invest/2055443-demping-v-inzhenernykh-izyskaniyakh> (in Rus.).
7. Nikonov A.V. Osobennosti provedeniya zakupok dlya opredeleniya ispolnitelya inzhenerno-geodezicheskikh rabot [Features of procurement procedures for selecting contractors for engineering-geodetic work] // Geodeziya i kartografiya. 2020. № 1. S. 56–64. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-provedeniya-zakupok-dlya-opredeleniya-ispolnitelya-inzhenerno-geodezicheskikh-rabot> (in Rus.).
8. Esyunin O.L. Inzhenernye izyskaniya za polovinu tseny – prestupleniye [Site investigation (engineering survey) for half the price is a crime] // GeoInfo. 2018. 27 aprelya. URL: <https://geoinfo.ru/product/esyunin-oleg-leonidovich/inzhenernye-izyskaniya-za-polovinu-ceny-prestuplenie-37402.shtml> (in Rus.).
9. Arkhangel'skiy I.V. O fal'sifikatsii rezul'tatov bureniya skvazhin pri inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh i putyakh yeye ustraneniya [On falsification of borehole drilling results in engineering-geological investigations (surveys) and ways of its elimination] // GeoInfo. 2021. 5 aprelya. URL: <https://geoinfo.ru/product/arhangel'skiy-igor-vsevolodovich/o-falsifikatsii-rezultatov-bureniya-skvazhin-pri-inzhenerno-geologicheskikh-izyskaniyah-i-putyah-ee-ustraneniya-44420.shtml> (in Rus.).
10. Mogil'nyi K. Neobkhodimo polnost'yu menyat' podkhody k vypolneniyu inzhenernykh izyskaniy [It is necessary to completely change approaches to site investigations (engineering surveys)] // GeoInfo. 2022. 30 iyunya. URL: <https://geoinfo.ru/product/mogilnyj-konstantin/konstantin-mogilnyj-neobhodimo-polnostyu-menyat-podhody-k-vypolneniyu-izyskaniy-47202.shtml> (in Rus.).
11. Vyssheye obrazovaniye. Forma № VPO-1 "Svedeniya ob organizatsii, osushchestvlyayushchey obrazovatel'nyuy deyatel'nost' po obrazovatel'nyy programmam vysshego obrazovaniya – programmam bakalavriata, programmam spetsialiteta, programmam magistratury". Svedeniya za 2024 god [Higher education. Form № VPO-1 (HPE-1) "Information on an organization carrying out educational activities under higher education programs – bachelor programs, specialist programs, and master programs". Data for 2024] // Ofitsial'nyy sait Minobrnauki Rossii. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/action/stat/highed/> (in Rus.).
12. Zotov A. Mechty i real'nost': skol'ko zarabatyvayut vypuskniki vuzov [Dreams and reality: how much university graduates earn] // Finansy Mail [sait]. 2025. 7 iyulya. URL: <https://finance.mail.ru/article/mechty-i-realnost-kak-i-skolko-sejchas-zarabatyvayut-vypuskniki-rossijskih-vuzov-i-66894949/> (in Rus.).
13. Zarplaty vypusknikov-aytishnikov lidera reytinga vuzov prevysili 300 tys. rub. [Salaries of IT graduates of the top-ranked university have exceeded 300 thousand rubles] // RBK [sait]. 2025. 9 iyunya. URL: <https://www.rbc.ru/society/09/06/2025/6842e28d9a7947b2ca8a2f2a> (in Rus.).
14. Rudneva E. Chto takoye sredniy klass [What Is the Middle Class] // Sait OOO "Informatsionnoe agentstvo "Banki.ru". 2025. 31 iyulya. URL: https://www.banki.ru/wikibank/srednij_klass/ (in Rus.).
15. Natsional'nyy reyestr spetsialistov (NRS) [National Register of Specialists (NRS)] // Reestr SRO: informatsionno-konsul'tatsionny portal samoreguliruemyykh organizatsii. URL: <https://www.reestr-sro.ru/nrs/> (data obrashcheniya: 27.11.2025) (in Rus.).
16. Analiz tekushchego sostoyaniya inzhenernykh izyskaniy v Rossiyskoy Federatsii. Pervaya redaktsiya proekta dorozhnoi karty razvitiya inzhenernykh izyskaniy v Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom do 2035 goda. [Analysis of the current state of site investigations (engineering surveys) in the Russian Federation. The first draft of the roadmap for the development of engineering surveys in the russian federation until 2030 with a forecast up to 2035]. M.: Natsional'noye ob'yedineniye izyskateley i proyektirovshchikov (NOPRIZ), 2025. URL: https://www.nopriz.ru/upload/iblock/7ba/q85ydnkpuknx4xcemgyvk4ayqpcs2mhhk/Analiz-II-i-DK-razvitiya_-ver-1.0.pdf (in Rus.).



17. Fedoseyev Yu.E. Sovremennyye problemy kadrovogo i normativnogo obespecheniya topograficheskoy deyatelnosti v sostave inzhenerno-geodezicheskikh ekspeditsiy [Modern problems of staffing and regulatory support of topographic activities in engineering-geodetic expeditions] // Inzhenernye izyskaniya. 2017. № 4. S. 20–26 (in Rus.).
18. Khasiyatullin A. Kak drony pokazyvayut vysshij bespilotazh v izyskaniyakh [How drones demonstrate advanced capabilities in surveys] // GeoInfo. 2022. 13 iyulya. URL: <https://geoinfo.ru/product/hasiyatullin-artur/kak-drony-pokazyvayut-vysshij-bespilotazh-v-izyskaniyah-47272.shtml> (in Rus.).
19. Na forumе "Zemli Rossii" rasskazali o tsifrovizatsii podzemnykh prostranstv [Digitalization of underground space was discussed at the "lands of russia" forum] // RBK [sait]. 2025. 22 sentyabrya. URL: <https://www.rbc.ru/industries/news/68cd3f3c9a794731ef4471cf> (in Rus.).
20. Rakitina N.M., Zhidkov R.Yu. Tsifrovizatsiya dannykh inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy. Vzglyad iznutri [Digitalization of engineering-geological investigation (survey) data: an inside view] // GeoInfo. 2025. 16 yanvarya. URL: <https://geoinfo.ru/product/zhidkov-roman-yurevich/cifrovizatsiya-dannyh-inzhenerno-geologicheskikh-izyskaniy-vzglyad-iznutri-54679.shtml> (in Rus.).
21. Dyachenko L. Drony mogut uskorit' rabotu izyskateley v 200 raz: pochemu oni massovo ne ispol'zuyutsya i chto dlya etogo neobkhodimo [Drones can accelerate surveyors' work by 200 times: why they are not widely used, and what is needed for their widespread use] // GeoInfo. 2023. № 2. P. 52–55. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://geoinfo.ru/files/vypusk-2-2023.pdf> (in Rus.).
22. Ananko V.N. Ne tol'ko korruptsiya. Pochemu stroitel'stvo v Rossii dorogoye i nedolgovechnoye [Not only corruption: why construction in Russia is expensive and short-lived] // GeoInfo. 2019. 11 dekabrya. URL: <https://geoinfo.ru/product/ananko-viktor-nikolaevich/ne-tolko-korruptsiya-pochemu-stroitel'stvo-v-rossii-dorogoe-i-nedolgovechnoe-41846.shtml> (in Rus.).
23. Sravneniye finansovogo sostoyaniya firmy s otraslevymi pokazatelyami i konkurentami [Comparison of the financial position of a company with industry indicators and competitors (Financial Statement Analysis Service)] // TestFirm: analiticheskiy proekt Audit-it.ru. URL: www.testfirm.ru (data obrashcheniya: 28.11.2025) (in Rus.).
24. Ukkone A. Rentabel'nost' v stroitel'stve snizilas' do 3,9% v 2025 godu [Construction profitability decreased to 3.9% in 2025] // Dvizhenie.ru: mediaplatforma dlya developerov. 2025. 15 maya. URL: <https://dvizhenie.ru/media/3469/rentabelnost-v-stroitel'stve-sokratilas-do-39-v-2025-godu> (in Rus.).
25. V Arkhangel'ske vozvuzhdeno ugovnoye delo po faktu moshennichestva pri realizatsii gosudarstvennogo kontrakta na rekonstruktsiyu aeroportovogo kompleksa [A criminal case has been initiated in Arkhangelsk over fraud in the execution of the government contract for the reconstruction of the airport complex] // Ofitsial'nyi sait Zapadnogo mezhregional'nogo sledstvennogo upravleniya na transporte Sledstvennogo komiteta Rossiiskoi Federatsii. 2023. 18 avgusta. URL: <https://zmsut.sledcom.ru/news/item/1817909/> (in Rus.).
26. V Krasnoyarske vnesen obvinitel'nyy prigovor po ugovnomu delu o vzyatochnichestve i prevyshenii dolzhnostnykh polnomochiy pri stroitel'stve metropolitena [In Krasnoyarsk, a guilty verdict was issued in a criminal case concerning bribery and abuse of official authority during the construction of the metro] // Ofitsial'nyi sait Sledstvennogo komiteta Rossiiskoi Federatsii. 2025. 4 marta. URL: <https://sledcom.ru/news/item/1959084/?type=news®ion=34> (in Rus.).



Telegram-канал журнала

ГеоИнфо

Независимый электронный журнал

- **Новости**
- **Статьи**
- **Обсуждения**

<https://t.me/geoinfonews>

Организаторы:

Независимый электронный журнал
Геоинфо

К ДЕСЯТИЛЕТИЮ ЖУРНАЛА «ГЕОИНФО»
ОТМЕТИМ В ХОРОШЕЙ
КОМПАНИИ!

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА В ОБЛАСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ
ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, ГЕОТЕХНИКИ,
МОНИТОРИНГА И ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ТЕРРИТОРИИ

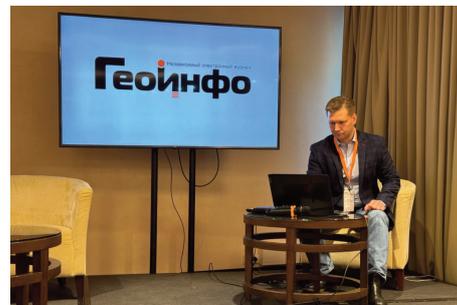
Геоинфо EXPO
2026

1000+ посетителей

30+ экспонентов

40+ мероприятий деловой программы

150+ докладов



Посещение выставки и всех мероприятий
деловой программы бесплатное

15-16 апреля 2026 года

Москва, Звезды Арбата 5*, Новый Арбат, 32



ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛНИТЕЛЕЙ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ В ЧАСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

Поступила в редакцию: 10.12.2025

Принята к публикации 30.12.2025

Опубликована 30.01.2026

БЕЛЯЕВ П.Ю.

Ведущий инженер испытательного центра АО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект» (АО «Проектный институт и научно-исследовательский институт воздушного транспорта Ленаэропроект»), к.т.н., г. Санкт-Петербург, Россия
Belyaev_PYu@lenair.ru

СЕЛЮТИН А.С.

Ведущий инженер испытательного центра АО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект», г. Санкт-Петербург, Россия
Selyutin_AS@lenair.ru

БАЛАШОВА Н.Г.

Инженер 1-й категории АО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект», г. Санкт-Петербург, Россия
Balashova_NG@lenair.ru

ХАРЬКОВ Н.С.

Заместитель генерального директора по науке АО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект», к.т.н., г. Санкт-Петербург, Россия
Kharkov_NS@lenair.ru

ЕФИМЕНКО М.Н.

Руководитель испытательного центра АО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект», канд. воен. наук, г. Санкт-Петербург, Россия
Efimenko_MN@lenair.ru

ПАЩЕНКО Ф.А.

Генеральный директор АО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект», к.т.н., член-корреспондент РАЕН, г. Санкт-Петербург, Россия
Pashchenko_FA@lenair.ru

АННОТАЦИЯ

Инженерно-геологические изыскания (ИГИ) являются очень важным источником исходных данных для принятия проектных решений. На основании результатов изысканий проектировщик получает информацию об инженерно-геологических условиях площадки строительства, прежде всего о строении ее грунтового основания, свойствах слагающих ее грунтов, наличии или отсутствии опасных инженерно-геологических процессов, а также другие сведения, необходимые для принятия проектных решений.

В комплексе ИГИ в качестве источника количественных исходных данных для геотехнических расчетов особо стоит выделить полевые и лабораторные испытания грунтов. В отношении классификации грунта и определения его характеристик «последнее слово», как правило, остается за лабораторными испытаниями.

Достаточно частой на текущий момент проблемой в инженерной практике является некачественное выполнение ИГИ для строительства, вследствие чего проектировщик получает недостаточные или

недостовверные исходные данные. Основными причинами снижения качества изысканий являются стремление к экономии средств, некомпетентность исполнителя и изначально нереалистично сжатые сроки выполнения ИГИ при малых производственных мощностях. Для экономии средств и выполнения изысканий в срок зачастую используют сомнительные методы оптимизации труда, основанные на «карандашном» бурении или «нарисованных» результатах испытаний. Последствиями некачественных ИГИ могут быть увеличение стоимости строительных работ или снижение устойчивости зданий и сооружений из-за негативного влияния геологической среды.

Лабораторные испытания являются основным и наиболее распространенным источником качественных данных по физико-механическим свойствам грунтов. Поэтому авторы на основе анализа нормативной документации и личного опыта разработали алгоритм предварительной оценки соответствия потенциального исполнителя ИГИ критериям выбора в части лабораторных исследований образцов. Этот алгоритм и представлен в данной статье. Также рассмотрены ключевые аспекты взаимодействия заказчика с лабораторией в процессе выполнения работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

инженерно-геологические изыскания; грунтоведение; лабораторные исследования грунтов; физико-механические свойства; контроль качества; надежность исполнителей; предварительная оценка исполнителя.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Беляев П.Ю., Селютин А.С., Балашова Н.Г., Харьков Н.С., Ефименко М.Н., Пащенко Ф.А. Предварительная оценка исполнителей инженерно-геологических изысканий в части определения физико-механических свойств грунтов // Геоинфо. 2025. Т. 7. № 4. С. 44–50. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-44-50.

PRELIMINARY ASSESSMENT OF SITE INVESTIGATION CONTRACTORS WITH REGARD TO THE DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SOILS AND ROCKS

Received: 10.12.2025

Accepted for publication 30.12.2025

Published 30.01.2026

BELYAEV P.Yu.

PhD (Geography), lead engineer at the Test Centre, Design and Research Institute of Air Transport "Lenaeroproject", St. Petersburg, Russian Federation
Belyaev_PYu@lenair.ru

SELYUTIN A.S.

Lead engineer at the Test Centre, Design and Research Institute of Air Transport "Lenaeroproject", St. Petersburg, Russian Federation
Selyutin_AS@lenair.ru

BALASHOVA N.G.

First rank engineer at the Test Centre, Design and Research Institute of Air "Lenaeroproject", JSC, St. Petersburg, Russian Federation
Balashova_NG@lenair.ru

KHARKOV N.S.

PhD (Engineering Sciences), deputy director general for science of the Design and Research Institute of Air Transport "Lenaeroproject", JSC, St. Petersburg, Russian Federation
Kharkov_NS@lenair.ru

EFIMENKO M.N.

PhD (Military Sciences), head of the Test Centre, Design and Research Institute of Air Transport "Lenaeroproject", JSC, St. Petersburg, Russian Federation
Efimenko_MN@lenair.ru

PASHCHENKO F.A.

PhD (Engineering Sciences), general director of the Design and Research Institute of Air Transport "Lenaeroproject", JSC, St. Petersburg, Russian Federation
Pashchenko_FA@lenair.ru

ABSTRACT

Site investigation (engineering-geological survey) is a very important source of initial data for making design decisions. Based on the investigation data, designers obtain information on the engineering-geological conditions of a construction site, primarily on the structure of its ground base, the properties of the constituent soils and rocks, hazardous engineering-geological processes, as well as other data necessary for making design decisions.

As a source of quantitative initial data for geotechnical calculations, field and laboratory testing of soils and rocks should be emphasized within the framework of site investigations. For soil and rock classification and property determination, the "final word" usually belongs to laboratory testing.



In modern engineering practice, a common problem is the poor quality of site investigations for construction, resulting in designers receiving insufficient or unreliable initial data. The main reasons for the decline in the investigation quality are cost-cutting, incompetence of contractors, and tight deadlines for site investigations combined with limited instrumentation. To save money and complete investigations on time, questionable labor optimization methods are often used on the basis of fabricated drilling or test results. Poor quality investigations can lead to increased construction costs or decreased stability of buildings and structures caused by the negative impact of the geological environment.

Laboratory testing is the primary and most common source of qualitative data on physical and mechanical properties of soils and rocks. So, based on an analysis of regulatory documents and personal experience, the authors have developed an algorithm for a preliminary assessment of the compliance of a potential site investigation contractor with selection criteria regarding laboratory testing of samples. This algorithm is presented in the current article. Some key aspects of the customer-laboratory interaction during the testing are also discussed.

KEYWORDS:

site investigation; soil and rock science; laboratory testing of soils and rocks; physical and mechanical properties; quality control; reliability of contractors; preliminary assessment of a contractor.

FOR CITATION:

Belyaev P.Yu., Selyutin A.S., Balashova N.G., Kharkov N.S., Efimenko M.N., Pashchenko F.A. *Predvaritel'naya otsenka ispolnitelei inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy v chasti opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov [Preliminary assessment of site investigation contractors with regard to the determination of physical and mechanical properties of soils and rocks]* // *GeoInfo*. 2025. T. 7. № 4. S. 44–50. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-44-50 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

Инженерно-геологические изыскания (ИГИ) являются значимой подосновой для проектирования. На основании их результатов проектировщик получает данные о взаимодействии грунтового основания и фундамента, впоследствии принимая решение о виде фундамента, особенностях проектирования здания или сооружения, инженерной защите территории и т.д. Вместе с тем недостоверные или же недостаточные изыскания ведут как к увеличению стоимости строительства в случае перестройки со стороны проектировщиков, так и к нарушению целостности зданий и сооружений в результате недостатка принятых при строительстве мер по подготовке основания. Таким образом, качественные инженерно-геологические изыскания помогают соблюдать баланс между оптимизацией расходов на строительство и безопасной эксплуатацией зданий и сооружений.

Из-за того что в наше время изыскания для строительства зачастую выполняют подрядные организации, а практика проектных институтов, осуществляющих полный комплекс ИГИ, уходит в прошлое, исполнителя выбирают по результатам конкурсной процедуры. К сожалению, в текущей ситуации, диктуемой рынком, качество редко ставится в приоритет. По этой причине выбранными подрядчиками бывают те, кто предложил самую небольшую цену и указал наименьший срок выполнения работ. Снижение цены, как правило,

осуществляют за счет оптимизации работ по изысканиям. При этом оптимизацию зачастую реализуют через уменьшение количества испытаний и нарушение методик, а также фальсификацию результатов испытаний.

В части сроков исполнения существует похожая ситуация. Согласно ГОСТ 12071-2014 [1] максимально возможное время испытаний образца грунта составляет 1,5 месяца с момента бурения. Отсюда сразу можно отнять время транспортировки от буровой до лаборатории. Учитывая поправку на сжатые сроки выдачи отчета по изысканиям, на качество лабораторных испытаний начинает оказывать негативное влияние давление со стороны заказчика. Средство обеспечения приемлемых сроков зачастую то же самое, что и для снижения цены, – экономия на количестве испытаний и отступление от методики.

При этом для принятия качественных решений при проектировании необходимы достоверные исходные данные [2]. Отсюда возникает потребность в анализе возможностей и проверке производственных мощностей потенциального исполнителя инженерно-геологических изысканий. В данной статье рассмотрены рекомендации для проведения предварительной проверки исполнителя и анализа реалистичности заявленного им срока выполнения ИГИ. В статье сознательно не упоминаются метрологическая часть, документационное обеспечение и моменты, связанные с системой менеджмента ка-

чества предприятия, так как для заказчика они имеют лишь формальное подтверждение, а их внешний контроль не влияет на качество работ по конкретному проекту.

Наибольшую актуальность анализ результатов ИГИ с контролем качества будет иметь для районов со сложными инженерно-геологическими условиями согласно СП 47.13330.2016 [3], так как здесь наиболее высока вероятность негативного влияния геологической среды на здание или сооружение. Однако и в других районах возможно распространение специфических грунтов и локальных проявлений опасных геологических процессов. Предварительные сведения о наличии геологических процессов и специфических грунтов можно получить из СП 115.13330.2011 [4] и карты [5].

Последствия некачественных ИГИ весьма разнообразны, но в основном, как итог, они представляют собой увеличение затрат на строительство, или же разрушение зданий и сооружений в процессе эксплуатации. Отсюда возникает необходимость контроля качества изысканий. Несмотря на то что данная статья посвящена в основном проверке исполнителя ИГИ в части лабораторных испытаний, необходимо отметить, что нельзя оставлять без внимания и полевые изыскания, поскольку именно оттуда начинается получение данных о строении грунтового массива.

В статье предложена методика предварительной оценки сроков выполнения

лабораторией физико-механических испытаний грунтов на основе анализа ее приборной базы, состава и квалификации персонала. Соотнесение трудозатрат персонала с нормативным временем выполнения испытаний по методикам расчетов [6, 7] позволяет формализовать подход к оценке выработки грунтовой лаборатории, который ранее имел эмпирический характер.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ИСПОЛНИТЕЛЯ ▶

Изложенное выше говорит о потребности в разработке алгоритма проверки потенциального исполнителя инженерно-геологических изысканий.

Предлагаемый алгоритм включает ряд следующих шагов, неудовлетворительный результат на каждом из которых является основанием для того, чтобы усомниться в пригодности исполнителя для дальнейшего взаимодействия.

1. Узнать о репутации потенциального исполнителя среди других изыскательских и проектно-изыскательских компаний и организаций. Использовать ресурсы социальных сетей, тематические форумы и чаты в мессенджерах. Так как изыскательское сообщество в целом является достаточно открытым, эти данные являются доступными для заказчиков.

2. При получении коммерческого предложения следует сравнить заявленные сроки и цену с этими показателями у других потенциальных контрагентов. В случае значительной разницы запросить обоснование.

3. Обсудить с потенциальным исполнителем возможность присутствия супервайзера при полевых работах с целью обеспечения соответствия качества образцов критериям пригодности для лабораторных исследований [1].

4. Обсудить с потенциальным подрядчиком его готовность к тому, что будут проводиться параллельные лабораторные испытания и контрольное бурение.

5. Запросить сведения о штате потенциального исполнителя для дальнейшего использования этих данных при расчетах времени выполнения испытаний.

6. Запросить сведения о техническом оснащении лаборатории и состоянии ее помещений. Согласно РСН 51-84 [8] минимальный состав помещений лаборатории должен включать в себя: помещение для приемки и подготовки грунтов к исследованиям; хранилище образцов грунта; помещение для проведения испытаний. Приборная база лаборато-

рии должна быть достаточной для выполнения заданных испытаний согласно методикам ВСН и ГОСТ [9–13] либо иным нормативным документам, действующим на территории Российской Федерации. Состав и количество оборудования должны обеспечить выполнение заданного объема испытаний за время не более полутора месяцев [1]. Для каждого конкретного случая программа испытаний меняется в зависимости от проектируемого здания или сооружения и инженерно-геологических условий. Состав испытаний можно приблизительно определить согласно СП 446.1325800.2019 [14] после анализа архивных результатов изысканий или карты четвертичных образований для района ИГИ.

7. По результатам выполнения предыдущего шага определить минимально возможный срок выполнения лабораторных испытаний потенциальным подрядчиком (методика этого определения будет приведена в следующем разделе). Параллельно с этим запросить у потенциального исполнителя, за какое примерно время он берется выполнить заданное количество испытаний.

Если по результатам указанных выше действий получены удовлетворительные ответы, не вызывающие сомнений у проверяющего, этот подрядчик может быть выбран для дальнейшего взаимодействия.

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ▶

Авторами предложена методика расчета минимального времени выполнения заданного количества испытаний. В ней учтены как работа приборов в соответствии с техническими характеристиками и методиками, изложенными в нормативных документах [10, 11, 13–22], так и фактор работы персонала [6, 7]. Предлагаемые далее формулы являются адаптацией методик [6, 7] под реалии работ лаборатории.

Расчет минимального времени выполнения испытаний предлагается проводить по следующей формуле:

$$T_{\text{раб}} = K \frac{T_{\text{норм}} N_{\text{исп}}}{P} \geq T_{\text{норм}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{раб}}$ – время выполнения заданных испытаний, обоснованное нормативными документами, ч; $T_{\text{норм}}$ – минимальное время проведения одного испытания, обоснованное нормативными до-

кументами, ч (примеры значений $T_{\text{норм}}$ приведены в таблице); $N_{\text{исп}}$ – количество заданных испытаний, шт.; P – количество приборов в лаборатории, требуемых для проведения заданных испытаний, шт.; K – коэффициент увеличения времени выполнения испытаний, учитывающий работу персонала и обоснованный нормативными методиками проведения испытаний [6, 7, 11, 13–19, 21, 22].

Коэффициент K обеспечивает переход от расчета времени по нормативным документам к расчету реального времени выполнения испытаний, обоснованному пропускной способностью лаборатории. Это дает возможность не только оценить потенциального исполнителя, но и выявить узкие места в производственной схеме собственной лаборатории. Этот коэффициент предлагается определять по следующей формуле:

$$K = K_{\text{кв}} \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{стад}}} (T_{\text{фи}} \cdot \chi_i)}{T_{\text{норм}}}, \quad (2)$$

где K – коэффициент увеличения времени выполнения испытания, учитывающий работу персонала и обоснованный нормативными методиками проведения испытаний; i – стадия испытания; $N_{\text{стад}}$ – количество стадий испытания, обоснованное нормативными документами; $T_{\text{фи}}$ – фактическое время работы исполнителей на i -й стадии одного испытания, ч; χ_i – численность исполнителей, принимающих участие на i -й стадии испытания; $T_{\text{норм}}$ – минимальное время проведения испытания, обоснованное нормативными документами, ч (примеры значений $T_{\text{норм}}$ приведены в таблице); $K_{\text{кв}}$ – коэффициент квалификации, который рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{кв}} = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{T_{\text{фj}}}{T_{\text{п}}} \chi_j I_j \right)}{\chi_{\text{п}}}, \quad (3)$$

где j – j -я группа исполнителей с одинаковым уровнем заработной платы; n – количество групп исполнителей; $T_{\text{фj}}$ – фактическое время работы j -й группы исполнителей с одинаковым уровнем заработной платы; $T_{\text{п}}$ – полная плановая продолжительность выполнения работ, которую следует принять соответствующей 45 дням (что равно сроку годности образцов по ГОСТ 12071-2014 [1]); I_j – индекс среднемесячной заработной платы непосредственных исполнителей j -й группы, принимаемый в соответствии с таблицей 2.1 методики МРР-3.2.67-09 [6]; χ_j – численность испол-

Таблица. Примеры минимальных затрат времени на основные виды испытаний грунтов согласно нормативным документам

Название опыта	Требуемые приборы	Тип грунта	$T_{\text{норм}}, \text{ч}$	Источник информации
Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза	Приборы одноплоскостного среза	пески	от 0,5	п. 8.14 ГОСТ 12248.1-2020 [13]
		супеси	от 3	
		суглинки легкие	от 6	
		суглинки тяжелые	от 12	
		глины с $I_p < 22\%*$	от 12	
		глины с $I_p > 22\%$	от 18	
		органоминеральные грунты	от 24	
Определение характеристик деформируемости методами компрессионного и (или) трехосного сжатия	Приборы компрессионного сжатия	пески	от 0,5	п. 8.6 ГОСТ 12248.4-2020 [15]; п. 8.3.6 ГОСТ 12248.3-2020 [14]
		супеси	от 3	
		суглинки легкие	от 6	
		суглинки тяжелые	от 12	
		глины с $I_p < 22\%$	от 12	
		глины с $I_p > 22\%$	от 18	
		органоминеральные и органические грунты	от 24	
Определение степени пучинистости	Приборы для определения степени морозного пучения	все дисперсные грунты	от 24	п. 7.2 ГОСТ 28622-2012 [21]

* I_p – число пластичности (Plasticity Index).

нителей j -й группы с одинаковым уровнем зарплаты; $Ч_n$ – полная численность исполнителей во всей лаборатории.

Стоит учитывать, что время выполнения испытаний не может быть меньше нормативного вне зависимости от технического оснащения лаборатории, то есть испытание отдельно взятого образца должно длиться не менее указанного в нормативной методике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Предложенная методика позволяет заказчику предварительно оценить способность исполнителя выполнить испытания грунтов в требуемый срок, не прибегая к услугам аудита и без физического присутствия в лаборатории. Благодаря введению коэффициента увеличения времени возможно нормативное обоснование выработки лаборатории потенциального подрядчика, оценка которой ранее носила субъективный характер.

Кроме того, в перспективе использование формул (1)–(3) дает возможность разработки автоматизированных инструментов оценки выработки лабораторий и выявления узких мест в уже существующих производственных подразделениях.

Помимо вышеизложенных выводов целесообразно выделить несколько аспектов, которые напрямую не являются блоками алгоритма проверки контрагента, но которые необходимо принимать во внимание при взаимодействии с исполнителем.

1. Соблюдение формальностей, диктуемых СП 47.13330.2016 [3], РСН 51-84 [8], ГОСТ 30416-2012 [22], ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [23] и другими нормативными документами, не является гарантией качества инженерно-геологических изысканий, так как может быть фальсифицировано.

2. Наибольшую актуальность представленные рекомендации имеют для проверки качества изысканий в районах III категории сложности и для строительства сооружений повышенного уровня ответственности.

3. На начальном этапе следует сопоставить несколько потенциальных исполнителей, сравнивая заявляемые ими цены на изыскания и отсеивая тех, чье предложение сильно отличается от среднего показателя (или запрашивая у них обоснование низкой цены).

4. Потенциальных подрядчиков также стоит опрашивать на предмет сроков выполнения лабораторных испытаний,

в дальнейшем соотнося эту информацию со сведениями о техническом оснащении лабораторий и оценивая время исполнения по формуле (1).

5. Основными факторами, вызывающими доверие к потенциальному исполнителю, должны быть его открытость, готовность к присутствию супервайзеров и предоставлению первичных данных.

6. Любой отчет по изысканиям начинается с полевых работ. По этой причине особо важно соответствие отобранных образцов требованиям ГОСТ 12071-2014 [1]. Для подтверждения качества исходных материалов необходимы фотофиксация образцов керна после бурения и присутствие супервайзера при приемке этих образцов в лаборатории.

7. Техническое оснащение лаборатории напрямую влияет на сроки выполнения испытаний. Примерное представление о сроках выполнения испытаний можно получить, сопоставив приборную базу лаборатории и состав заданных испытаний с информацией из таблицы, произведя расчет согласно формуле (1).

8. Контроль качества лабораторных испытаний может быть достигнут через выборочный анализ первичной инфор-

мации по испытаниям грунтов (рабочих журналов) и фотоматериалов образцов после некоторых испытаний.

9. Итоговый отчет по инженерно-геологическим изысканиям должен содержать достаточные сведения для принятия проектных решений согласно техническому регламенту [2], а также дан-

ные для моделей, используемых при геотехнических расчетах.

10. Так как грунты в районе изысканий имеют схожий генезис, они зачастую имеют и схожие физико-механические свойства. Следовательно, при анализе отчета по ИГИ полезно сравнить его данные с архивной информа-

цией по этому району (из отчетов по предшествующим изысканиям и др.) на предмет схожести свойств инженерно-геологических элементов. Это не отменяет критической оценки результатов предшествующих исследований, но может быть подспорьем в качестве справочной информации. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ►

- ГОСТ 12071-2014. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. М.: Стандартиформ, 2015.
- Технический регламент о безопасности зданий и сооружений. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ. М.: Государственная Дума РФ, 2009.
- СП 47.13330.2016. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. М.: Минстрой России, 2016.
- СП 115.13330.2011. Свод правил. Геофизика опасных природных воздействий. М.: Стандартиформ, 2011.
- Минина Е.А., Застрожных А.С., Круткина О.Н., Жамойда В.А. Карта геологических опасностей России. СПб.: ВСЕГЕИ, 2005.
- МРР-3.2.67-09. Методика определения стоимости научных, нормативно-методических, проектных и других видов работ (услуг) осуществляемых с привлечением средств бюджета города Москвы (на основании планируемых трудозатрат). М.: Правительство Москвы, Комитет по архитектуре и градостроительству города Москвы, ГУП «НИАЦ» Москомархитектуры, 2009.
- Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 01 октября 2021 г. № 707/пр «Об утверждении Методики определения стоимости работ по подготовке проектной документации». М.: Минстрой России, 2021.
- РСН 51-84. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Производство лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов. М.: Госстрой РСФСР, МосЦТИСИЗ, 1984.
- ВСН 33-2.1.05-90. Гидромелиоративные системы и сооружения. Гидрогеологические и инженерно-геологические изыскания (непубличное отраслевое издание). М.: Госстрой СССР, 1991.
- ГОСТ 12248.6-2020. Грунты. Метод определения набухания и усадки. М.: Стандартиформ, 2020.
- ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартиформ, 2016.
- СП 446.1325800.2019. Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. М.: Стандартиформ, 2019.
- ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза. М.: Стандартиформ, 2020.
- ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. М.: Стандартиформ, 2020.
- ГОСТ 12248.4-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. М.: Стандартиформ, 2020.
- ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Стандартиформ, 2015.
- ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. М.: Стандартиформ, 2016.
- ГОСТ 23161-2012. Грунты. Метод лабораторного определения характеристик просадочности. М.: Стандартиформ, 2013.
- ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ. М.: Стандартиформ, 2016.
- ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация. М.: Стандартиформ, 2012.
- ГОСТ 28622-2012. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости. М.: Стандартиформ, 2013.
- ГОСТ 30416-2012. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. М.: Стандартиформ, 2013.
- ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. М.: Стандартиформ, 2019.

REFERENCES ►

- GOST 12071-2014. Grunty. Otkor, upakovka, transportirovanie i khranenie obraztsov [Soils. Sampling, packing, transportation, and storage of samples]. M.: Standartinform, 2015 (in Rus.).

2. Tekhnicheskii reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenii. Federal'nyi zakon ot 30.12.2009 № 384-FZ [Technical Regulation on the Safety of Buildings and Structures. Federal Law of 30.12.2009 № 384-FZ]. M.: Gosudarstvennaya Duma RF, 2009 (in Rus.).
3. SP 47.13330.2016. Svod pravil. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Osnovnye polozeniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 11-02-96 [Code of Practice. Site Investigations for Construction. Basic Provisions. Updated version of SNiP 11-02-96]. M.: Minstroy Rossii, 2016 (in Rus.).
4. SP 115.13330.2011. Svod pravil. Geofizika opasnykh prirodnykh vozdeystvii [Code of Practice. Geophysics of Hazardous Natural Impacts]. M.: Standartinform, 2011 (in Rus.).
5. Minina E.A., Zastrozhnov A.S., Krutkina O.N., Zhamoida V.A. Karta geologicheskikh opasnostei Rossii [Geological Hazards Map of Russia]. SPb.: VSEGEI, 2005 (in Rus.).
6. MRR-3.2.67-09. Metodika opredeleniya stoimosti nauchnykh, normativno-metodicheskikh, proektnykh i drugikh vidov rabot (uslug) osushchestvlyаемых s privlecheniem sredstv byudzheta goroda Moskvy (na osnovanii planiruemykh trudozatrat) [Method for Determining the Cost of Scientific, Normative-Methodological, Design, and Other Types of Work (Services) Carried Out Using the Budget of the City of Moscow (Based on Planned Labor Costs)]. M.: Pravitel'stvo Moskvy, Komitet po arkhitekture i gradostroitel'stvu goroda Moskvy, GUP «NIATS» Moskomarkhitektury, 2009 (in Rus.).
7. Prikaz Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaistva Rossiiskoi Federatsii ot 01 oktyabrya 2021 g. № 707/pr "Ob utverzhdenii Metodiki opredeleniya stoimosti rabot po podgotovke proektnoi dokumentatsii" [Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation of 01 October 2021 № 707/pr "On Approval of the Methodology for Determining the Cost of Work for Preparing Design Documentation"]. M.: Minstroy Rossii, 2021 (in Rus.).
8. RSN 51-84. Respublikanskii stroitel'nye normy. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Proizvodstvo laboratornykh issledovaniy fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov [Republican Construction Norms. Engineering Investigations for Construction. Laboratory Testing of Physical and Mechanical Properties of Soils]. M.: Gosstroy RSFSR, MosTSTISIZ, 1984 (in Rus.).
9. VSN 33-2.1.05-90. Gidromeliorativnye sistemy i sooruzheniya. Gidrogeologicheskie i inzhenerno-geologicheskie izyskaniya (nepublichnoe otraslevoe izdanie) [Hydraulic Reclamation Systems and Structures. Hydrogeological and Engineering-Geological Investigations (non-public industry edition)]. M.: Gosstroy SSSR, 1991 (in Rus.).
10. GOST 12248.6-2020. Grunty. Metod opredeleniya nabukhaniya i usadki [Soils and Rocks. Method for Determining Swell and Shrinkage]. M.: Standartinform, 2020 (in Rus.).
11. GOST 5180-2015. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik [Soils and Rocks. Methods for Laboratory Determination of Physical Characteristics]. M.: Standartinform, 2016 (in Rus.).
12. SP 446.1325800.2019. Svod pravil. Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva. Obshchie pravila proizvodstva rabot [Code of Practice. Engineering-geological Investigations for Construction. General Rules for Work Execution]. M.: Standartinform, 2019 (in Rus.).
13. GOST 12248.1-2020. Grunty. Opredelenie kharakteristik prochnosti metodom odnoploskostnogo sreza [Soils and Rocks. Determination of Strength Characteristics by the Single-Plane Shear Method]. M.: Standartinform, 2020 (in Rus.).
14. GOST 12248.3-2020. Grunty. Opredelenie kharakteristik prochnosti i deformiruемости metodom trekhosnogo szhatiya [Soils and Rocks. Determination of Strength and Deformability Characteristics by Triaxial Compression Method]. M.: Standartinform, 2020 (in Rus.).
15. GOST 12248.4-2020. Grunty. Opredelenie kharakteristik deformiruемости metodom kompressionnogo szhatiya [Soils and Rocks. Determination of Deformability Characteristics by Compression Method]. M.: Standartinform, 2020 (in Rus.).
16. GOST 12536-2014. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava [Soils and Rocks. Methods for Laboratory Determination of Granulometric (Particle-Size) and Microaggregate Composition]. Standartinform, 2015 (in Rus.).
17. GOST 22733-2016. Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya maksimal'noi plotnosti [Soils and Rocks. Laboratory Method for Determining Maximum Density]. M.: Standartinform, 2016 (in Rus.).
18. GOST 23161-2012. Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya kharakteristik prosadochnosti [Soils and Rocks. Laboratory Method for Determining Shrinkage/Settlement Characteristics]. M.: Standartinform, 2013 (in Rus.).
19. GOST 23740-2016. Grunty. Metody opredeleniya soderzhaniya organicheskikh veshchestv [Soils and Rocks. Methods for Determining Organic Matter Content]. M.: Standartinform, 2016 (in Rus.).
20. GOST 25100-2011. Grunty. Klassifikatsiya [Soils and Rocks. Classification]. M.: Standartinform, 2012 (in Rus.).
21. GOST 28622-2012. Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya stepeni puchinistosti [Soils and Rocks. Laboratory Method for Determining Frost-Heave Potential]. M.: Standartinform, 2013 (in Rus.).
22. GOST 30416-2012. Grunty. Laboratornye ispytaniya. Obshchie polozeniya [Soils and Rocks. Laboratory Testing. General Provisions]. M.: Standartinform, 2013 (in Rus.).
23. GOST ISO/IEC 17025-2019. Obshchie trebovaniya k kompetentnosti ispytatel'nykh i kalibrovochnykh laboratorii [General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories]. M.: Standartinform, 2019 (in Rus.).

Организаторы:

Независимый электронный журнал
Геоинфо

К ДЕСЯТИЛЕТИЮ ЖУРНАЛА «ГЕОИНФО»
ОТМЕТИМ В ХОРОШЕЙ
КОМПАНИИ!

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА В ОБЛАСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ
ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, ГЕОТЕХНИКИ,
МОНИТОРИНГА И ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ТЕРРИТОРИИ

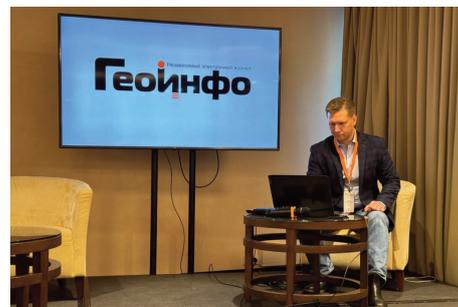
Геоинфо EXPO
2026

1000+ посетителей

30+ экспонентов

40+ мероприятий деловой программы

150+ докладов



Посещение выставки и всех мероприятий
деловой программы бесплатное

15-16 апреля 2026 года

Москва, Звезды Арбата 5*, Новый Арбат, 32



Источник изображения: <https://stock.adobe.com/ru/search/free>

ТРАНСФОРМАЦИИ В ГЕОТЕХНИКЕ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: ДОСТИЖЕНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Принята к публикации 24.12.2025
Опубликована 30.01.2026

ШЕЙЛ Б.

Инженерный факультет Кембриджского университета, г. Кембридж, Великобритания
bbs24@cam.ac.uk

АНАГНОСТОПУЛОС К.

Факультет (школа) компьютерных наук Университета Глазго, г. Глазго, Великобритания

БАКЛИ Р.

Факультет (школа) инженерных наук имени Джеймса Ватта Университета Глазго, г. Глазго, Великобритания

ЧИАНТИА М.О.

Факультет (школа) естественных и инженерных наук Университета Данди, г. Данди, Великобритания; факультет наук о Земле и окружающей среде Университета Милана-Бикокка, г. Милан, Италия

ФЕБРИАНТО Э.

Факультет (школа) инженерных наук имени Джеймса Ватта Университета Глазго, г. Глазго, Великобритания

ФУ Ц.

Факультет (школа) инженерных наук и материаловедения Лондонского университета имени Королевы Марии, г. Лондон, Великобритания

ГАО Ч.

Факультет (школа) инженерных наук имени Джеймса Ватта Университета Глазго, г. Глазго, Великобритания

ГЭН С.

Инженерный факультет Университета Уорика, г. Ковентри, Великобритания

ГУН Б.

Колледж инженерных, дизайнерских и естественных наук при Лондонском университете имени Брунеля, г. Лондон, Великобритания

ХЭНЛИ К.

Бакалавриат по химическим технологиям Эдинбургского университета, г. Эдинбург, Великобритания

ХЭ П.

Факультет (школа) естественных и инженерных наук Университета Данди, г. Данди, Великобритания

КОЛОМВАТСОС К.

Факультет инженерных и компьютерных наук Университета Фессалии, г. Волос, Греция

ЛОПЕС Б.К.Ф.Л.

Факультет гражданского и экологического строительства
Университета Стратклайда, г. Глазго, Великобритания

НИНИЧ Й.

Инженерный факультет (школа) Бирмингемского
университета, г. Бирмингем, Великобритания

ПРЕВИТАЛИ М.

Факультет (школа) естественных и инженерных наук
Университета Данди, г. Данди, Великобритания

РЕЗАНИЯ М.

Инженерный факультет (школа) Университета Уорика,
г. Ковентри, Великобритания

РУИС-ЛОПЕС А.

Компания Seequent («Сиквент») – дочерняя компания
корпорации Bentley Systems по подземным технологиям,
г. Крайстчерч, Новая Зеландия; инженерный факультет
Лондонского Имперского колледжа,
г. Лондон, Великобритания

СУНЬ Ц.

Факультет (школа) инженерных наук имени Джеймса Ватта
Университета Глазго, г. Глазго, Великобритания

СУРЬЯСЕНТАНА С.

Факультет гражданского и экологического строительства
Университета Стратклайда, г. Глазго, Великобритания

ТАБОРДА Д.

Инженерный факультет Лондонского имперского
колледжа, г. Лондон, Великобритания

УТИЛИ С.

Инженерный факультет (школа) Университета Ньюкасла,
г. Ньюкасл-апон-Тайн, Великобритания

ВАЙТ С.

Компания Geowynnd («Геовинд»),
г. Лондон, Великобритания

ЧЖАН П.

Факультет гражданского и экологического строительства
Сингапурского национального университета, Сингапур

АННОТАЦИЯ

Предлагаем вниманию читателей адаптированный перевод подробного обзора «Трансформации в геотехнике с помощью искусственного интеллекта: достижения, проблемы и перспективы», который был подготовлен международной группой исследователей (преимущественно из Великобритании). Основой данной работы явился доклад авторов на Первом симпозиуме по применению искусственного интеллекта в геотехнике, проведенном в мае 2023 года в шотландском городе Глазго, после чего она почти два года дорабатывалась и в январе 2025 года поступила в виде статьи в редакцию журнала *Computers and Geotechnics* («Компьютеры и геотехника») издательства Elsevier («Элсевир/Эльзевир»). Этот обзор будет опубликован в указанном журнале в январе 2026 года. Сейчас эта работа находится в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0, которая позволяет копировать, распространять, адаптировать, видоизменять ее и создавать новое на ее основе при указании вида лицензии, типов изменений и ссылки на первоисточник. В данном случае полная ссылка на источник для перевода приведена в конце.

Необходимость в освоении подземного пространства для создания критически важных объектов гражданского строительства неуклонно растет – для размещения коммунальной и транспортной инфраструктуры в городских условиях, для реализации инновационных жилищных и коммерческих решений, а также для поддержки растущей инфраструктуры возобновляемой энергетики, особенно в морской прибрежной зоне. Пожалуй, наиболее перспективным инструментом для соответствующей трансформации геотехники является искусственный интеллект (ИИ) благодаря его способности извлекать знания из данных и обеспечивать кардинальное повышение эффективности, устойчивости, надежности и безопасности работ.

Цель данной статьи – сформировать общее понимание текущего уровня применения искусственного интеллекта в геотехнике и исследовать перспективные направления его развития. Чтобы продемонстрировать достигнутый прогресс в этой сфере, рассматриваются конкретные примеры распространенных вариантов использования ИИ, в том числе для интеллектуальных геотехнических изысканий, прогнозного моделирования поведения грунтов и оптимизации процессов проектирования и строительства. Кроме того, в статье затрагиваются важнейшие исследовательские вопросы, такие как недостаток данных и проблемы интерпретации результатов, а также обсуждаются возможности, которые открываются при внедрении ИИ в геотехнику. И наконец, определяются ключевые технологические перспективы будущих преобразований в отрасли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

геотехника; геотехнические изыскания; искусственный интеллект; интеллектуальные инженерные изыскания; моделирование поведения грунтов; оптимизация геотехнического проектирования; машинное обучение; человеко-машинное взаимодействие; междисциплинарный подход; этические аспекты; правовые аспекты.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Шейл Б., Анагностопулос К., Бакли Р., Чиантиа М.О., Фебрианто Э., Фу Ц., Гао Ч., Гэн С., Гун Б., Хэнли К., Хэ П., Коломватсос К., Лопес Б.К.Ф.Л., Нинич Й., Превитали М., Резания М., Руис-Лопес А., Сунь Ц., Сурьясентана С., Таборда Д., Утили С., Вайт С., Чжан П. Трансформации в геотехнике с помощью искусственного интеллекта: достижения, проблемы и перспективы (адапт. пер. с англ.) // *GeoInfo*. 2025. Т. 7. № 4. С. 52–80.
DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-52-80.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE TRANSFORMATIONS IN GEOTECHNICS: PROGRESS, CHALLENGES AND FUTURE ENABLERS

Accepted for publication 24.12.2025

Published 30.01.2026

SHEIL B.

Department of Engineering, University of Cambridge,
Cambridge, UK
bbs24@cam.ac.uk

ANAGNOSTOPOULOS C.

School of Computing Science, University of Glasgow, Glasgow,
UK

BUCKLEY R.

James Watt School of Engineering, University of Glasgow,
Glasgow, UK

CIANTIA M.O.

School of Science and Engineering, University of Dundee,
Dundee, Scotland, UK; Department of Earth and Environmental
Sciences, University of Milano-Bicocca, Milan, Italy

FEBRIANTO E.

James Watt School of Engineering, University of Glasgow,
Glasgow, UK

FU J.

School of Engineering and Materials Science, Queen Mary
University of London, London, UK

GAO Z.

James Watt School of Engineering, University of Glasgow,
Glasgow, Coventry

GENG X.

School of Engineering, University of Warwick, Coventry, UK

GONG B.

College of Engineering, Design and Physical Sciences, Brunel
University of London, London, UK

HANLEY K.

Chemical Engineering (BEng Hons) programme, University of
Edinburgh, Edinburgh, UK

HE P.

School of Science and Engineering, University of Dundee,
Dundee, UK

KOLOMVATSOS K.

Engineering and Computer Science, University of Thessaly,
Volos, Greece

LOPES B.C.F.L.

Department of Civil and Environmental Engineering, University
of Strathclyde, Glasgow, UK

NINIC J.

School of Engineering, University of Birmingham, Birmingham, UK

PREVITALI M.

School of Science and Engineering, University of Dundee,
Dundee, UK

REZANIA M.

School of Engineering, University of Warwick, Coventry, UK

RUIZ-LOPEZ A.

Seequent (The Bentley Subsurface Company), Christchurch,
New Zealand; Faculty of Engineering, Imperial College London,
London, UK

SUN J.

James Watt School of Engineering, University of Glasgow,
Glasgow, UK

SURYASENTANA S.

Department of Civil and Environmental Engineering, University
of Strathclyde, Glasgow, UK

TABORDA D.

Faculty of Engineering, Imperial College London, London, UK

UTILI S.

School of Engineering, Newcastle University, Newcastle upon
Tyne, UK

WHYTE S.

Geowynd company, London, UK

ZHANG P.

Department of Civil and Environmental Engineering, National
University of Singapore, Singapore

ABSTRACT

We present to our readers an adapted translation of the extensive review paper “Artificial intelligence transformations in geotechnics: progress, challenges and future enablers”, authored by an international group of researchers (predominantly from the United Kingdom). This work is based on the authors’ report at the 1st Workshop on AI in Geotechnics, held in May 2023 in Glasgow, Scotland, UK. After that workshop, the paper had been revised for almost two years, and it was submitted to the Computers and Geotechnics journal of the Elsevier publishing company in January 2025. The review will be published in that journal in January 2026. The paper is currently available in open access under the CC BY 4.0 license, which allows users to copy, distribute, adapt, modify it, and build upon it, provided that the license type, changes made are indicated and the original source is referenced. In our case, the full reference to the original source is provided at the end of the translation.

Our reliance on the underground space to deliver critical civil engineering infrastructure is growing: to accommodate utility and transport infrastructure in urban environments, to provide innovative housing and commercial solutions, and to support proliferating renewable energy infrastructure, particularly offshore. Artificial intelligence (AI) is arguably the most promising enabler to transform geotechnical engineering by extracting knowledge from data to achieve step-change increases in efficiency, sustainability, reliability and safety.

This paper seeks to develop a shared understanding of the state of the art of AI in geotechnics and to explore future developments. By way of example, specific popular use cases in geotechnics are considered to highlight current progress in AI applications including intelligent site investigation, predictive modelling for soil behaviour, and optimisation of design and construction processes. The paper then addresses key research challenges, such as data scarcity and interpretability, and discusses the opportunities that lie ahead in the integration of AI with geotechnical engineering. Finally, priority technological enablers are identified for future transformations.

KEYWORDS:

geotechnics; geotechnical investigations; artificial intelligence; intelligent site investigations; soil behavior modeling; geotechnical design optimization; machine learning; human-machine interaction; interdisciplinary approach; ethical aspects; legal aspects.

FOR CITATION:

Sheil B., Anagnostopoulos C., Buckley R., Ciantia M.O., Febrianto E., Fu J., Gao Z., Geng X., Gong B., Hanley K., He P., Kolomvatsos K., Lopes B.C.F.L., Ninic J., Previtali M., Rezania M., Ruiz-Lopez A., Sun J., Suryasentana S., Taborda D., Utili S., Whyte S., Zhang P. Transformatsii v geotekhnike s pomoshch'yu iskusstvennogo intellekta: dostizheniya, problemy i perspektivy (adapt. per. s angl.) [Artificial intelligence transformations in geotechnics: progress, challenges and future enablers (adapted translation from English into Russian)] // Geoinfo. 2025. T. 7. № 4. S. 52–80. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-52-80 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

Интеграция искусственного интеллекта (ИИ) в самые разные сферы деятельности уже стимулирует прогресс в их трансформации. Например, в здравоохранении инструменты диагностики и прогнозные модели на основе ИИ способствуют повышению точности выявления заболеваний и планирования лечения [1]. Применение искусственного интеллекта в экономике, в частности в ее финансовой сфере, позволило оптимизировать торговые стратегии, управление рисками и выявление мошеннических действий [2]. Технологии ИИ также используются для создания цифровых двойников крупных строительных объектов, например железнодорожных мостов и путей [3, 4]. В связи с недавним быстрым развитием крупных языковых моделей (программных алгоритмов, анализирующих тексты, понимающих их контексты, обрабатывающих их и генерирующих новые тексты, например ChatGPT [5]) значительный вырос интерес к исследованиям потенциала ИИ для обеспечения кардинального увеличения эффективности и инноваций в геотехнике.

Один из ключевых стимулов внедрения искусственного интеллекта в геотехнику – насущная необходимость в решении все более сложных задач, возникающих как при развитии подземной инфраструктуры [6, 7 и др.], так и при строительстве инфраструктуры морской прибрежной энергетики [8 и др.].

Подповерхностные условия могут быть как очень сложными, так и неопределенными. Точное прогнозирование поведения грунтов – также весьма сложная задача. Традиционные аналитические методы часто не справляются с тонкостями и парадоксами геотехнических данных, что приводит к потенциальным неточностям и неэффективности процессов проектирования и строительства [9]. Однако для более глубокого анализа растущих массивов данных, который позволит создавать более целостные и точные прогнозные модели и повышать эффективность рабочих процессов, могут послужить передовые алгоритмы машинного обучения (МО) и методы, основанные на данных. Важно отметить, что возможности многих подходов МО могут быть, в свою очередь, расширены для учета неопределенностей моделей, что повысит надежность их работы со сложными или неполными данными.

В этой обзорно-концептуальной статье обобщены ключевые возможности, проблемы и необходимость исследований в области применения искусственного интеллекта в геотехнике. Вместо исчерпывающего обзора имеющихся литературных источников рассматриваются отдельные показательные примеры использования ИИ в интеллектуальных инженерных изысканиях, прогнозном моделировании поведения грунтов, а также в оптимизации процессов проектирования и строительства, чтобы под-

крепить приведенные аргументы. При этом обсуждение каждого из перспективных направлений основывается на современной доказательной базе.

ЦЕЛИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ►

Развитие ИИ направлено на создание интеллектуальных машин, которые могут имитировать человеческий интеллект. Основная цель при этом – сделать так, чтобы машины могли воспринимать информацию по окружающей среде, рассуждать, извлекать уроки из опыта и принимать обоснованные решения на основе данных и закономерностей [10]. Искусственный интеллект – это широкий термин, охватывающий в том числе машинное обучение, компьютерное зрение и робототехнику (рис. 1).

Машинное обучение (machine learning, ML) является фундаментальным элементом разработки интеллектуальных систем и включает создание алгоритмов и/или статистических моделей, позволяющих машинам постепенно улучшать эффективность выполнения конкретных задач при наличии обучающих данных. Оно включает следующие подобласти, каждая из которых сосредоточена на определенных аспектах имитации интеллекта: обучение «с учителем» (контролируемое), обучение «без учителя» (неконтролируемое), обучение с подкреплением (методом «проб и ошибок»), глубокое обучение,

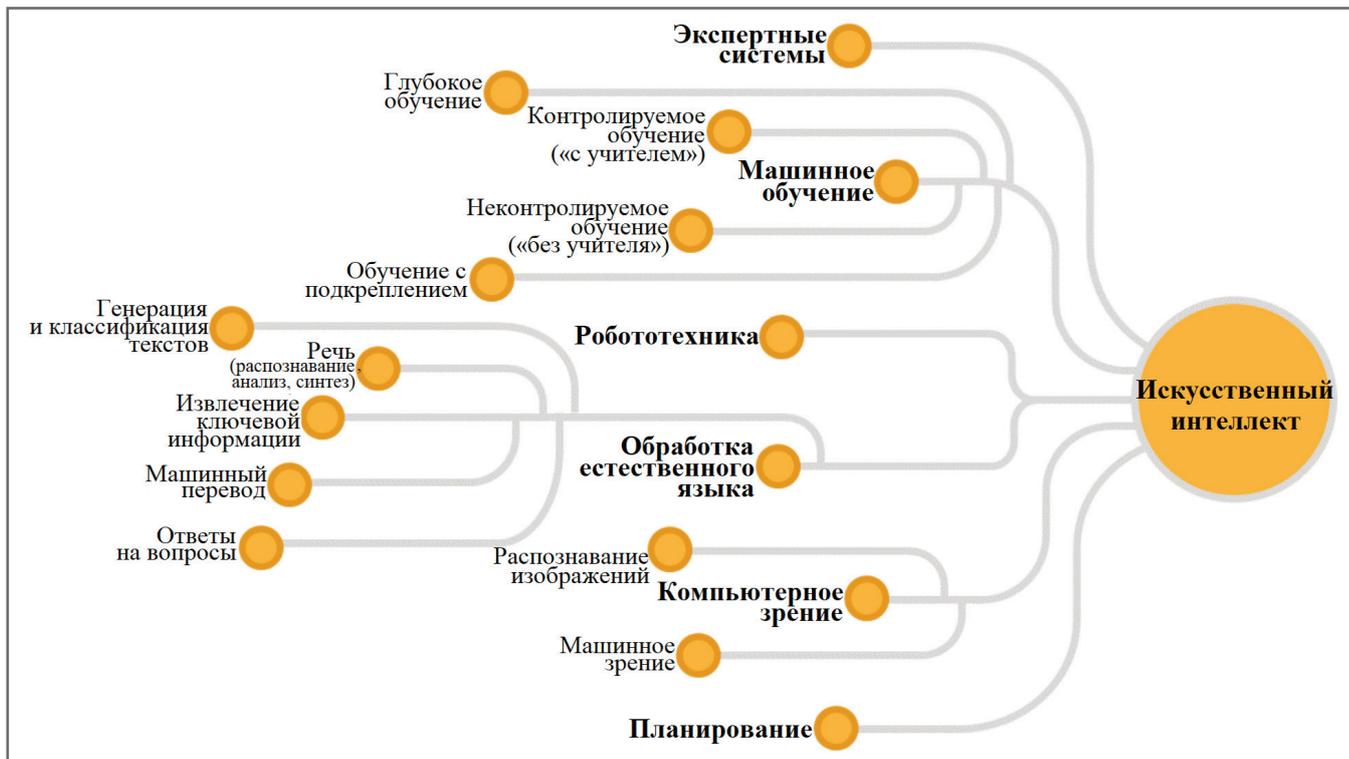


Рис. 1. Схема направлений (подобластей) искусственного интеллекта

а также байесовские методы и обработку естественного языка (однако такая классификация не полностью соответствует рисунку 1 – и редактор адаптированного перевода счел необходимым добавить пояснения. Во-первых, байесовские методы – это скорее не подобласть машинного обучения, а технический подход, который можно применять во всех перечисленных до него подобластях. Поэтому данный подход не обозначен на рисунке 1, хотя иногда его показывают как пересекающийся слой или как уточнения внутри других ветвей. Во-вторых, обработку естественного языка чаще выделяют в виде отдельной ветви искусственного интеллекта, как показано на рисунке 1, хотя в ней активно используются методы машинного обучения для анализа и генерации текстов и речи. – *Ред.*)

Глубокое обучение (deep learning, DL) представляет собой дополнительную подобласть машинного обучения, направленную на разработку и обучение искусственных нейронных сетей, которые имитируют архитектуру и принципы работы человеческого мозга. Оно использует множество слоев (отсюда в названии слово «глубокое»), взаимосвязанных узлов, или нейронов, для решения более сложных задач, автоматически учась иерархически представлять данные, абстрагировать и извлекать признаки данных на разных уровнях сложности (абстракции).

В процессе обучения с подкреплением (reinforcement learning, RL) обучающийся агент (алгоритм, система) многократно взаимодействует с заданной средой, то есть пробует разные действия, каждый раз получая обратную связь о принятых решениях в виде «штрафа» или «вознаграждения», в результате чего со временем вырабатывает оптимальное поведение.

Обработка естественного языка (natural language processing, NLP) направлена на то, чтобы дать машинам возможность понимать, анализировать и генерировать человеческий язык. Это направление выходит за рамки простого распознавания текста и включает в том числе такие задачи, как анализ тональности (эмоциональной окраски), машинный перевод и ответы на вопросы.

Также популярны варианты машинного обучения, построенные на байесовском подходе, которые используются для учета алеаторных (связанных с природными случайностями и шумом в данных) и эпистемических (обусловленных недостатком знаний) неопределенностей при анализе данных. В геотехнических приложениях они могут учитывать неопределенности, связанные с материалами (включая их пространственную изменчивость и неопределенность свойств) и/или с численными моделями, а также неопределенности,

присущие качеству данных и системам измерений [11–13].

ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОТДЕЛЬНЫХ ПОПУЛЯРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ГЕОТЕХНИКЕ ▶

Данная работа сосредоточена на последних достижениях в области регрессионных моделей и классификаторов для:

1. Инверсии (например, установления связи между полевыми данными и геотехническими параметрами).
2. Прогнозирования реакций материалов (например, при устройстве свай, смещениях фундаментов, оползнях).
3. Прогнозирования реакций инженерных конструкций (например, для управления тоннелепроходческими комплексами).
4. Повышения эффективности детерминированных методов (например, комплексных геомеханических (конститутивных) моделей поведения материалов).

Интеллектуальные инженерные изыскания и моделирование грунтовой среды ▶

При геотехнических изысканиях для построения моделей грунтовой среды на основе данных широко применяется машинное обучение, чтобы

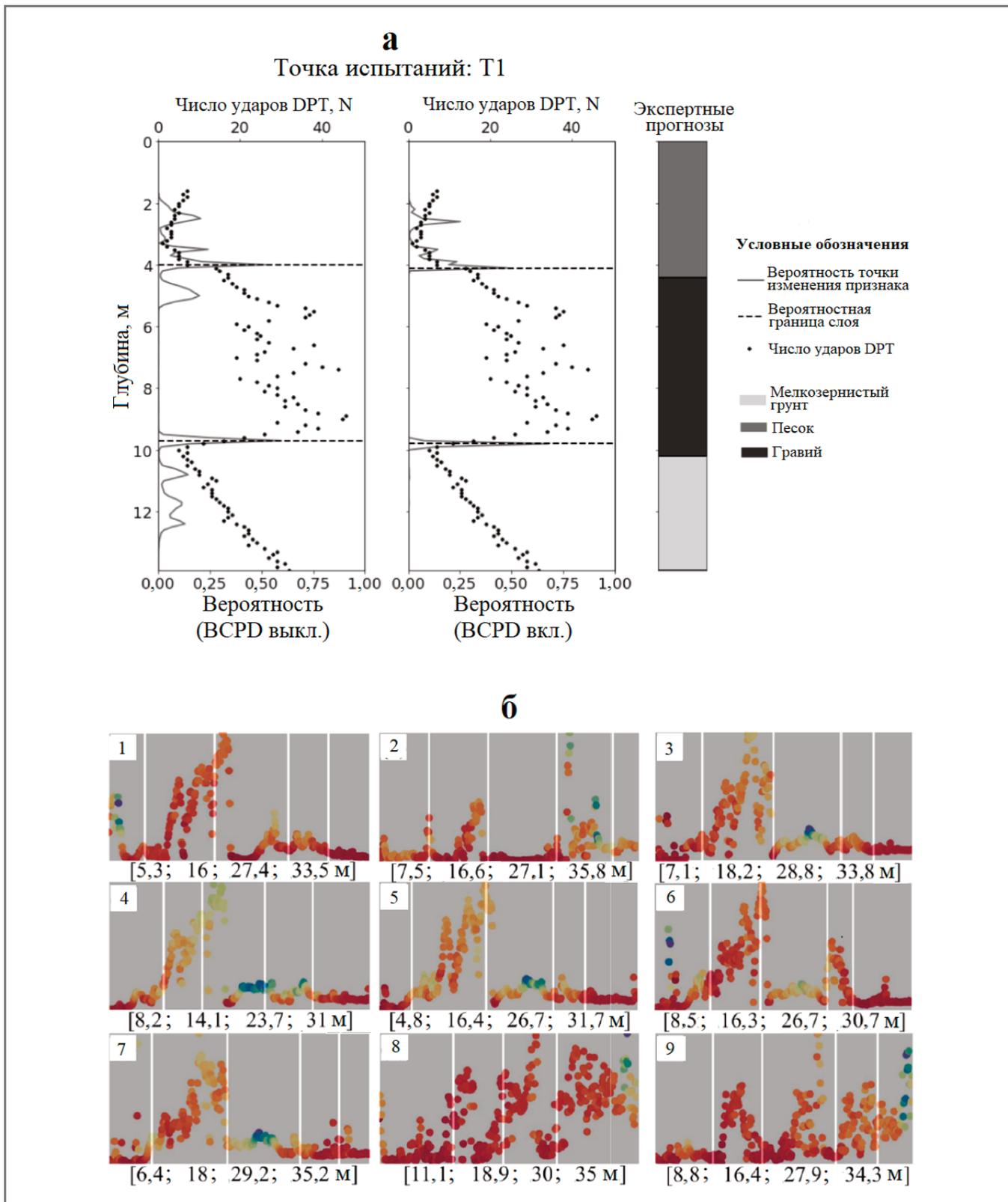


Рис. 2. Прогнозирование границ стратиграфических слоев с использованием: а – данных динамического зондирования сплошным наконечником без отбора проб (методом DPT) [21]; б – данных статического зондирования конусом (методом СРТ) [28]. *Расшифровка аббревиатуры:* ВСПД – байесовский метод выявления точек изменений для отдельных признаков (Univariate Bayesian Change Point Detection)

получить информацию, необходимую для проектирования фундаментов и выбора оптимальных мест отбора проб [14–16].

Модели грунтовых условий на основе данных обычно строятся с использо-

ванием геотехнической информации, такой как результаты динамического зондирования грунтов пробоотборником (методом SPT) или сплошным наконечником без отбора проб (методом DPT). Это моделирование решает такие

две основные задачи прогнозирования, как определение стратиграфического строения подповерхностной среды и пространственная интерполяция (прогнозирование) геотехнических свойств грунтов.

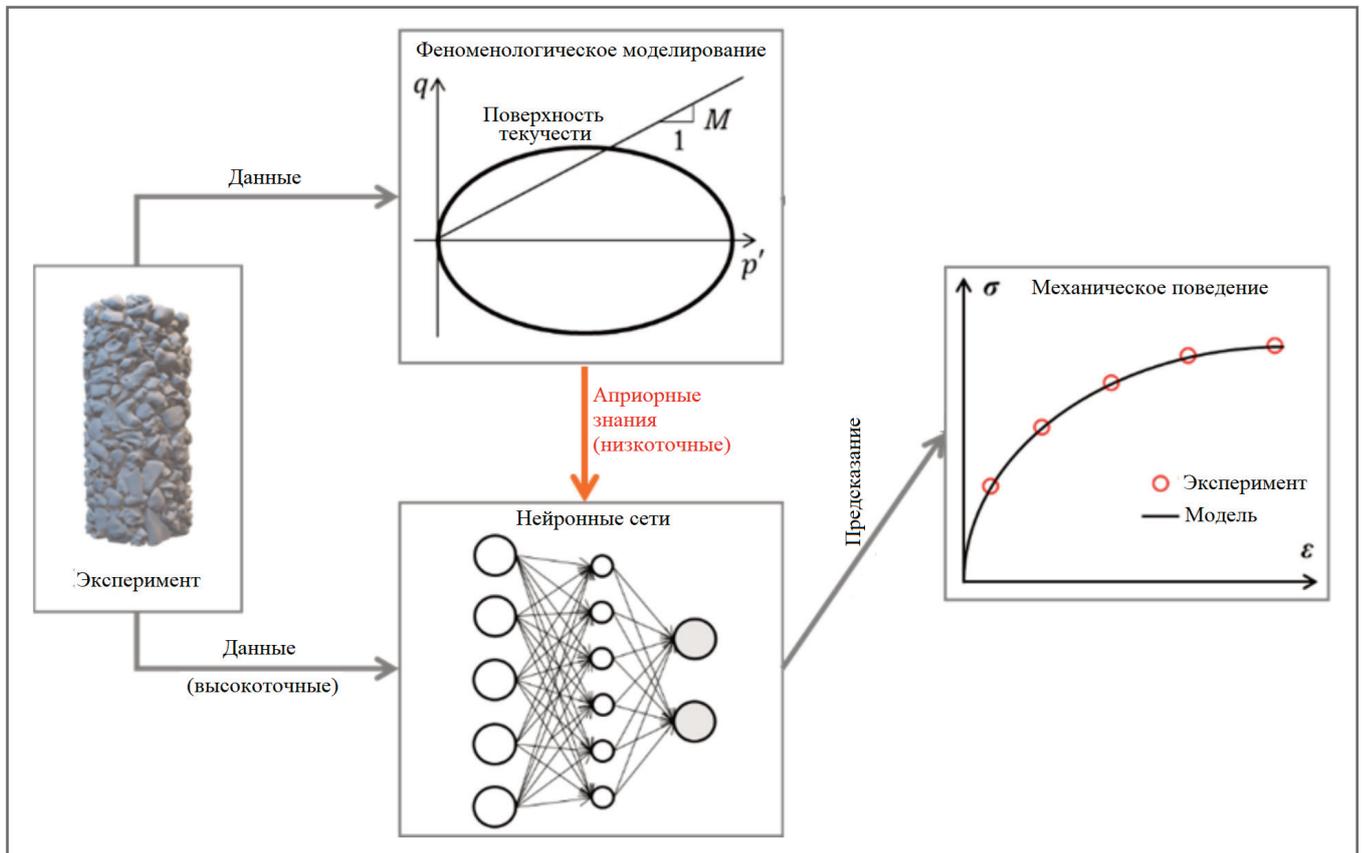


Рис 3. Процесс моделирования с несколькими/многими уровнями точности, использованный в работе Чжана и др. [99], который включает комбинацию нейронной сети на основе данных и традиционные модели на основе наблюдений (феноменологические)

Для определения стратиграфического строения грунтовой среды к настоящему моменту применяются различные методы машинного обучения, такие как:

- регрессия на основе гауссовских процессов, которая математически эквивалентна своему предшественнику – кригингу [17];
- байесовский выбор класса моделей [18];
- метод выявления точек изменений в данных (например, для определения границ стратиграфических слоев) [19–21];
- байесовское сжимающее восстановление разреженных данных [22];
- подходы на основе случайных полей [23, 24];
- регрессия с использованием метода регуляризации LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator – «оператор наименьшего абсолютного сжатия и отбора признаков») [25];
- методы кластеризации [26, 27];
- глубокое обучение (в последнее время) [28].

На рисунке 2 приведены примеры недавних реальных случаев идентификации границ стратиграфических слоев с использованием данных статического зондирования конусом (мето-

дом СРТ) и динамического зондирования сплошным наконечником без отбора проб (методом DPT). Как показали Сурьясентана с коллегами [29], байесовские методы выявления точек/границ изменений для отдельных признаков (Univariate Bayesian Change Point Detection, BCPD) превосходят многомерные подходы (для нескольких признаков) при выделении стратиграфических слоев по данным СРТ. В частности, комбинированный (типологический) индекс поведения грунта I_c обеспечивает более надежное прогнозирование границ, чем совместный анализ сопротивления под конусом Q , и коэффициента трения F_v (отношения сопротивления по боковой поверхности к лобовому). Это, вероятно, связано с эмпирической калибровкой индекса I_c на основе существующих баз данных по классификации грунтов, которые неявно включают априорные знания, подходящие для стратиграфической интерпретации.

Ранее для пространственного прогнозирования геотехнических свойств исследователи применяли такие методы, как: кригинг [30–33]; подходы на основе случайных полей [31]; байесовское сжимающее восстановление разре-

женных данных [22, 34–36]; множественно-точечная статистика [37]; метод XGBoost (алгоритм градиентного бустинга, использующий ансамбль решающих деревьев) [38]; нейронные сети [39, 40].

Кроме того, в последнее время вырос интерес к комплексному моделированию грунтовых условий, объединяющему данные из разных источников (результаты геофизических и геотехнических исследований). Объединение данных разных типов направлено на создание более точных и согласованных моделей грунтовой среды, использующих преимущества каждого источника. Методы объединения данных применяются для изучения взаимосвязей между различными источниками и их использования для прогнозирования состояния подповерхностных условий. К этим методам относятся: кокригинг [39, 41]; подходы на основе случайных полей [42]; многомасштабные подходы [43]; байесовский вывод (байесовская вероятностная оценка) [44, 45]; байесовское сжимающее восстановление разреженных данных из разных источников [46, 47]; метод случайного леса (ансамблирование деревьев решений) [48]; нейронные сети [39, 49, 50].

Прогнозное моделирование поведения грунтов ▶

Грунты представляют собой сложные дисперсные материалы со сложным механическим поведением, включая критическое состояние [51, 52], зависимость от начального состояния (например, [53]), дилатансию при нагружении [54–56 и др.], анизотропию [57, 58 и др.], деструктурирование [59–61 и др.], зависимость от траектории напряжений [62 и др.], зависимость от времени [63, 64 и др.] и некоаксиальность напряжений и деформаций [65 и др.]. Это послужило стимулом для разработки ряда комплексных геомеханических (конститутивных) моделей поведения грунтов, предназначенных для учета его зависимости от времени [66, 67 и др.], зависимости от состояния [68, 69 и др.], дилатансии при нагружении [70, 71 и др.], анизотропии [72–74 и др.], зависимости от траектории напряжений [75 и др.], некоаксиальности напряжений и деформаций [76 и др.] и фазовых переходов [77 и др.].

При традиционном конститутивном моделировании предполагается, что поведение грунта может быть описано математическим уравнением с набором параметров или переменных. Но стремление отразить нестандартные реакции грунтов все время приводит к появлению все более сложных конститутивных моделей с увеличенным количеством материальных параметров. Например, модель SANISAND [78] включает несколько тензоров внутренней структуры грунта и внутренних переменных, которые, хотя и позволяют успешно моделировать сложное поведение материала, значительно усложняют калибровку модели и ограничивают ее интерпретируемость.

С ростом доступности ресурсов искусственного интеллекта в начале 1990-х годов некоторые исследователи начали изучать применение методов ИИ, в частности нейронных сетей, в качестве альтернативы для моделирования поведения материалов [79, 80 и др.]. Эллис с соавторами [81] и Габусси с коллегами [79] стали пионерами в разработке комплексных геомеханических (конститутивных) моделей грунтов на основе нейронных сетей. И вскоре появилось заметное количество конститутивных моделей на основе ИИ [82–84 и др.]. Развитие такого моделирования вышло за рамки нейронных сетей и включало другие методы ИИ, например эволюционную регрессию [85]. В последние годы исследования в рассматриваемой области перешли к численной

реализации этих «интеллектуальных» материальных моделей [86–89 и др.].

Однако эффективность ранних конститутивных моделей на базе ИИ, полностью основанных на данных, была неоднозначной из-за их низкой интерпретируемости и необходимости в больших объемах данных для эффективного обучения. Важно отметить, что такие модели демонстрировали слабую способность к обобщению (экстраполяции): достоверность прогнозов ухудшалась за пределами области признаков, использованных в обучающем наборе данных.

Возрождение в последние годы интереса к использованию искусственного интеллекта в геотехнике дало новый толчок разработке конститутивных моделей на основе ИИ, причем методы машинного обучения с учетом физических закономерностей [90–92] стали ключевым трендом в моделировании материалов. В недавних исследованиях рассматривалась возможность объединения априорных/базовых знаний, таких как эмпирические зависимости или физические законы, с методами МО для ограничения предсказаний разумными пределами [93–98 и др.]. Несмотря на то что эти разработки значительно улучшили обобщающую способность, такие гибридные модели по-прежнему требуют больших наборов высококачественных данных для достижения эффективности предсказаний, сопоставимой с эффективностью использования традиционных конститутивных моделей.

Эти проблемы стимулировали развитие интерпретируемых подходов в МО, пригодных для обучения на наборах разреженных геотехнических данных [99]. Например, Чжан с соавторами [100] включили в нейронную сеть на основе априорной информации три различных теоретических подхода – инкрементальную нелинейность, гиперупругость и упругопластичность (например, рис. 3). Для создания моделей поведения реальных грунтов в сочетании с многоуровневой схемой моделирования (с разной точностью) использовались три модели нейронных сетей на основе априорной информации, чтобы максимизировать влияние разреженных высокоточных данных (и, следовательно, снизить зависимость от них). Такой подход обеспечил эффективный, точный и универсальный метод моделирования поведения грунтов. Это продемонстрировало потенциал методов ИИ, учитывающих физические законы (физически информированных), для создания конститутивных моделей грунта.

Оптимизация геотехнического проектирования, строительных процессов и оценки рисков ▶

В современной геотехнике ключевым направлением стала оптимизация геотехнического проектирования и строительных процессов с растущим вниманием к использованию технологий искусственного интеллекта.

Исторически геотехническое проектирование в значительной степени опиралось на ручные расчеты и анализ, эмпирические методы и упрощенные модели [101]. Хотя эти подходы во многих случаях демонстрировали эффективность, их ограничения при решении сложных современных задач становятся все более очевидными.

В сфере фундаментостроения для прогнозирования несущей способности [102–105 и др.] и осадок [106–110 и др.] фундаментов неглубокого заложения применялись различные алгоритмы машинного обучения.

Исследователи также использовали методы ИИ для уточнения различных аспектов проектирования свай, включая:

- забиваемость свай [111, 112 и др.];
- сопротивление вертикальной нагрузке [113–117 и др.];
- сопротивление боковой нагрузке [118–120 и др.];
- осадки и смещения [121–123 и др.];
- эффекты для группы свай [124 и др.].

Пример усовершенствования метода проектирования с помощью искусственного интеллекта представлен на рисунке 4 – в данном случае для решения задачи забиваемости сваи, то есть среднего значения глубины ее погружения за один удар молота [112]. На рисунке показана ошибка в прогнозах забиваемости сваи при использовании стандартной для отрасли модели, которую разработали Ольм и Хамре [125], и обобщенной модели, улучшенной с помощью машинного обучения, для случая забивки рабочей сваи в переходных грунтах (смешанного состава) на шельфе. Следует отметить, что ключевым компонентом структуры МО была модель на основе волнового уравнения под названием IMPACT, которая описывает, как энергия удара молота распространяется вдоль сваи и взаимодействует с грунтом, причем ее внутренние параметры не изменялись в процессе обучения. Получившаяся в итоге обновленная обобщенная модель продемонстрировала значительно более высокую точность по сравнению с моделью Ольма и Хамре [125].

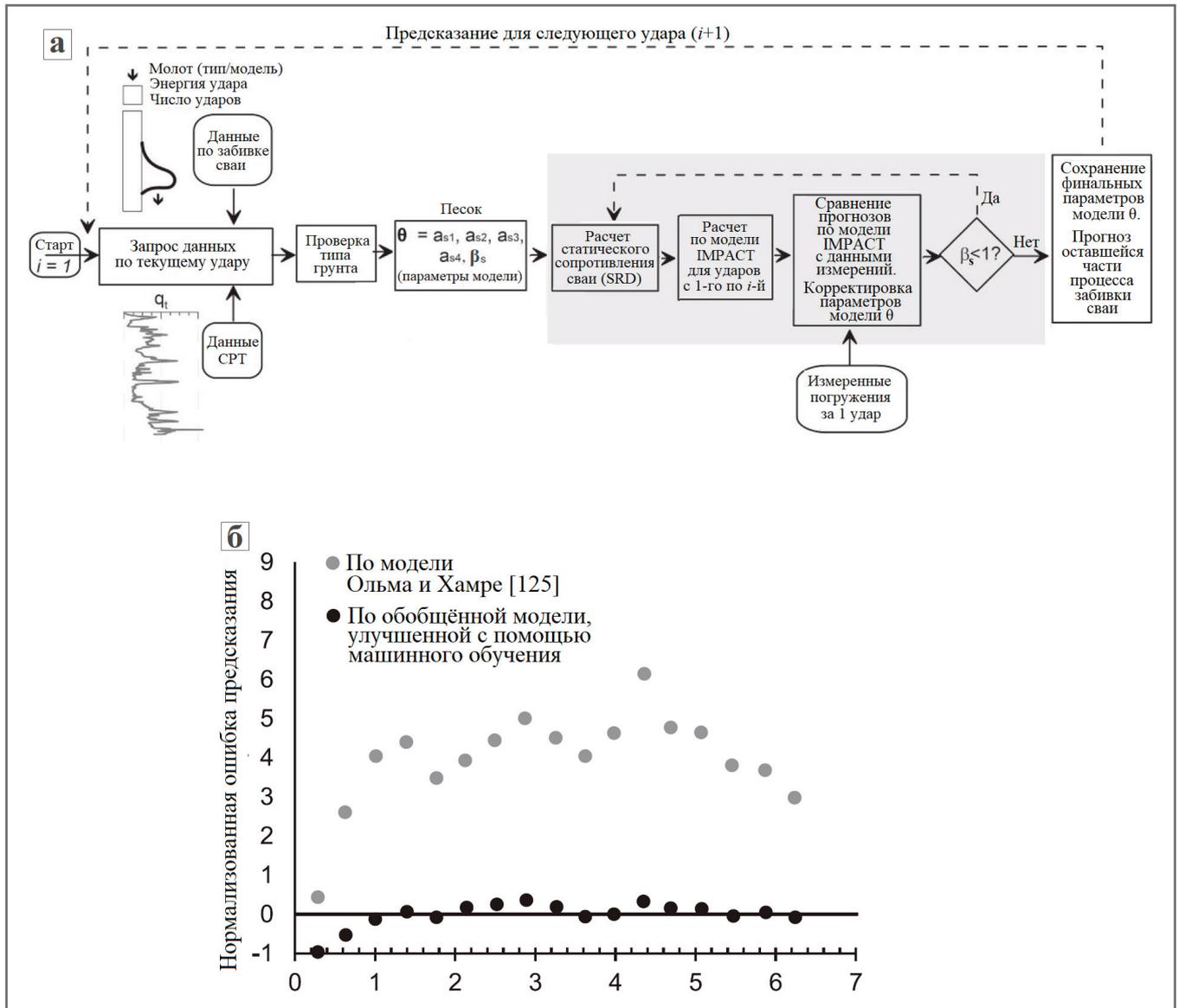


Рис. 4. Пример решения задачи забиваемости сваи с помощью искусственного интеллекта: а – схема использования обобщенной прогнозной модели, улучшенной с помощью машинного обучения; б – соответствующий график нормализованной ошибки предсказаний для забиваемости тестовой шельфовой сваи, не участвовавшей в обучении модели, по сравнению с результатами, полученными с использованием стандартной для отрасли модели Ольма и Хамре [125] (по вертикально оси – отношение разности между предсказанным и измеренным погружением сваи к измеренному значению). *Буквенные обозначения:* $\theta = \{a_{s1}, a_{s2}, a_{s3}, a_{s4}, \beta_s\}$ – вектор параметров модели, которые описывают взаимодействие сваи с грунтом при забивке; $a_{s1} - a_{s4}$ – сопротивление грунта в соответствующих слоях вдоль ствола (shaft, отсюда нижний индекс s) сваи; β_s – коэффициент, задающий распределение бокового сопротивления вдоль ствола сваи, то есть определяющий наклон и форму кривой бокового сопротивления вдоль ствола (если $\beta_s < 1$ – эта кривая вогнутая, пологая, сопротивление увеличивается с глубиной замедленно; $\beta_s = 1$ – кривая линейная, сопротивление растет с глубиной равномерно; $\beta_s > 1$ – кривая выпуклая, крутая, сопротивление увеличивается с глубиной ускоренно)

Подобный подход не ограничивался рассмотренной задачей. Он успешно применялся также для прогнозирования параметров прокладки трубопровода методом продавливания (прокола) [126].

Еще одно популярное направление использования искусственного интеллекта – проектирование устойчивости склонов [127, 128]. В публикациях основное внимание уделяется исследованию механизмов разрушения склонов, оптимизации повышения их устойчивости и оценке коэффициента (запаса) устойчивости [129–131], прогнозированию времени разрушения [100], про-

странственно-временному картированию оползневой опасности [132], а также разработке суррогатных (упрощенных аппроксимационных) моделей, основанных на данных [133].

Недавние работы также посвящены разработке стохастических методов, усиленных алгоритмами машинного обучения [32, 134, 135]. Новым направлением исследований в этой области является объединение методов МО и технологий дистанционного зондирования, например спутниковой интерферометрической радиолокации с синтезированной апертурой (Interferomet-

ric Synthetic Aperture Radar, InSAR), для прогнозирования аномального поведения, указывающего на возможное начало разрушения склона [136, 137 и др.].

Популярные области применения в геотехническом строительстве в первую очередь связаны с тоннелестроением, где наиболее распространенными направлениями являются:

- прогнозирование эффективности работы тоннелепроходческого комплекса (ТПК);
- прогнозирование осадок, вызванных проходкой тоннелей;

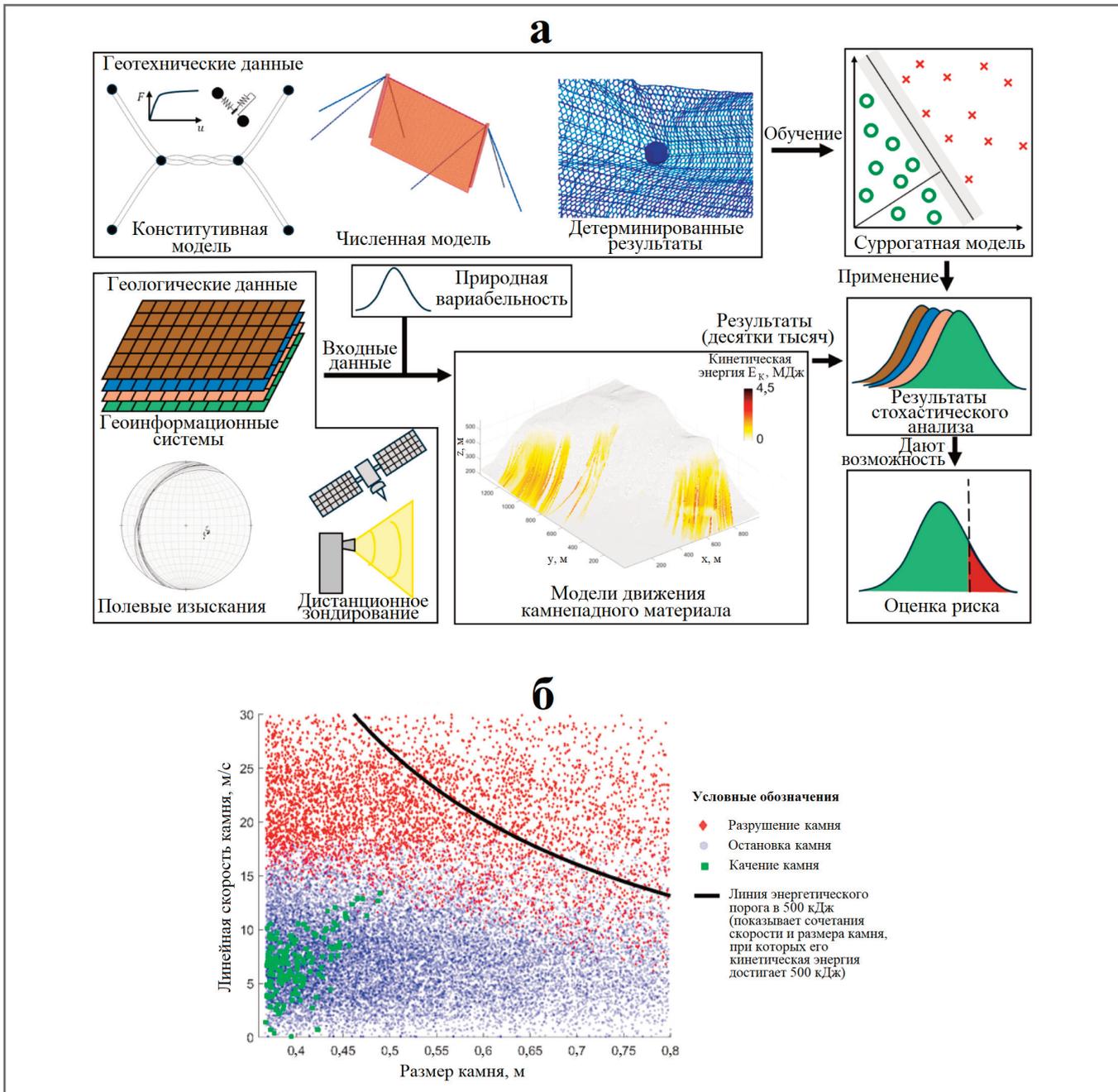


Рис. 5. Использование суррогатных моделей на основе искусственного интеллекта для задачи снижения риска камнепадов: а – блок-схема их применения для достижения точности передовых численных моделей при уровне эффективности, необходимом для крупномасштабного территориального планирования; б – пример результатов работы суррогатной модели относительно стандартного порога энергии в 500 кДж [154]

- оценка и прогнозирование геологических условий впереди забоя;
- оптимизация конструкции ротора (режущей части) ТПК.

Другие области исследований включают: прогнозирование повреждений зданий, вызванных строительством тоннеля [138, 139], автоматизацию работы ТПК [140], оценку состояния тоннелей [141–143], обнаружение аномалий [144, 145 и др.], измерение геометрических параметров и расположения конструктивных элементов тоннеля [146 и др.], оценку устойчивости тоннелей к деформациям и повреждениям [147 и др.],

выявление дефектов конструкций тоннеля [148 и др.], устойчивость забоя тоннеля [149 и др.], прогнозирование горных ударов в тоннеле (внезапного обрушения, сдвижения или выброса грунтов под действием горного давления) [150 и др.], интеллектуальное информационное моделирование зданий и сооружений [151 и др.].

И наконец, искусственный интеллект может использоваться для объединения различных дисциплин и обеспечения применения передовых численных моделей в процедурах территориального планирования регионального масштаба

[152]. Это может быть достигнуто с помощью суррогатных (упрощенных аппроксимационных) моделей [153, 154 и др.], которые воспроизводят результаты более сложных и требующих больших вычислительных затрат моделей при значительно меньших издержках. Примером является их использование для моделирования снижения риска камнепадов (рис. 5), когда оценка этого риска на региональном уровне выполняется геологами с помощью таких инструментов, как геоинформационные системы (ГИС), полевые изыскания и дистанционное зондирование, чтобы

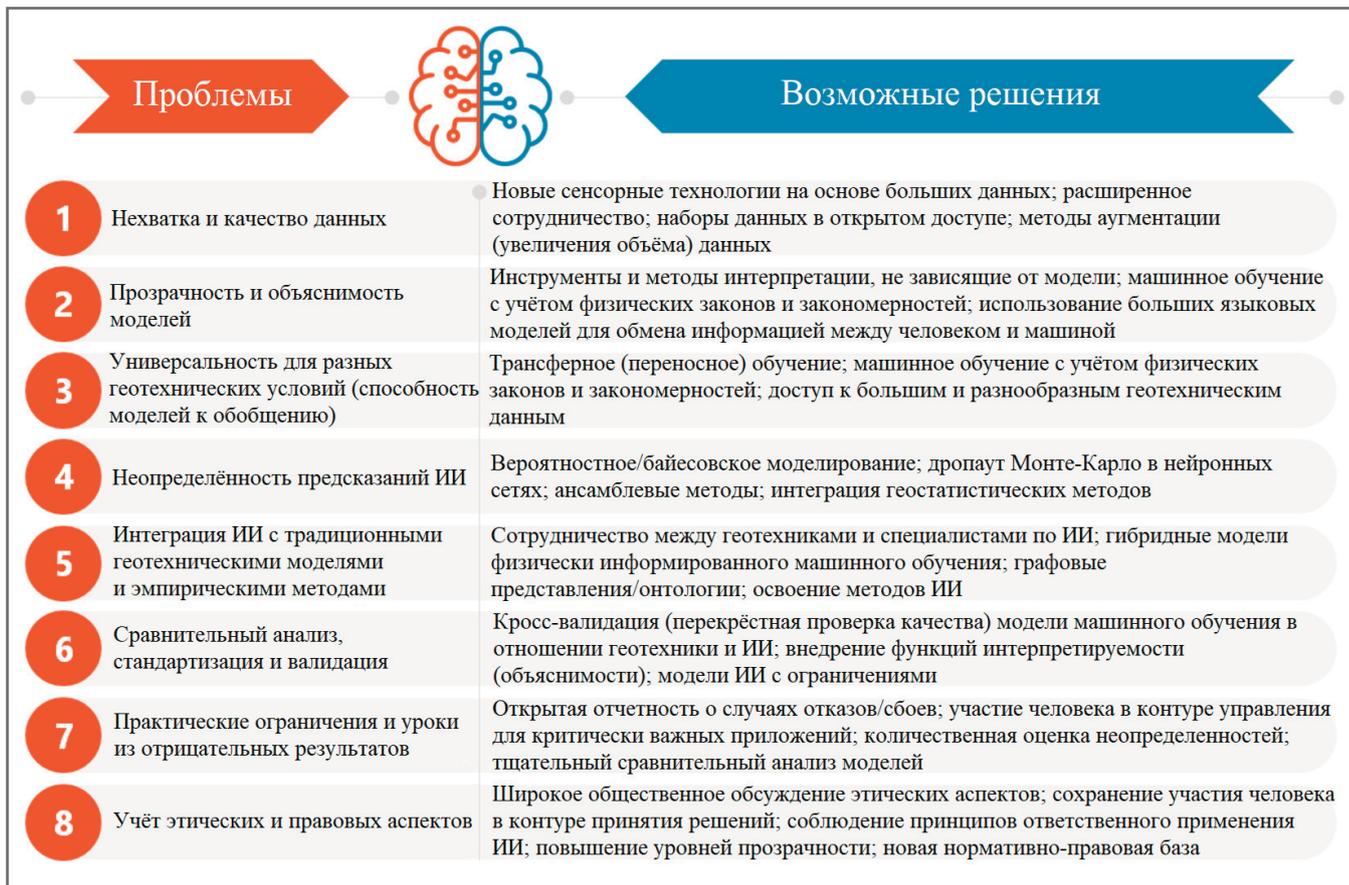


Рис. 6. Основные проблемы применения искусственного интеллекта в геотехнике и их возможные решения

предоставить информацию для моделей движения камнепадного материала [155]. На этом этапе для учета неопределенности измерений и природной вариабельности используется стохастический анализ, что приводит к сотням тысяч прогнозов модели (вычислительных экспериментов), для которых применение стандартных численных процедур было бы неосуществимым.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ГЕОТЕХНИКЕ ▶

На рисунке 6 показаны ключевые проблемы, препятствующие широкому внедрению искусственного интеллекта в геотехнику. Общее для них связано с тем, как методы использования ИИ в геотехнике вписываются в более широкий контекст инженерного освоения подземного пространства. Несмотря на то что существуют возможности для обмена данными и моделями с целью получения более целостного представления о подземной среде, для создания стандартизированной системы такого обмена требуются общие формализованные способы представления и структурирования знаний (онтологии) и со-

вместимость данных. Далее эти проблемы и возможные пути их решения рассматриваются подробнее.

Проблема 1: нехватка и качество данных ▶

Все процессы, основанные на данных, зависят от размера и качества учащей выборки. Поэтому одним из существенных препятствий для широкого применения ИИ в геотехнике является нехватка высококачественных, аннотированных и разнообразных данных. Наборы геотехнической информации требуют тщательного аннотирования, в ходе которого специалисты в соответствующей области присваивают данным «метки» с точными и подробными сведениями о свойствах грунтов, геологических особенностях и геотехнических параметрах, а также комментариями по процедурам испытаний.

Достоверно установлено, что ограниченная доступность данных оказывает существенное влияние на машинное обучение [156], повышая риск неточностей, слабой способности к обобщению и, в крайних случаях, ложных прогнозов, возникающих из-за переобучения.

Имеется настоятельная необходимость в установлении единых стандар-

тов оценки качества геотехнических данных с учетом различий в надежности испытаний, связанных с человеческим фактором, методами тестирования или используемыми приборами.

Недавно были предложены структурированные подходы к оценке качества данных при геотехническом мониторинге [157 и др.] – и стандарты обмена данными, такие как AGS и DIGGS, снова актуальны. В условиях недостатка данных разработчики моделей часто прибегают к вероятностным суррогатным моделям [9], к использованию аугментации (увеличения объема) данных с учетом специфики предметной области или к трансферному обучению (при котором модель, обученная для одной задачи, повторно используется для решения другой, связанной с первой).

Перспективное направление для решения рассматриваемой проблемы – объединение обученных моделей разных заинтересованных сторон, которое позволит преодолеть трудности, связанные с обменом данными в геотехническом сообществе. Обычно такой подход предполагает обучение общей модели на разных децентрализованных наборах данных, хранящихся у разных участников. При этом каждый владелец

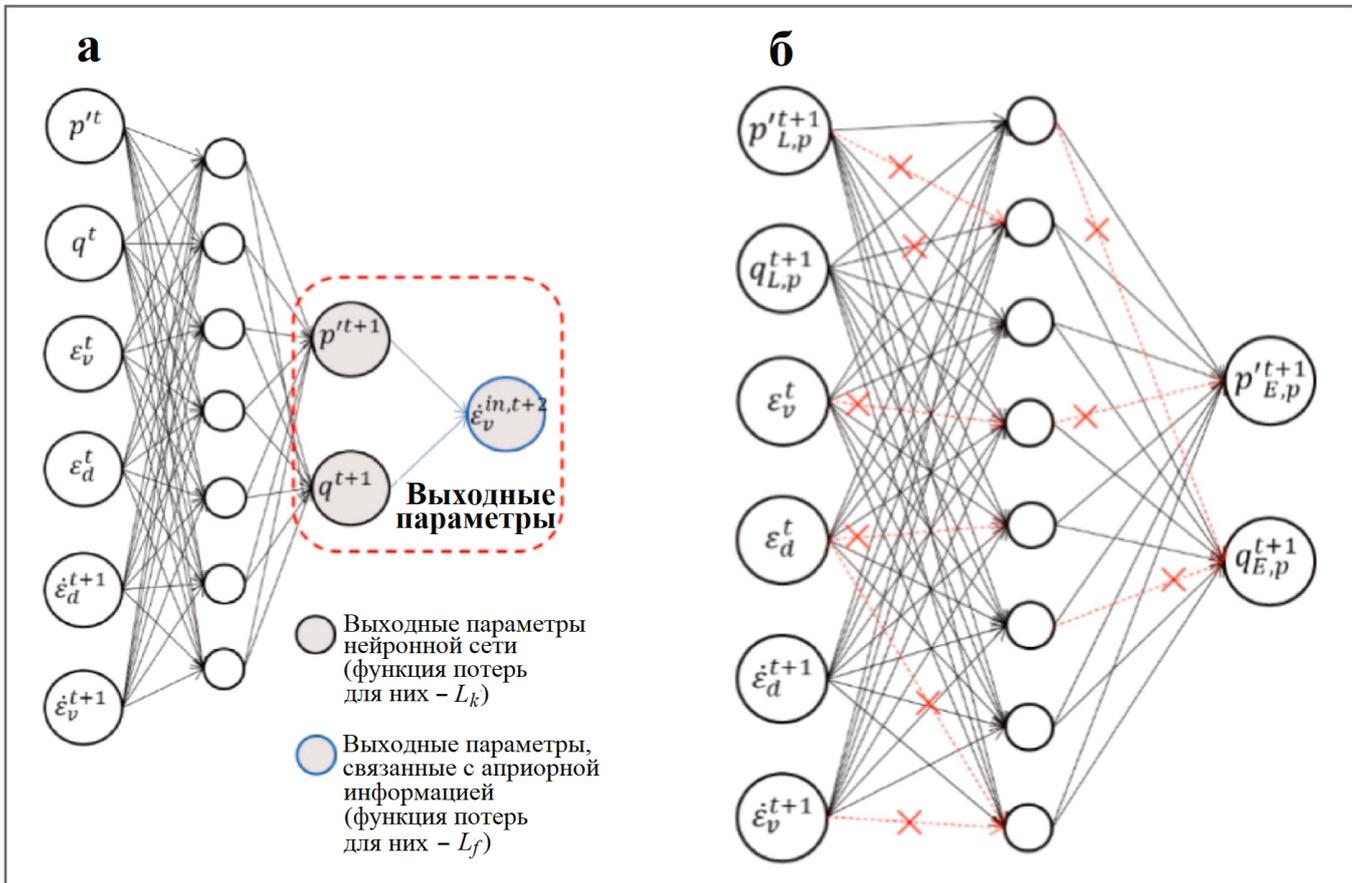


Рис. 7. Схема моделирования, принятая в работе Чжана и др. [163]: а – архитектура, показывающая входные параметры модели, а также взаимодействие между выходными параметрами нейронной сети и ограничениями, обусловленными законами физики (обведено красным), при использовании в данном примере инкрементального нелинейного моделирования; б – пример отключения части связей нейронной сети при дропауте по методу Монте-Карло (отключенные связи показаны красным)

данных обучает модель локально, а обмен осуществляется только обновлениями модели (но не исходными данными). Для координации обучения на разных площадках используется единый набор параметров и гиперпараметров. Данная стратегия также соответствует принципам операционных процессов машинного обучения (Machine Learning Operations, MLOps), которые обеспечивают отслеживаемое, воспроизводимое и масштабируемое управление моделями.

Проблему нехватки данных помогут смягчить и современные методы их сбора, например передовые сенсорные технологии (такие как распределенные волоконно-оптические датчики [158], беспроводные ячеистые сети [157]) и дистанционное зондирование (например, спутниковая интерферометрическая радиолокация с синтезированной апертурой (InSAR) [159]).

Также можно повысить доступность разнообразной информации путем совместных усилий по обмену анонимизированными наборами данных и по установлению стандартизированных форматов данных. Примером может по-

служить база данных испытаний свай на нагрузку DINGO [160].

Кроме того, для расширения существующих наборов данных могут применяться методы науки о данных, такие как аугментация данных, трансферное обучение и генерация синтетических данных. Это позволит моделям ИИ лучше обобщать информацию и эффективно работать при различных геотехнических сценариях, несмотря на изначальный недостаток данных.

Проблема 2. Прозрачность и объяснимость моделей ►

Алгоритмы искусственного интеллекта (в частности, глубокого обучения) часто воспринимаются как «черные ящики», которые практически не позволяют понять лежащие в их основе процессы принятия решений. В геотехнике, где прозрачность и понимание прогнозов моделей имеют решающее значение для обоснованного принятия решений, отсутствие объяснимости является серьезным препятствием.

Для решения этой проблемы требуются новые методы, позволяющие из-

влекать осмысленные сведения из сложных моделей ИИ. Например, для обучения модели на стандартах по геотехническому проектированию с целью проверки соответствия проектных решений нормативным требованиям может использоваться обработка естественного языка.

К дополнительным методам можно отнести: универсальные инструменты интерпретации, не зависящие от модели; анализ чувствительности; механизмы внимания, которые позволяют анализировать результаты работы модели и, как следствие, выявлять наиболее значимые факторы, влияющие на геотехнические прогнозы.

Перспективным направлением также является машинное обучение с учетом физических законов (физически информированное), которое позволяет интегрировать в модели ИИ знания по предметной области, что дает возможность использовать относительные преимущества моделей, основанных на физических законах, и методов, основанных на данных, для повышения как интерпретируемости, так и надежности прогнозов [161].

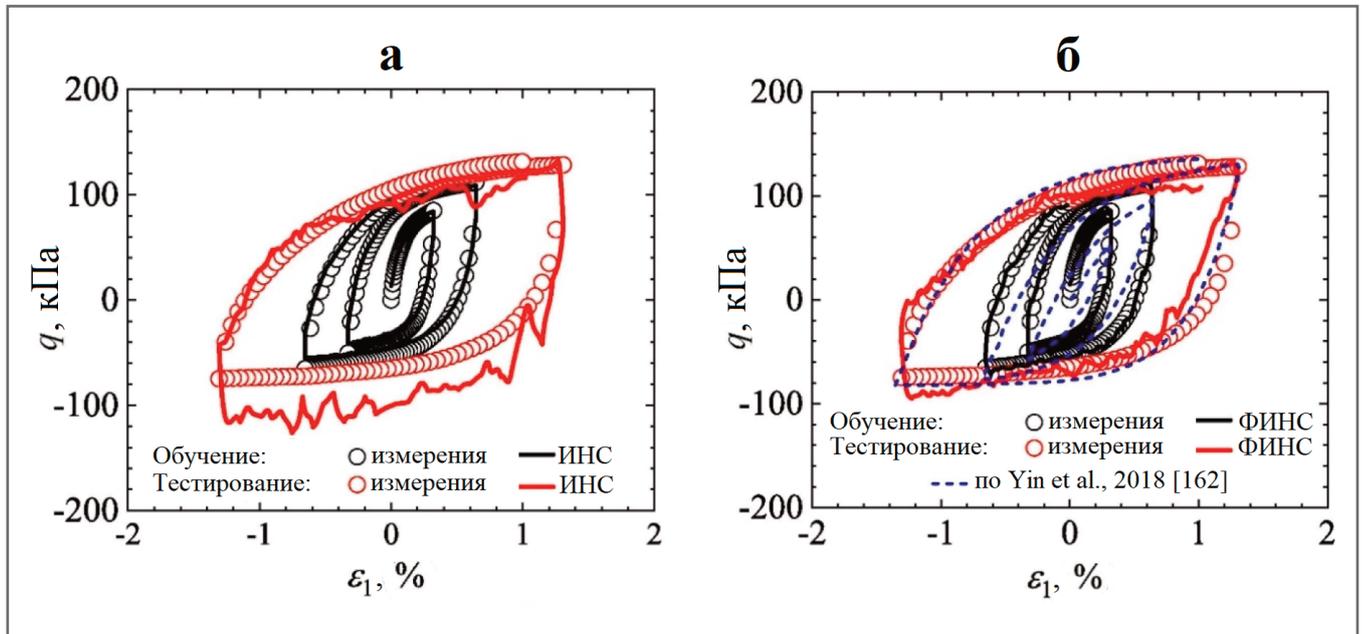


Рис. 8. Сопоставление прогнозов модели с результатами лабораторных испытаний на трехосное сжатие стандартного калибровочного кварцевого песка Тойура (добываемого в районе одноименного города на японском острове Хонсю) при использовании: а – искусственной нейронной сети (ИНС); б – нейронной сети, основанной на априорной информации, то есть физически информированной нейронной сети (ФИНС) [163]. Буквенные обозначения параметров: q – девиаторное напряжение, или разность между главным/осевым и боковым напряжениями ($\sigma_1 - \sigma_3$); ε_1 – относительная осевая деформация образца

Недавние успехи в создании физически информированных конститутивных моделей [162 и др.] также показывают, что к более достоверным прогнозам может приводить основанное на данных моделирование с ограничениями, обусловленными законами физики (физически ограниченное). Кроме того, может использоваться метод стохастического отключения узлов/нейронной сети (метод дропаута), причем не только в качестве регуляризатора во время обучения, но и для генерации стохастических выборок на этапе вывода с применением дропаута по методу Монте-Карло, иногда называемого просто дропаутом Монте-Карло. Среднее значение предсказаний и их дисперсия, соответственно, отражают наилучшую оценку и эпистемическую (вызванную неполнотой знаний) неопределенность выходных данных модели (рис. 7, 8).

Были предприняты целенаправленные усилия по повышению интерпретируемости моделей машинного обучения. Среди предложенных подходов можно в том числе выделить:

- декомпозицию модели [164], при которой сложные модели разбиваются на более простые и легко понимаемые компоненты;
- извлечение правил [165], когда сложные модели аппроксимируются более простыми моделями, построенными на основе правил типа «если, ...то»;

- оценку важности признаков [166], когда выделяются признаки, оказывающие наибольшее влияние на выходные данные модели, с помощью специальных методов, например технического инструмента для интерпретации моделей машинного обучения под названием SHAP (SHapley Additive exPlanations – «Аддитивные объяснения на основе значений Шепли»), который позволяет оценивать вклад каждого признака в конкретный прогноз модели;
- отчеты по модели [167], включающие документацию по ее разработке, эффективности и предполагаемых случаях применения с полным отслеживанием версий модели и истории разработки с помощью автоматизированных конвейеров полного цикла разработки и эксплуатации моделей машинного обучения (Machine Learning Operations pipelines – MLOps pipelines).

Проблема 3. Универсальность для разных геотехнических условий (способность моделей к обобщению) ►

Обобщение моделью закономерностей на основе данных по широкому спектру типов грунтов, геологических формаций и факторов окружающей среды является сложной задачей. Основная трудность заключается в создании моделей, которые не только хорошо работают на основе обучающих данных, но

и сохраняют надежность в случаях применения к новым условиям, по данным для которых не проводилось обучение.

Перспективное решение этой проблемы – использование методов трансферного обучения, когда модели, обученные на данных для одних геотехнических условий, на втором этапе корректируются (настраиваются) для адаптации к различным сценариям. Чжоу с соавторами [28] уже продемонстрировали эффективность таких подходов для определения границ между слоями грунтов: на первом этапе для предварительного обучения модели использовалась общедоступная исходная база данных, а на втором выполнялась ее донастройка на целевой базе данных, относящейся к конкретному участку (рис. 9).

Кроме того, благодаря машинному обучению с учетом физических законов (физически информированному) модели могут учитывать фундаментальные геотехнические механизмы, что обеспечивает надежную экстраполяцию на разные условия [163 и др.].

Решающее значение для повышения способности моделей к обобщению имеет также обеспечение как репрезентативности обучающих наборов данных, так и достаточного их разнообразия.

Преодоление рассматриваемой проблемы позволит создавать более универсальные и надежные модели ИИ, пригодные для широкого применения

на практике в целях решения реальных геотехнических задач.

Проблема 4. Неопределенность предсказаний искусственного интеллекта

Оценки неопределенности в геотехнике особенно необходимы из-за высокой цены, которую приходится платить за ошибки. Однако получение таких оценок с помощью моделей искусственного интеллекта остается сложным.

Надежные и научно обоснованные средства учета неопределенности можно получить с помощью вероятностного моделирования, основанного на байесовских методах машинного обучения. В частности, показано, что с моделированием геотехнической неопределенности на фундаментальном уровне можно хорошо справиться с использованием регрессии на основе гауссовского процесса [6, 9 и др.] (рис. 10). Даже для детерминированных моделей ИИ существуют методы оценки эпистемической (обусловленной недостатком знаний) неопределенности. Например, для нейронных сетей одним из наиболее распространенных методов проверки чувствительности выходных данных модели к ее конкретной архитектуре является дропаут по методу Монте-Карло. Имеются и такие популярные подходы, как ансамблевые методы, например бутстрэппинг (выборка с возвращением).

Разработка систем, в которых геостатистические методы интегрированы с моделями искусственного интеллекта, также позволит получить более полное представление о пространственных неопределенностях. Признание наличия и учет неопределенности грунтовых условий в прогнозах ИИ не только повысят доверие к таким геотехническим моделям, но и предоставят геотехникам и лицам, принимающим решения, ценную информацию для обоснованного выбора.

Проблема 5. Интеграция искусственного интеллекта с традиционными геотехническими моделями и эмпирическими методами

Несмотря на то что искусственный интеллект способен анализировать большие многомерные наборы геотехнических данных, для обеспечения точности и содержательности интерпретаций решающую роль играет включение профессиональных знаний и понимания контекста.

Не менее значимой задачей является обеспечение соответствия моделей ИИ

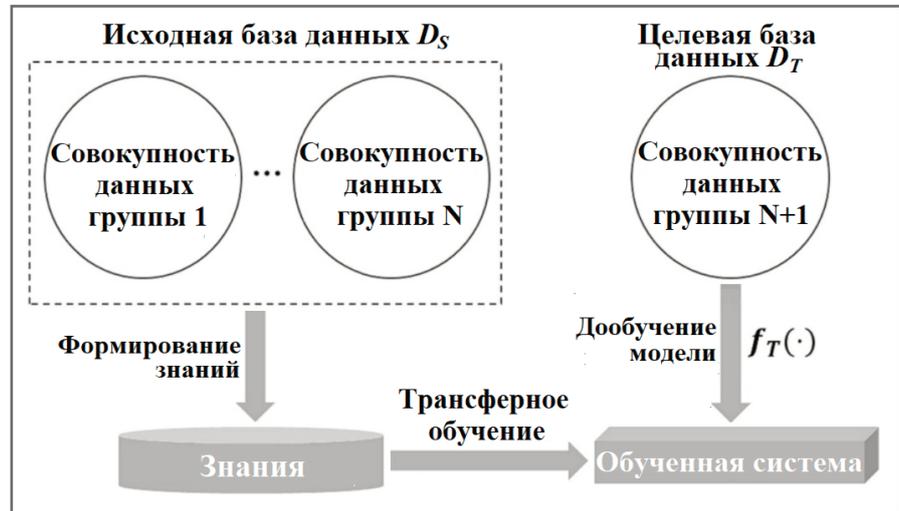


Рис. 9. Схема применения метода трансферного обучения для определения границ между слоями грунтов (по [28]). Буквенное обозначение: $f_T(\cdot)$ – функция дообучения модели на целевых данных (точка по центру строки в скобках используется вместо ее аргумента, который здесь не конкретизирован)

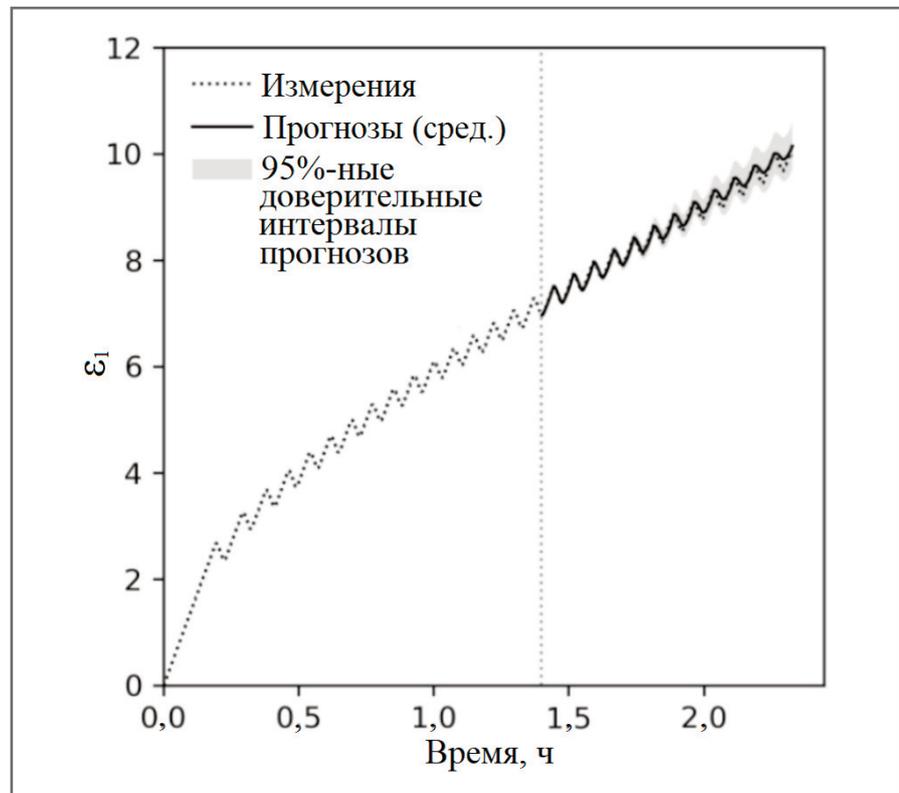


Рис. 10. Сопоставление относительных осевых деформаций (ϵ_s), измеренных при циклическом трехосном сжатии в недренированных условиях и спрогнозированных с помощью модели регрессии на основе гауссовского процесса с ковариационной функцией $LE+SE*PER$, где SE, LE и PER – экспоненциальная, квадратичная, линейная и периодическая компоненты ковариационной функции соответственно [9]

общепризнанным в геотехнике принципам, нормативно-правовым документам и теориям. Одним из перспективных направлений решения этой задачи может стать автоматизированная проверка соответствия проектных геотехнических решений, основанных на данных, требованиям нормативных документов [168 и др.].

Также необходим междисциплинарный подход, предполагающий сотрудничество между специалистами в сферах искусственного интеллекта и геотехники.

Сильные стороны методов, основанных на данных и базирующихся на знаниях физических законов, могут сочетаться в гибридных моделях, дающих более интерпретируемые (объяснимые)

и заслуживающие доверия результаты. Кроме того, можно явно задавать и объединять профессиональные знания в моделях ИИ с помощью графов знаний и онтологий.

В долгосрочной перспективе эффективное решение рассматриваемой проблемы, вероятно, потребует повышения квалификации современных геотехников, чтобы они могли анализировать не только данные, но и модели, основанные на этих данных. Крайне важно, чтобы решения на основе искусственного интеллекта вырабатывались в русле профессионального мышления и необходимых геотехнических знаний.

Проблема 6. Сравнительный анализ, стандартизация и валидация ▶

Вероятность возникновения переобучения и, как следствие, выдачи ложных прогнозов для алгоритмов искусственного интеллекта существенно выше, чем для традиционных проектных моделей, что объясняется их сильно нелинейными составляющими. В отличие от традиционных численных моделей, результаты работы которых проверяются с помощью упрощенных аналитических моделей в целях подтверждения их обоснованности, для алгоритмов ИИ может не быть подобного механизма валидации.

Валидация моделей ИИ в геотехнике обычно проводится с использованием k -кратной перекрестной проверки (по k подвыборкам) или с помощью тестирования на отложенной выборке, не участвовавшей в обучении. При этом для оценки способности к обобщению применяются такие показатели эффективности, как среднее квадратическое отклонение, коэффициент детерминации R^2 , средняя абсолютная ошибка, а также, все чаще, границы неопределенности (интервал возможной ошибки модели). Однако специфические для предметной области проблемы (например, автокорреляция геопространственных данных для участка изысканий) требуют особенно тщательной разработки методики валидации.

Внедрение искусственного интеллекта в геотехнику требует баланса между точностью, временем обучения и вычислительными ресурсами, которые также сильно зависят от настройки гиперпараметров. Основные параметры (например, скорость обучения, глубина архитектуры, параметры, отвечающие за регуляризацию) требуют систематической настройки, часто с использованием поиска по сетке гиперпараметров

(перебора их фиксированных комбинаций) или с помощью байесовского поиска (с применением байесовской вероятностной модели).

Простые модели (например, на основе деревьев решений или линейные) быстро обучаются даже на стандартных ноутбуках, тогда как модели глубокого обучения (например, для 3D данных или задач, интегрирующих в модель физические законы) могут требовать часов или дней работы даже с помощью высокопроизводительных графических процессоров (GPU). Процесс вывода прогнозов обычно проходит быстро, однако обучение может быть дорогостоящим для небольших организаций, если не использовать предварительно обученные модели или облачные сервисы.

Существующие геотехнические модели (например, модифицированная модель «Кэм-кэй» – Sam Clay) являются по своей сути детерминированными, давая согласованные результаты независимо от конкретных данных, использованных для обучения. Геотехники могут опираться на устоявшиеся принципы и математические формулы, лежащие в основе этих моделей, чтобы с высокой степенью уверенности прогнозировать поведение геотехнических материалов. Такая предсказуемость позволяет практикам понимать сильные и слабые стороны, а также области применения конкретной комплексной геомеханической (конститутивной) модели, что делает возможной ее эффективную валидацию путем сравнения ее прогнозов с экспериментальными или полевыми данными. Устойчивость и согласованность, присущие конститутивным моделям, являются ключевыми факторами их непреходящей ценности в геотехнике.

Напротив, модели ИИ, будучи основанными на данных и зависящими от разнообразных наборов данных, использованных при обучении, могут демонстрировать вариативность результатов, что затрудняет создание универсально надежной системы предсказаний.

Для решения этой проблемы необходимо создать основу для перекрестной проверки между выходными данными моделей ИИ и результатами использования традиционных геотехнических методов. Такой подход может включать применение искусственного интеллекта в качестве дополнительного инструмента, а не отдельного решения, что позволит постоянно сравнивать результаты с устоявшимися геотехническими знаниями.

Дополнительно поспособствовать выявлению потенциальных расхождений и

повысить доверие к результатам работы искусственного интеллекта в контексте геотехнической практики может интеграция в модели ИИ возможностей интерпретируемости, например алгоритмов, обеспечивающих объяснимость.

Еще одним эффективным решением являются ограничения моделей ИИ, обусловленные известными и общепринятыми теоретическими или эмпирическими концепциями.

Проблема 7. Практические ограничения и уроки из отрицательных результатов ▶

В опубликованных работах по применению искусственного интеллекта в геотехнике результаты исследований редко относят к неуспешным, однако в публикациях более широкого спектра фиксируются повторяющиеся типы неудач, которые явно следует признать. К ним относятся:

- переобучение на малых или однородных наборах данных;
- очень сильное снижение эффективности работы модели при изменении области ее применения (в случаях новых типов грунтов, траекторий напряжений или измерительных систем);
- утечка данных (например, попадание информации из тестовой или валидационной части данных в процесс обучения модели) при перекрестной валидации;
- ошибочно помеченные или неточно заданные цели обучения (типы выходных данных);
- галлюцинации или ложные рассуждения виртуальных помощников, использующих большие языковые модели;
- игнорирование важных для модели физических законов, приводящее к нереалистичным экстраполяциям [3, 9, 169–172].

Тенденция к публикации только положительных итогов затрудняет формирование полного и точного представления об эффективности работы моделей, что говорит о важности открытых и прозрачных сообщений о негативных результатах.

Таким образом, целесообразно выделить области, для которых на сегодняшний день могут быть предпочтительнее традиционные подходы:

1) принятие проектных решений, регулируемых нормативно-правовыми документами и/или аналитическими методами с использованием надежно подтвержденных запасов прочности;

2) проекты на основе крайне ограниченных или гетерогенных данных, когда

Тип модели	Описание
<p>5 Физические модели с обновлением на основе машинного обучения</p>	Модель основана на физических законах; машинное обучение используется только для обновления входных параметров для лучшей согласованности с наблюдениями
<p>4 Машинное обучение с ограничениями, основанными на законах физики (физически ограниченное)</p>	Физические законы встроены в архитектуру модели, поэтому физические ограничения соблюдаются строго
<p>3 Машинное обучение с учётом физических законов (физически информированное)</p>	Архитектура модели напоминает архитектуру традиционной модели, основанной на данных, за исключением того, что функции потерь теперь содержат слагаемые, основанные на физических законах; физические ограничения применяются в незначительной степени
<p>2 Предобученная модель машинного обучения</p>	Модель предварительно обучена на данных, сгенерированных физической моделью. Последующее обучение проводится без дополнительных ограничений
<p>1 Машинное обучение, полностью основанное на данных</p>	Нет ограничений, основанных на физических законах. Прогнозы модели строятся исключительно на основе обучающих данных

Рис. 11. Различные уровни применения ограничений, обусловленных законами физики, в моделях машинного обучения

проведение строгой валидации модели невозможно;

3) отчетная документация, подаваемая в регулирующие органы, которая требует полной прослеживаемости параметров;

4) экстраполяция и/или применение модели за пределами диапазона ее обучения (например, при новых геологических условиях или других схемах нагружения) в случае отсутствия встроенных в модель знаний о физических законах;

5) критически важные для безопасности решения в режиме реального времени, если границы неопределенности недоступны или не отслеживаются.

Проблема 8. Учет этических и правовых аспектов ▶

Модели искусственного интеллекта, которые основаны исключительно на данных, особенно подвержены преднамеренному воспроизведению искажений, которые присутствовали в обучающих данных. Также возможно, что ключевым вопросом в будущих судебных разбирательствах станет тема ответственности и подотчетности, что сыграет большую роль в формировании правового регулирования применения ИИ в геотехнике. Кажется крайне важным, чтобы геотехническое сообщество быстро и проактивно включилось в дискуссии по этическим аспектам, связанным с использованием технологий ИИ в преподавании, научных исследованиях и промышленной практике в отрасли.

Прежде всего следует отметить, что применение искусственного интеллекта

в геотехнике в обозримом будущем будет подразумевать участие человека в цикле принятия решений, то есть ИИ будет использоваться как инструмент, а не как полностью автономный агент.

Тем не менее потребуются руководящие принципы, определяющие ответственные подходы к применению искусственного интеллекта. Возможно также, что использование ИИ потребует значительно большей прозрачности, чтобы обеспечить интерпретируемость (объяснимость) прогнозов и удовлетворительный уровень подотчетности. Развивающееся правовое регулирование в этом направлении, вероятно, приведет к разработке нормативно-правовых документов и методических руководств, которые позволят сбалансировать технологические достижения с этическими соображениями.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ▶

Моделирование на основе искусственного интеллекта с ограничениями, связанными с законами физики ▶

Создание моделей ИИ с ограничениями, обусловленными законами физики (физически ограниченными), было определено как многообещающее решение многих упомянутых выше проблем и, следовательно, стало считаться одним из приоритетных путей. На рисунке 11 представлены различные уровни, на ко-

торых модели машинного обучения могут быть ограничены физическими принципами, – от полностью основанных на данных (без ограничений) до полностью основанных на физических моделях (но с обновлениями через машинное обучение). Например, на уровнях 3 и 4 физические ограничения могут вводиться соответственно в небольшой степени или строго. Это иллюстрирует рисунок 12 на примере нейронной сети.

Также стоит отметить, что последние достижения в области динамических моделей, основанных на данных, показали возможность решения с их помощью сложных физических задач при ограниченном объеме данных измерений [173 и др.].

Таким образом, степень, в которой модель должна быть ограничена физическими законами, будет зависеть от нескольких факторов, включая объем и качество обучающих данных, сложность моделируемой задачи, риск появления ложных прогнозов и степень признания соответствующих физических законов в геотехническом сообществе.

Недавние работы продемонстрировали применимость нейронных сетей, обучаемых с учетом физических законов (физически информированных) для решения ключевых геотехнических задач, таких как трехмерное обобщение теории консолидации Терцаги [174], прогнозирование несущей способности буровых свай [175], оценка фильтрации через противотрационные завесы [176] и др. Эти работы сообщают о точности в пределах $\pm 5\%$ по сравнению с

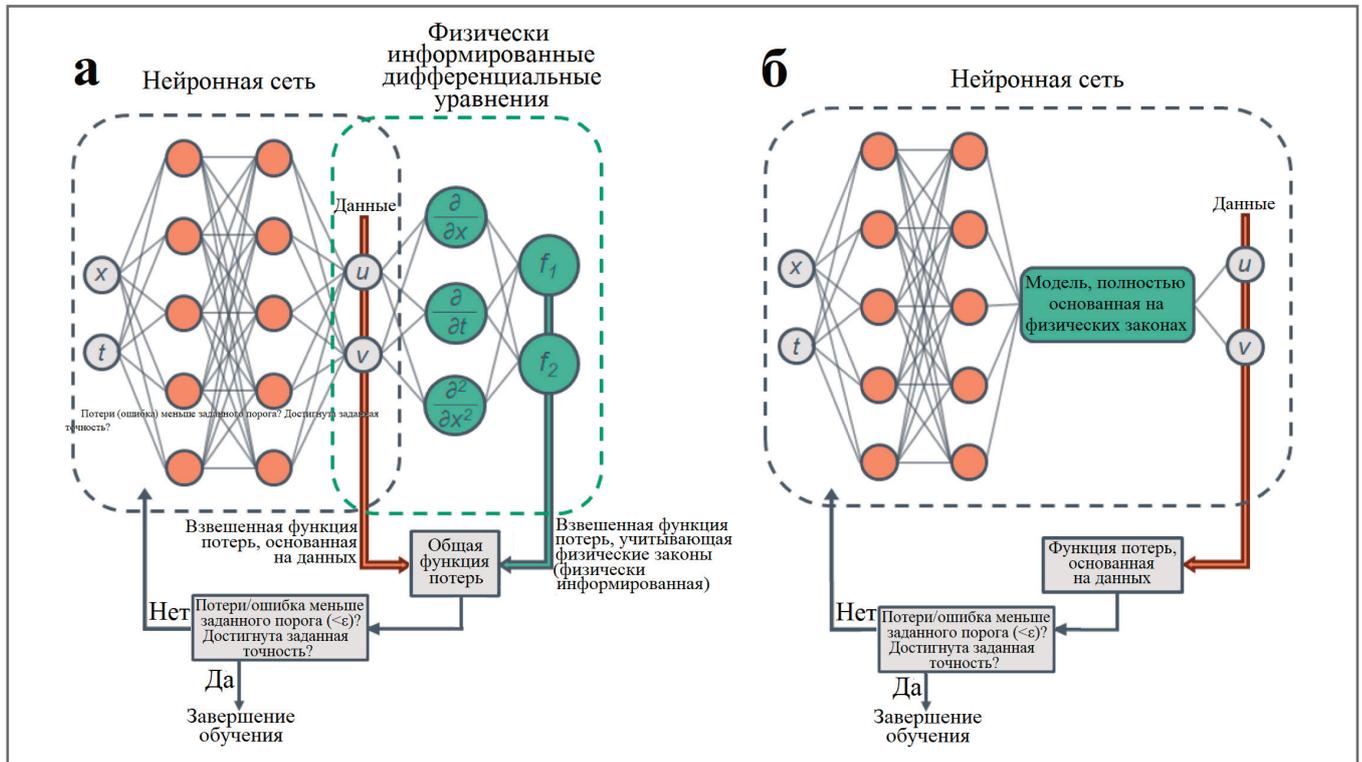


Рис. 12. Схематическое представление: а – модели машинного обучения, учитывающей физические законы, в которой физические ограничения применяются в незначительной степени (физически информированной модели); б – модели машинного обучения со строгими ограничениями, обусловленными физическими законами (физически ограниченной модели). *Примечание к рисунку «б»:* функция потерь, основанная на физических законах, встроена в модель и жестко контролирует обучение на каждом шаге в соответствии с физическими ограничениями и не зависит от проверки на выходе, поэтому в конце обучения проверяется только функция потерь, основанная на данных

Таблица 1. Примеры уровней точности для геотехники

Уровень точности/достоверности		Описание
Самый высокий	1	Высококачественные полевые измерения
	2	Высококачественные лабораторные измерения
	3	3D численный анализ (моделирование)
	4	2D численный анализ (моделирование)
	5	1D численный анализ (моделирование)
Самый низкий	6	Приблизительные эмпирические оценки

эталонными численными решениями проверенных моделей при многократном ускорении расчетов.

Моделирование с использованием разных уровней достоверности (многоуровневое) ►

Основная идея многоуровневого моделирования заключается в использовании:

1) наборов данных с низкими уровнями достоверности, таких как упрощенные аналитические зависимости или численные модели, которым может до некоторой степени не хватать

точности, но которые позволяют сформировать большие обучающие выборки при минимальных вычислительных затратах;

2) наборов данных с высокими уровнями достоверности, таких как результаты полевых и/или лабораторных измерений, обладающих наибольшей точностью, но недостаточных для обучения ИИ из-за их, как правило, ограниченных объемов и высокой стоимости получения (таблица 1).

Также следует отметить, что в рамках этой общей классификации уровней точности/достоверности есть дополнительные подклассы (например, подклассы

внутри первого уровня точности выделяют в зависимости от типа испытания и типа материала). Многоуровневые модели могут принимать различные формы, но обычно они включают обучение одной модели на данных низкой достоверности и привлечение другой модели для изучения взаимосвязей между наборами данных низкого и высокого уровней точности, как показано на рисунке 13.

Хотя на рисунке 13 для наглядности представлен всего лишь двухэтапный процесс, в современных методах многоуровневого моделирования часто используются более сложные взаимодей-

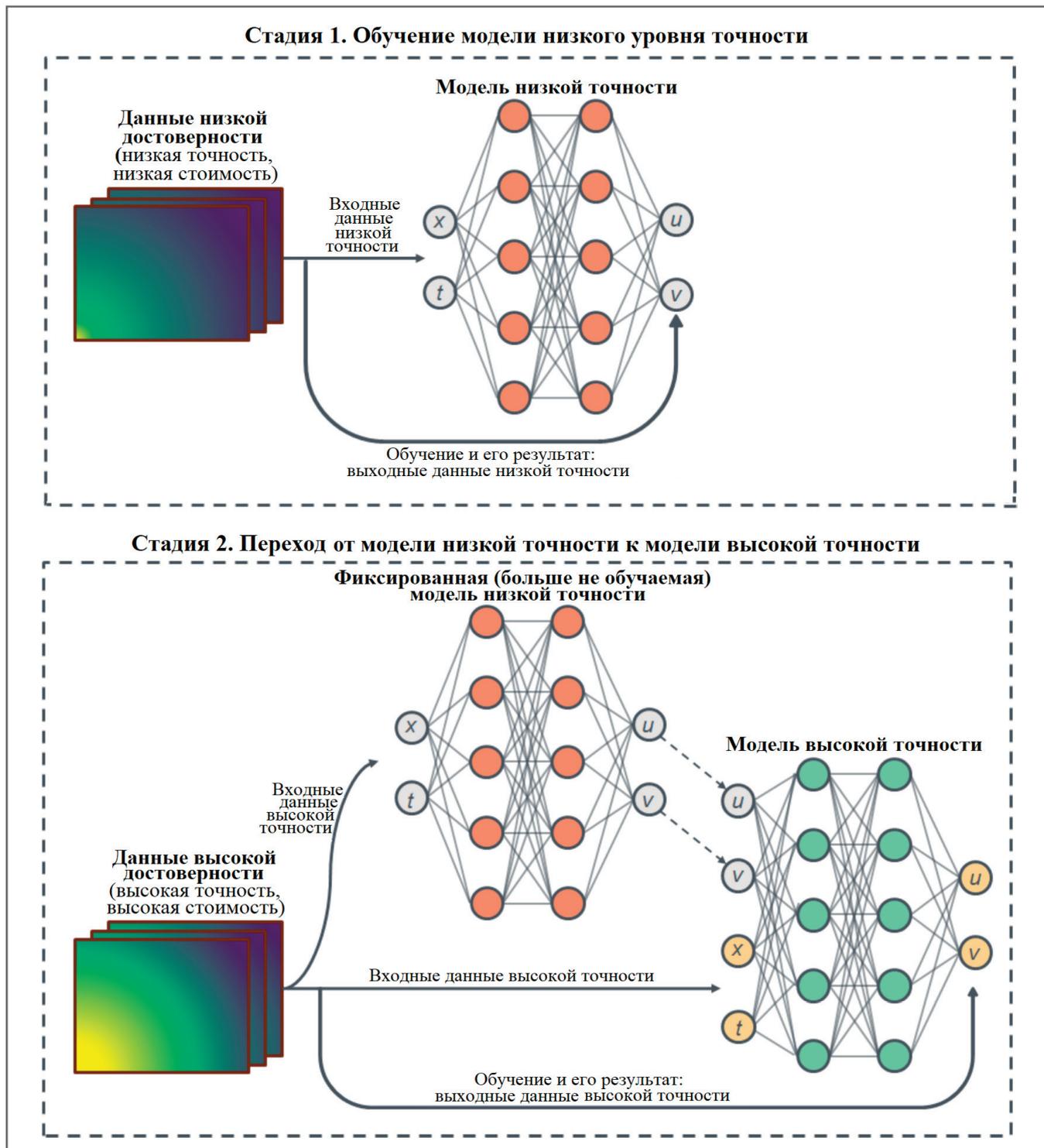


Рис. 13. Схема упрощенного примера последовательного моделирования с разными уровнями точности/достоверности (двухэтапного)

ствия. Распространены следующие способы усовершенствования:

1) совместное обучение (когда две модели или более обучаются параллельно, обмениваясь информацией о своих предсказаниях, чтобы улучшить свою обобщающую способность и общую эффективность) или иерархическое обучение на остаточных ошибках/поправках (когда модель высокой точности рекурсивно обучается на корректировках выходных данных модели низкой точности, постепенно повышая точность через иерархическую последовательность корректировок) [177 и др.];

2) методы байесовского слияния данных (с последовательным обновлением вероятностных оценок о параметрах модели по мере поступления новых данных на основе теоремы Байеса), учитывающие неопределенность моделей низкой и высокой точности при формировании комбинированного предсказания [178 и др.];

3) глубокие нейросети (архитектура глубокого обучения) для многоуровневого моделирования, которые одновременно для всех уровней достоверности обучаются преобразованиям выходных данных модели низкой точности в высокоточные предсказания в рамках одной сети [179 и др.];

4) итеративные петли обратной связи, когда этапы обучения проходятся пошагово с многократными повторениями и обратной связью на каждом

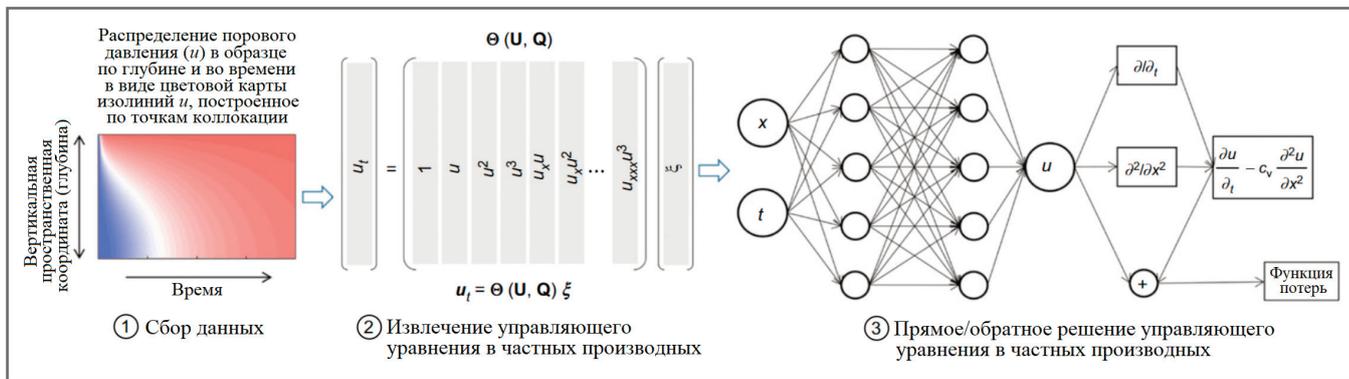


Рис. 14. Пример извлечения закономерностей, соответствующих теории консолидации Терцаги, на основе данных с использованием физически информированных нейронных сетей [186]

этапе, для повышения согласованности моделей и калибровки границ неопределенности [180 и др.].

Эти передовые подходы обеспечивают более надежную способность моделей к обобщению и количественную оценку уверенности в предсказаниях при решении сложных геотехнических задач. Направления дальнейшего развития этой области могут включать:

- усовершенствование методов для согласованного объединения моделей разной точности;
- оптимизацию их интеграции с помощью алгоритмов машинного обучения;
- разработку адаптивных стратегий, динамически распределяющих вычислительные ресурсы в зависимости от требований конкретной задачи.

Недавние достижения в области геотехники включают:

- многоуровневую нейронную сеть DeerONet, которая объединяет процессно-ориентированные модели на основе метода конечных элементов (с низкой достоверностью) с разреженными данными полевого мониторинга (с высокой достоверностью) для прогнозирования осадок при механизированной проходке тоннелей в реальном времени [179];
- многомасштабную генеративно-сопоставительную нейронную сеть (Generative Adversarial Network, GAN), которая строит разрезы подповерхностной среды по смешанным наборам данных изысканий с низкой и высокой точностью [181];
- физически информированные многоуровневые остаточные нейронные сети, которые используют механистические модели (основанные на законах механики) и лабораторные данные в ограниченном объеме для моделирования гидромеханических реакций грунтов и их механического поведения, описываемого конститутивными моделями [182–184].

Извлечение знаний ▶

Извлечение знаний на основе данных откроет большие перспективы для трансформации геотехники. Двумя наиболее распространенными методами в этой сфере являются динамическое моделирование на основе данных [185] и машинное обучение с учетом физических закономерностей (физически информированное).

Например, Чжан с коллегами [186] недавно продемонстрировали способность физически информированного машинного обучения самостоятельно извлекать закономерности, соответствующие теории консолидации Терцаги, непосредственно на основе данных, полученных при испытаниях на консолидацию. На рисунке 14 представлена схема процесса обратного моделирования с помощью физически информированной нейронной сети, где сначала на основе данных извлекается управляющее уравнение в частных производных (описывающее поведение процесса) а затем оно решается для определения неизвестных параметров (в данном случае коэффициентов консолидации). Этот процесс является итеративным и использует физически информированную функцию потерь, что позволяет минимизировать ошибку предсказания во всей исследуемой пространственно-временной области.

По мере расширения доступа к геотехническим данным будут открываться все новые возможности извлечения новых представлений, принципов и механических закономерностей из сложных геотехнических процессов, которые в настоящее время описываются только эмпирическими методами.

Создание цифровых двойников ▶

Согласованная интеграция цифровых моделей с информацией о рабочих про-

цессах и поведении физических систем позволяет создавать цифровые копии реальных объектов в реальном времени (цифровых двойников) для возможности моделирования и прогнозирования разных сценариев. Цифровой двойник постоянно обновляется, сохраняя актуальность, на основе данных, получаемых от физических датчиков, что позволяет проводить диагностику состояния объекта и его виртуальный контроль. Алгоритмы машинного обучения обеспечивают автономные обновления и прогнозы, делая создание цифровых двойников важнейшим подходом для будущей роботизации и автоматизации работ на строительных площадках. В геотехнике это направление будет развиваться в сторону интегрированных цифровых двойников, объединяющих модели грунтовых оснований, фундаментов, инженерных сетей и сооружений, что позволит формировать целостное понимание взаимодействий и взаимозависимостей в общей системе (рис. 15).

В последнее время начинается работа по внедрению в практику цифровых двойников для подземных и геотехнических систем. Связанные с этим исследования в области гражданской инфраструктуры (например, создание цифрового двойника железнодорожного моста, снабженного системой мониторинга, на основе статистического метода конечных элементов [3]) демонстрируют возможность использования методов интеграции данных и физических знаний с учетом неопределенностей также и в геотехнике. Так, Латиф с соавторами [171] осуществили потоковую передачу эксплуатационных данных цифровому двойнику на базе машинного обучения для прогнозирования характеристик и визуализации проходки тоннеля в реальном времени. Аподжи с коллегами [187] представили концеп-

цию уровней принятия решений с использованием искусственного интеллекта для будущих механизированных тоннелепроходческих работ на основе анализа больших данных. Чжао с соавторами [188] исследовали, как функции цифровых двойников могут поддерживать процессы строительства, обеспечения безопасности и управления жизненным циклом тоннелей.

Человеко-машинное взаимодействие с использованием больших языковых моделей ▶

Большие языковые модели (например, GPT-4) обладают значительным потенциалом для развития взаимодействия человека с алгоритмами ИИ в геотехнике. Развив подходы, заложенные в более ранних моделях обработки естественного языка, они способны извлекать из текстов более глубокие знания и открывают новые возможности для сотрудничества специалистов с искусственным интеллектом. Интерфейсы, основанные на больших языковых моделях, обещают сделать применение таких систем более интуитивным и динамичным (например, рис. 16).

Однако универсальные (для широкого спектра задач) большие языковые модели часто имеют затруднения при ответах на специализированные геотехнические запросы, выходящие за рамки данных, использованных на этапе предварительного обучения. Это ограничение можно преодолеть с помощью малозатратной доработки модели или генерации текста с помощью расширенного поиска и извлечения информации (Retrieval-Augmented Generation, RAG) из специализированного корпуса/набора текстов, сформированного и периодически обновляемого группой специалистов.

Первые исследования в этом направлении показали, что большая языковая модель GPT-4 способна отвечать на вопросы учебного уровня по геотехнике с точностью около 70% и составлять проекты технических заданий на инженерно-геологические изыскания [189]. Кумар [172] продемонстрировал достоверную интерпретацию геотехнических данных с использованием тщательно разработанных запросов, а Сюй с коллегами [190] представили GeoLLM – специализированную большую языковую модель, дообученную для интеллектуальной автоматизации геотехнического проектирования. В недавних исследованиях также рассматривается применение методов на основе больших языковых моделей,

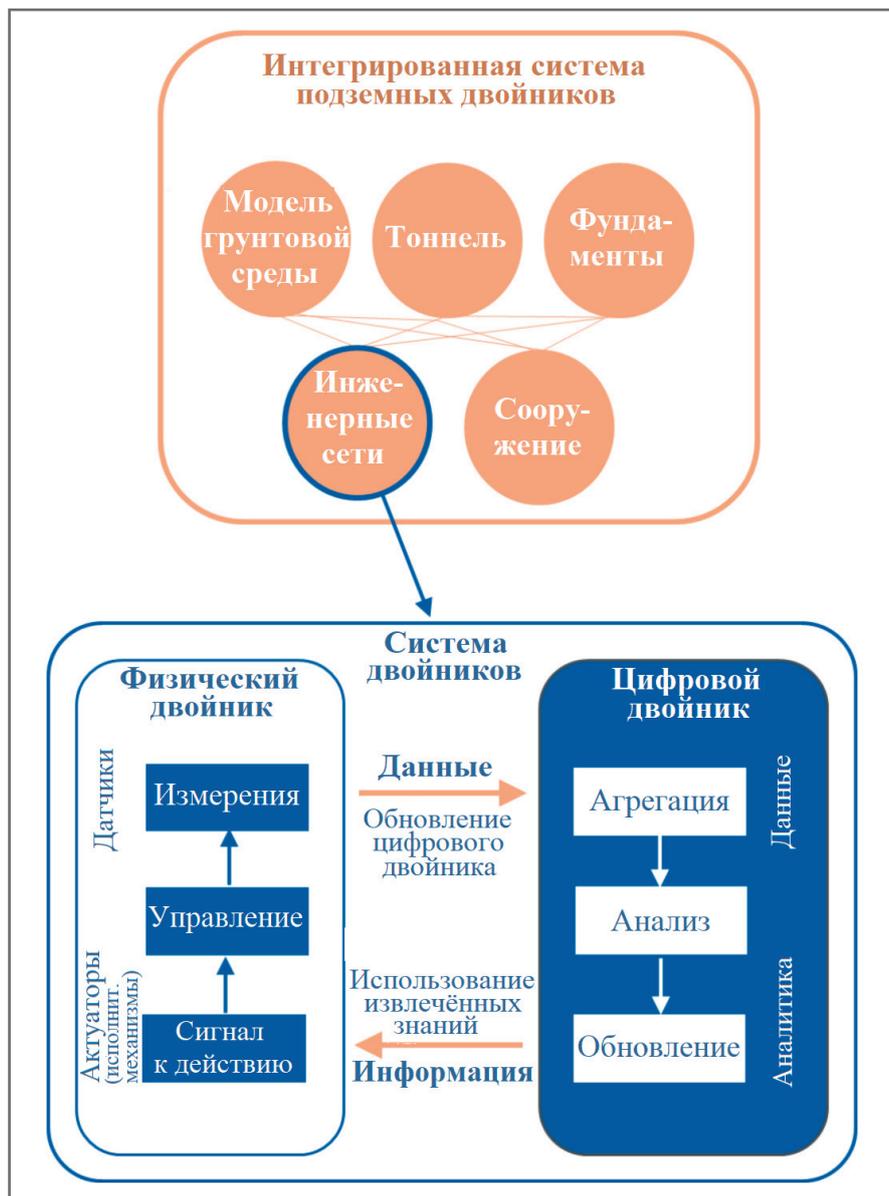


Рис. 15. Схема работы интегрированной системы подземных двойников

например генерации текста с использованием расширенного поиска (RAG) и обучения на небольшом числе примеров, для решения различных задач геотехнического проектирования, включая планирование организации работ на строительной площадке [191], геологическое моделирование [192] и проектирование фундаментов [193]. Эти работы подтверждают практический потенциал больших языковых моделей, в то же время подчеркивая необходимость управления проблемами, связанными с качеством запросов и с возможными «галлюцинациями» модели.

Генеративное моделирование (моделирование с генерацией данных) ▶

Генеративный искусственный интеллект, основанный на генеративно-соста-

зательных сетях [194] и получивший дальнейшее развитие с помощью генеративных моделей на основе диффузии (диффузионных) [195], открывает для геотехники три основные возможности.

Во-первых, он может генерировать реалистичные синтетические наборы данных, что способствует улучшению многоуровневого моделирования и численных расчетов.

Во-вторых, генеративный ИИ способен автоматизированно осуществлять процессы проектирования с учетом ограничений, позволяя быстро исследовать и оценивать результаты геотехнического планирования, сокращать итерационные циклы и находить новые решения.

В-третьих, обучаясь на исторических и специфичных для конкретной строительной площадки данных, генератив-



Рис. 16. Концептуальная схема интерфейса на основе большой языковой модели для взаимодействия между человеком и системой искусственного интеллекта

ные модели могут предсказывать потенциальные сценарии разрушений/отказов и обеспечивать информацией разработку проактивных стратегий снижения рисков.

В совокупности эти возможности открывают путь к еще более инновационной геотехнической практике, более быстрому и безопасному выполнению работ в отрасли.

Среди недавних адаптаций для геотехнической отрасли – генеративно-состязательная нейросеть SchemaGAN [196], которая создает правдоподобные геотехнические модели подповерхностной среды на основе разреженных данных статического зондирования конусом (СРТ) и превосходит по достоверности результаты применения метода интерполяции, основанного на кригинге.

Чжоу и Ши [181] при построении двумерных разрезов применили многомасштабную генеративно-состязательную нейросеть для объединения данных изысканий различной степени достоверности, что позволило значительно снизить среднеквадратическую ошибку по сравнению с классическими методами инверсии.

Для задач анализа временных рядов данных Ге с соавторами [197] представили RGAN-LS – рекуррентную генеративно-состязательную нейросеть, которая увеличивает объем ограниченных данных по смещениям и повышает точность прогнозирования движения оползней в «слепых» тестах (с заранее не известными исходными данными или ответами) на величину вплоть до 18%.

Обучение моделей преобразования данных (операторов) и графовые модели ▶

Для решения задач вычислительной механики недавно были адаптированы

фреймворки нейронных операторов, то есть платформы для обучения нейронных моделей преобразования данных, такие как Wavelet Neural Operator (нейронный оператор с использованием вейвлет-преобразований) и Physics-Informed Geometry-Aware Neural Operator (нейронный оператор с учетом физических законов и геометрических параметров). Они обеспечили ускорение вычислений, не связанное с размером или детализацией сетки дискретизации пространства, в 50–100 раз по сравнению с методом конечных элементов и в то же время позволили сохранить согласованность с физическими законами [198, 199].

Одновременный прогресс в разработке вычислительных моделей (симуляторов) на основе графовых нейронных сетей позволяет эффективно рассчитывать поведение гранулярных потоков на уровне отдельных частиц. Например, Цзян с соавторами [200] показали, что такие симуляторы способны точно прогнозировать динамику разрушения гранулярных тел и эффективно оптимизировать параметры метода дискретных элементов. При одном из более поздних исследований дифференцируемая суррогатная (замещающая) модель на основе нейросети воспроизвела динамику сползания слагавшего склон многослойного грунтового массива в 145 раз быстрее по сравнению с методом материальной точки, при этом поддерживая возможность обратного определения параметров модели [201].

Эти подходы, основанные на обучении моделей преобразования данных (операторов) и на графовых моделях (графовых симуляторах), открывают путь к созданию многомасштабных дифференцируемых вычислительных моделей геомеханических систем в реальном времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ▶

В данной статье описан потенциал внедрения искусственного интеллекта в геотехнику, обусловленного необходимостью решения трудных задач, возникающих при сложных взаимодействиях инженерных сооружений, грунтов, подземных вод и других элементов окружающей среды. Освещены недавние достижения в популярных направлениях применения ИИ в геотехнике, включая интеллектуальные инженерные изыскания, моделирование поведения грунтов и оптимизацию процессов геотехнического проектирования. Также продемонстрировано, как технологии искусственного интеллекта уже способствуют созданию более точных прогнозных моделей и упрощению рабочих процессов. С помощью приведенных примеров наглядно показано, что ИИ способен приносить ощутимую пользу отрасли уже сегодня.

Однако выявлено несколько характерных для геотехники ключевых проблем, которые надо решить, чтобы полностью реализовать потенциал использования в ней искусственного интеллекта. Важнейшей проблемой остается нехватка данных, которая может препятствовать машинному обучению моделей из-за сложных взаимодействий в любом геотехническом проекте. Сложность корректного применения ИИ в геотехнике также связана с объяснимостью моделей, их универсальностью (адаптацией к разным условиям) и учетом факторов неопределенности. Критически важно объединить технологии искусственного интеллекта с традиционными геотехническими моделями, а также создать эталонные тесты и критерии оценки моделей, чтобы обеспечить согласованность моделей ИИ с существующими геотехническими знаниями.

ми, преодолеть возможные несоответствия и повысить доверие геотехнического сообщества к такой интеграции.

И наконец, в статье рассмотрены приоритетные направления развития технологий искусственного интеллекта в геотехнике, включая человеко-машинное взаимодействие с использованием больших языковых моделей, моделирование с разными уровнями достоверности, извлечение знаний, создание цифровых двойников, генеративные модели, обучение моделей преобразования данных (операторов), графовые модели (графовые симуляторы).

Для достижения прогресса в этой области в соответствии с существующими геотехническими принципами, по мнению авторов, необходим междисциплинарный подход, предполагающий сотрудничество между исследователями в области ИИ и геотехниками.

Этические аспекты, в частности вопросы необъективности и подотчетности, говорят о важности ответственного использования искусственного интеллекта в рамках правового поля. **И**

Данная работа в первоначальном виде была представлена на Первом симпозиуме по применению искус-

ственного интеллекта в геотехнике, проведенном в мае 2023 года в городе Глазго (Великобритания). Это мероприятие было организовано с финансовой поддержкой гранта британского Национального института имени Алана Тьюринга по развитию анализа данных и искусственного интеллекта (Alan Turing Development Award) при софинансировании со стороны Фонда ускорения внедрения результатов исследований Научного совета по инженерным и физическим наукам Великобритании (EPSRC Impact Acceleration Account) при Университете Глазго.

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Sheil B., Anagnostopoulos C., Buckley R., Ciantia M.O., Febrianto E., Fu J., Gao Z., Geng X., Gong B., Hanley K., He P., Kolomvatsos K., Lopes B.C.F.L., Ninic J., Previtali M., Rezanian M., Ruiz-Lopez A., Sun J., Suryasentana S., Taborda D., Utili S., Whyte S., Zhang P. Artificial intelligence transformations in geotechnics: progress, challenges and future enablers // *Computers and Geotechnics*. Elsevier, 2026. Vol. 189. Article 107604. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107604> (in press).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

(REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED PAPER) ►

- Jiang F., Jiang Y., Zhi H., Dong Y., Li H., Ma S., Wang Y., Dong Q., Shen H., Wang Y. Artificial intelligence in healthcare: past, present and future // *Stroke Vascular Neurol*. 2017. Vol. 2. № 4.
- Goodell J.W., Kumar S., Lim W.M., Pattnaik D. Artificial intelligence and machine learning in finance: identifying foundations, themes, and research clusters from bibliometric analysis // *J. Behav. Exp. Financ*. 2021. Vol. 32. Article 100577.
- Febrianto E., Butler L., Girolami M., Cirak F. Digital twinning of self-sensing structures using the statistical finite element method // *Data-Centric Eng*. 2022. Vol. 3. № e31.
- Sun F., Febrianto E., Fernando H., Butler L., Cirak F., Hoult N. Data-informed statistical finite element analysis of rail buckling // *Comput. Struct*. 2023. Vol. 289. Article 107163.
- Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need // *Adv. Neural Informat. Process. Syst*. 2017. Vol. 30.
- Sheil B.B., Suryasentana S.K., Cheng W.C. Assessment of anomaly detection methods applied to microtunneling // *J. Geotech. Geoenviron. Eng*. 2020. Vol. 146. № 9. Article 04020094.
- Sheil B.B., Suryasentana S.K., Mooney M.A., Zhu H. Machine learning to inform tunnelling operations: recent advances and future trends // *Proc. Inst. Civil Eng. – Smart Infrastruct. Constr*. 2020. Vol. 173. № 4. P. 74–95.
- Stuyts B., Suryasentana S.K. Applications of data science in offshore geotechnical engineering: state of practice and future perspectives // 9th International SUT OSIG Conference. 2023.
- Suryasentana S.K., Sheil B.B. Demystifying the connections between Gaussian process regression and kriging // 9th International SUT OSIG Conference. 2023. P. 1–8.
- Russell S.J., Norvig P. *Artificial intelligence: a modern approach*. London, 2010.
- MacKay D.J.C. *Information Theory, Inference and Learning Algorithms*. Cambridge University Press, 2003.
- Kennedy M.C., O'Hagan A. Bayesian calibration of computer models // *J. R. Stat. Soc. Ser. B (Stat Methodol.)*. 2001. Vol. 63. P. 425–464.
- Girolami M., Febrianto E., Yin G., Cirak F. The statistical finite element method (statFEM) for coherent synthesis of observation data and model predictions // *Comput. Methods Appl. Mech. Eng*. 2021. Vol. 375. Article 113533.
- Hu J.Z., Zhang J., Huang H.W., Zheng J.G. Value of information analysis of site investigation program for slope design // *Comput. Geotech*. 2021. Vol. 131. Article 103938.
- Zhao T., Wang Y. Determination of efficient sampling locations in geotechnical site characterization using information entropy and Bayesian compressive sampling // *Can. Geotech. J*. 2019. Vol. 56. № 11. P. 1622–1637.
- Yoshida I., Tasaki Y., Tomizawa Y. Optimal placement of sampling locations for identification of a two-dimensional space // *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 2022. Vol. 16. № 1. P. 98–113.

17. Li J., Cassidy M.J., Huang J., Zhang L., Kelly R. Probabilistic identification of soil stratification // *Geotechnique*. 2016. Vol. 66. № 1. P. 16–26.
18. Wang Y., Huang K., Cao Z. Probabilistic identification of underground soil stratification using cone penetration tests // *Can. Geotech. J.* 2013. Vol. 50. № 7. P. 766–776.
19. Houlsby N.M.T., Houlsby G.T. Statistical fitting of undrained strength data // *Geotechnique*. 2013. Vol. 63. № 14. P. 1253–1263.
20. Ching J., Wang J.-S., Juang C.H., Ku C.-S. Cone penetration test (CPT)-based stratigraphic profiling using the wavelet transform modulus maxima method // *Canadian Geotechnical J.* 2015. Vol. 52. № 12. P. 1993–2007.
21. Suryasentana S.K., Lawler M., Sheil B.B., Lehane B.M. Probabilistic soil strata delineation using DPT data and Bayesian changepoint detection // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2023. Vol. 149. № 4. Article 06023001.
22. Wang Y., Hu Y., Zhao T. Cone Penetration test (CPT)-based subsurface soil classification and zonation in two-dimensional vertical cross section using Bayesian compressive sampling // *Can. Geotech. J.* 2020. Vol. 57. № 7. P. 947–958.
23. Cao Z.J., Zheng S., Li, D.Q., Phoon K.K. Bayesian identification of soil stratigraphy based on soil behavior type index // *Can. Geotech. J.* 2019. Vol. 56. № 4. P. 570–586.
24. Gong W., Zhao C., Juang C.H., Tang H., Wang H., Hu X. Stratigraphic uncertainty modelling with random field approach // *Comput. Geotech.* 2020. Vol. 125. Article 103681.
25. Shuku T., Phoon K.K., Yoshida I. Trend estimation and layer boundary detection in depth-dependent soil data using sparse Bayesian lasso // *Comput. Geotech.* 2020. Vol. 128. Article 103845.
26. Hegazy Y.A., Mayne P.W. Objective site characterization using clustering of piezocone data // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2002. Vol. 128. № 12. P. 986–996.
27. Zhao T., Wang Y. Interpolation and stratification of multilayer soil property profile from sparse measurements using machine learning methods // *Eng. Geol.* 2020. Vol. 265. Article 105430.
28. Zhou X., Shi P., Sheil B., Suryasentana S. Knowledge-based U-Net and transfer learning for automatic boundary segmentation // *Adv. Eng. Inf.* 2024. Vol. 59. Article 102243.
29. Suryasentana S.K., Sheil B.B., Lawler M. Assessment of Bayesian changepoint detection methods for soil layering identification using cone penetration test data // *Geotechnics*. 2024. Vol. 4. № 2. P. 382–398.
30. Firouziandbandpey S., Ibsen L.B., Griffiths D.V., Vahdatirad M.J., Andersen L.V., Sørensen J.D. Effect of spatial correlation length on the interpretation of normalized CPT data using a kriging approach // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2015. Vol. 141. № 12. Article 04015052.
31. Cai Y., Li J., Li X., Li D., Zhang L. Estimating soil resistance at unsampled locations based on limited CPT data // *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2019. Vol. 78. P. 3637–3648.
32. He X., Xu H., Sabetamal H., Sheng D. Machine learning aided stochastic reliability analysis of spatially variable slopes // *Comput. Geotech.* 2020. Vol. 126. Article 103711.
33. Rahman M.H., Abu-Farsakh M.Y., Jafari N. Generation and evaluation of synthetic cone penetration test (CPT) data using various spatial interpolation techniques // *Can. Geotech. J.* 2021. Vol. 58. № 2. P. 224–237.
34. Wang Y., Zhao T. Statistical interpretation of soil property profiles from sparse data using Bayesian compressive sampling // *Geotechnique*. 2017. Vol. 67. № 6. P. 523–536.
35. Wang Y., Li P. Data-driven determination of sample number and efficient sampling locations for geotechnical site investigation of a cross-section using Voronoi diagram and Bayesian compressive sampling // *Comput. Geotech.* 2021. Vol. 130. Article 103898.
36. Zhao T., Xu L., Wang Y. Fast non-parametric simulation of 2D multi-layer cone penetration test (CPT) data without pre-stratification using markov chain Monte Carlo simulation // *Eng. Geol.* 2020. Vol. 273. Article 105670.
37. Shi C., Wang Y. Development of subsurface geological cross-section from limited site-specific boreholes and prior geological knowledge using iterative convolution XGBoost // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2021. Vol. 147. № 9. Article 04021082.
38. Shi C., Wang Y. Nonparametric and data-driven interpolation of subsurface soil stratigraphy from limited data using multiple point statistics // *Can. Geotech. J.* 2021. Vol. 58. № 2. P. 261–280.
39. Sauvin G., Vanneste M., Vardy M.E., Klinkvort R.T., Carl Fredrik F. Machine learning and quantitative ground models for improving offshore wind site characterization // *Offshore Technol. Conf. (OTC 2019)*, Houston, Texas, USA. 2019. Vol. 2. P. 1323–1339. DOI:10.4043/29351-MS.
40. Wu S., Zhang J.M., Wang R. Machine learning method for CPTu based 3D stratification of New Zealand geotechnical database sites // *Adv. Eng. Inf.* 2021. Vol. 50. Article 101397.
41. Xie J., Huang J., Lu J., Burton G.J., Zeng C., Wang Y. Development of two-dimensional ground models by combining geotechnical and geophysical data // *Eng. Geol.* 2022. Vol. 300. Article 106579.
42. Huang J., Zheng D., Li D.Q., Kelly R., Sloan S.W. Probabilistic characterization of two-dimensional soil profile by integrating cone penetration test (CPT) with multi-channel analysis of surface wave (MASW) data // *Can. Geotech. J.* 2018. Vol. 55. № 8. P. 1168–1181.
43. Ghose R., Goudswaard J. Integrating S-wave seismic-reflection data and cone-penetration-test data using a multiangle multiscale approach // *Geophysics*. 2004. Vol. 69. № 2. P. 440–459.
44. Wellmann J.F., De La Varga M., Murdie R.E., Gessner K., Jessell M. Uncertainty estimation for a geological model of the Sandstone greenstone belt, Western Australia – insights from integrated geological and geophysical inversion in a Bayesian inference framework // *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 2018. Vol. 453. № 1. P. 41–56.

45. Medina-Cetina Z., Son J., Moradi M. Bayesian stratigraphy integration of geophysical, geological, and geotechnical surveys data // *Offshore Technol. Conf. (OTC 2019)*, Houston, Texas, USA. 2019. Vol. 5. P. 3431–3440.
46. Xu J., Wang Y., Zhang L. 2021. Interpolation of extremely sparse geo-data by data fusion and collaborative Bayesian compressive sampling // *Comput. Geotech.* Vol. 134. Article 104098.
47. Xu J., Wang Y., Zhang L. Fusion of geotechnical and geophysical data for 2D subsurface site characterization using multi-source Bayesian compressive sampling // *Can. Geotech. J.* 2022. Vol. 59. № 10. P. 1756–1773.
48. Christensen C.W., Harrison E.J., Pfaffhuber A.A., Lund A.K. A machine learning-based approach to regional-scale mapping of sensitive glaciomarine clay combining airborne electromagnetics and geotechnical data // *Near Surf. Geophys.* 2021. Vol. 19. № 5. P. 523–539.
49. Chen J., Vissinga M., Shen Y., Hu S., Beal E., Newlin J. Machine learning-based digital integration of geotechnical and ultrahigh-frequency geophysical data for offshore site characterizations // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2021. Vol. 147. № 12. Article 04021160.
50. Coelho B.Z., Karaoulis M. Data fusion of geotechnical and geophysical data for three-dimensional subsoil schematisations // *Adv. Eng. Inf.* 2022. Vol. 53. Article 101671.
51. Roscoe K.H., Schofield, A.N., Wroth C.P. On the yielding of soils // *Geotechnique*. 1958. Vol. 8. № 1. P. 22–53.
52. Schofield A.N., Wroth C.P. *Critical state soil mechanics*. London, UK: McGraw Hill, 1968.
53. Been K., Jefferies M.G. A state parameter for sands // *Geotechnique*. 1985. Vol. 35. № 2. P. 99–112.
54. Reynolds O. LVII. On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. With experimental illustrations // *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1885. Vol. 20. № 127. P. 469–481. DOI:10.1080/14786448508627791.
55. Taylor D.W. *Fundamentals of Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1948.
56. Bolton M.D. The strength and dilatancy of sands // *Geotechnique*. 1986. Vol. 36. № 1. P. 65–78.
57. Bishop A.W. The strength of soils as engineering materials // *Geotechnique*. 1966. Vol. 16. P. 91–128.
58. Amarasinghe S.F., Parry R.H. Anisotropy in heavily overconsolidated kaolin // *J. Geotech. Eng. Div. ASCE*, 1975. Vol. 101. № GT12. P. 1277–1292.
59. Burland J.B. On the compressibility and shear strength of natural clays // *Geotechnique*. 1990. Vol. 40. № 3. P. 329–378.
60. Leroueil S., Vaughan P.R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks // *Geotechnique*. 1990. Vol. 40. № 3. P. 467–488.
61. Liu W.Z., Shi M.L., Miao L.C., Xu L.R., Zhang D.W. Constitutive modeling of the destructuration and anisotropy of natural soft clay // *Comput. Geotech.* 2013. Vol. 51. P. 24–41.
62. Lade P.V., Duncan J.M. Stress-path dependent behavior of cohesionless soil // *J. Geotech. Eng. Div.* 1976. Vol. 102. № 1. P. 51–68.
63. Suklje L. The analysis of the consolidation process by the isotaches method // *Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech Found. Eng., London, 1957*. Vol. 1. P. 200–206.
64. Bjerrum L. Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to the settlements of buildings // *Geotechnique*. 1967. Vol. 17. № 2. P. 83–119.
65. Roscoe K.H., Bassett R.H., Cole E.R.L. Principal axes observed during simple shear of a sand // *Proc., Geotechnical Conf. on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks*, Oslo, Norwegian Geotechnical Society, 1967. P. 231–237.
66. Kim Y.T., Leroueil S. Modeling the viscoplastic behaviour of clays during consolidation: application to Berthierville clay in both laboratory and field conditions // *Can. Geotech. J.* 2001. Vol. 38. № 3. P. 484–497.
67. Yin Z.-Y., Karstunen M., Chang C.S., Koskinen M., Lojander M. Modeling time-dependent behavior of soft sensitive clay // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2011. Vol. 137. № 11. P. 1103–1113.
68. Su D., Yang Z.X. Drained analyses of cylindrical cavity expansion in sand incorporating a bounding-surface model with state-dependent dilatancy // *App. Math. Model.* 2019. Vol. 68. P. 1–20.
69. Kang X., Xia Z., Chen R., Ge L., Liu X. The critical state and steady state of sand: a literature review // *Mar. Georesour. Geotec.* 2019. Vol. 37. № 9. P. 1105–1118.
70. Wan R.G., Guo P.J. A simple constitutive model for granular soils: modified stress-dilatancy approach // *Comput. Geotech.* 1988. Vol. 22. P. 109–133.
71. Su L.-J., Yin J.-H., Zhou W.-H. Influences of overburden pressure and soil dilation on soil nail pull-out resistance // *Comput. Geotech.* 2010. Vol. 37. № 4. P. 555–564.
72. Dafalias Y.F. An anisotropic critical state soil plasticity model // *Mech. Res. Comm.* 1986. Vol. 13. № 6. P. 341–347.
73. Yin Z.Y., Chang C.S., Karstunen M., Hicher P.Y. An anisotropic elastic–viscoplastic model for soft clays // *Int. J. Solids Struct.* 2010. Vol. 47. № 5. P. 665–677.
74. Kang X., Xia Z., Chen R.P. Measurement and correlations of K_0 and V_s anisotropy of granular soils // *Proc. Inst. Civil Eng.-Geotech. Eng.* 2020. Vol. 173. № 6. P. 546–561.
75. Hu X., Zhang Y., Guo L., Wang J., Cai Y., Fu H., Cai Y. Cyclic behavior of saturated soft clay under stress path with bidirectional shear stresses // *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2018. Vol. 104. P. 319–328.
76. Tian Y., Yao Y.P. Modelling the non-coaxiality of soils from the view of cross-anisotropy // *Comput. Geotech.* 2017. Vol. 86. P. 219–229.

77. Zhou M.M., Meschke G. A three-phase thermo-hydro-mechanical finite element model for freezing soils // *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 2013. Vol. 37. № 18. P. 3173–3193.
78. Dafalias Y.F., Manzari M.T. Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects // *Journal of Engineering Mechanics.* 2004. Vol. 130. № 6. P. 622–634.
79. Ghaboussi J., Carret J., Wu X. Material modelling with neural networks // *Proceedings of the international conference on numerical methods in engineering: theory and applications*, Swansea, UK, 1990. P. 701–717.
80. Ghaboussi J., Carret J., Wu X. Knowledge-based modelling of material behaviour with neural networks // *J. Eng. Mech. Div.* 1991. Vol. 117. № 1. P. 132–153.
81. Ellis G.W., Yao C., Zhao R. Neural network modeling of the mechanical behavior of sand // *Proc. of the 9th ASCE Conference on Engineering Mechanics*, Texas, 1992. P. 421–424.
82. Ellis G.W., Yao C., Zhao R., Penumadu D. Stress-strain modeling of sands using artificial neural networks // *ASCE J. Geotech. Eng. Div.* 1995. Vol. 121. № 5. P. 429–435.
83. Ghaboussi J., Sidarta D.E. New nested adaptive neural networks (NANN) for constitutive modeling // *Comput. Geotech.* 1998. Vol. 22. № 1. P. 29–52.
84. Penumadu D., Zhao R. Triaxial compression behavior of sand and gravel using artificial neural networks (ANN) // *Comput. Geotech.* 1999. Vol. 24. № 3. P. 207–230.
85. Javadi A.A., Rezanian M., Applications of artificial intelligence and data mining techniques in soil modeling // *Geomech. Eng.* 2009. Vol. 1. № 1. P. 53–74.
86. Shin H.S., Pande G.N. On self-learning finite element code based on monitored response of structures // *Comput. Geotech.* 2000. Vol. 27. P. 161–178.
87. Lefik M., Schrefler B.A. Artificial neural network as an incremental non-linear constitutive model for finite element code // *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2003. Vol. 192. P. 3265–3283.
88. Hashash Y.M.A., Jung S., Ghaboussi J. Numerical implementation of a neural network based material model in finite element analysis // *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 2004. Vol. 59. P. 989–1005.
89. Javadi A.A., Rezanian M. Intelligent finite element method: an evolutionary approach to constitutive modeling // *Adv. Eng. Inf.* 2009. Vol. 23. № 4. P. 442–451.
90. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: a deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // *J. Comput. Phys.* 2019. Vol. 378. P. 686–707.
91. Masi F., Stefanou I., Vannucci P., Maffi-Berthier V. Thermodynamics-based artificial neural networks for constitutive modeling // *J. Mech. Phys. Solids.* 2021. Vol. 147. Article 104277.
92. Masi F., Stefanou I. Multiscale modeling of inelastic materials with thermodynamics-based artificial neural networks (TANN) // *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2022. Vol. 398. Article 115190.
93. Weinan E., Yu B. The deep ritz method: a deep learning-based numerical algorithm for solving variational problems // *Commun. Math. Stat.* 2018. Vol. 6. P. 1–12.
94. Liu D., Wang Y. Multi-fidelity physics-constrained neural network and its application in materials modeling // *J. Mech. Des.* 2019. Vol. 141. № 12. Article 121403.
95. Sun L., Gao H., Pan S., Wang J.-X. Surrogate modeling for fluid flows based on physics-constrained deep learning without simulation data // *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* 2020. Vol. 361. Article 112732.
96. Cuomo S., Di Cola V.S., Giampaolo F., Rozza G., Raissi M., Piccialli F. Scientific machine learning through physics-informed neural networks: where we are and what's next // *J. Sci. Comput.* 2022. Vol. 92. Article 88.
97. Vlassis N.N., Sun W. Sobolev training of thermodynamic-informed neural networks for interpretable elasto-plasticity models with level set hardening // *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* 2021. Vol. 377. Article 113695.
98. Flaschela M., Kumar S., De Lorenzis L. Unsupervised discovery of interpretable hyperelastic constitutive laws // *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* 2021. Vol. 381. Article 113852.
99. Zhang P., Yin Z.Y., Sheil B. Interpretable data-driven constitutive modelling of soils with sparse data // *Comput. Geotech.* 2023. Vol. 160. Article 105511.
100. Zhang J., Wang Z., Hu J., Xiao S., Shang W. Bayesian machine learning-based method for prediction of slope failure time // *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2022. Vol. 14. № 4. P. 1188–1199.
101. Das B.M. Principles of geotechnical engineering. Cengage Learning, 2021.
102. Provenzano P., Ferlisi S., Musso A. Interpretation of a model footing response through an adaptive neural fuzzy inference system // *Comput. Geotech.* 2004. Vol. 31. № 3. P. 251–266.
103. Shahnazari H., Tutunchian M.A. Prediction of ultimate bearing capacity of shallow foundations on cohesionless soils: an evolutionary approach // *KSCE J. Civ. Eng.* 2012. Vol. 16. P. 950–957.
104. Tsai H.C., Tyan Y.Y., Wu Y.W., Lin Y.H. Determining ultimate bearing capacity of shallow foundations using a genetic programming system // *Neural Comput. & Appl.* 2013. Vol. 23. P. 2073–2084.

105. Lawal A.I., Kwon S. Development of mathematically motivated hybrid soft computing models for improved predictions of ultimate bearing capacity of shallow foundations // *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2023. Vol. 15. № 3. P. 747–759.
106. Shahin M.A., Maier H.R., Jaksa M.B. Predicting settlement of shallow foundations using neural networks // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2002. Vol. 128. № 9. P. 785–793.
107. Shahin M.A., Maier H.R., Jaksa M.B. Settlement prediction of shallow foundations on granular soils using B-spline neurofuzzy models // *Comput. Geotech.* 2003. Vol. 30. № 8. P. 637–647.
108. Rezaia M., Javadi A.A. A new genetic programming model for predicting settlement of shallow foundations // *Can. Geotech. J.* 2007. Vol. 44. № 12. P. 1462–1473.
109. Samui P., Sitharam T.G. Least-square support vector machine applied to settlement of shallow foundations on cohesionless soils // *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 2008. Vol. 32. № 17. P. 2033–2043.
110. Zhang J., Dias D., An L., Li, C. Applying a novel slime mould algorithm-based artificial neural network to predict the settlement of a single footing on a soft soil reinforced by rigid inclusions // *Mech. Adv. Mater. Struct.* 2022. Vol. 31. № 1.
111. Vergote T.A., Raymackers S. Building a framework for probabilistic assessment accounting for soil, spatial, operational and model uncertainty, applied to pile driveability // *Ocean Eng.* 2022. Vol. 266. Article 113181.
112. Buckley R., Chen Y.M., Sheil B., Suryasentana S., Xu D.D., James R.M. Bayesian optimization for CPT-based prediction of impact pile drivability // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2023. Vol. 149. № 11. Article 04023100.
113. Pal M., Deswa S. Modelling pile capacity using Gaussian process regression // *Comput. Geotech.* 2010. Vol. 37. № 7–8. P. 942–947.
114. Alkroosh I., Nikraz H. Correlation of pile axial capacity and CPT data using gene expression programming // *Geotech. Geol. Eng.* 2011. Vol. 29. P. 725–748.
115. Kordjazi A., Nejad F.P., Jaksa M.B. Prediction of ultimate axial load-carrying capacity of piles using a support vector machine based on CPT data // *Comput. Geotech.* 2014. Vol. 55. P. 91–102.
116. Kardani N., Zhou A., Nazem M., Shen S.L. Estimation of bearing capacity of piles in cohesionless soil using optimised machine learning approaches // *Geotech. Geol. Eng.* 2020. Vol. 38. P. 2271–2291.
117. Alexander J.S., Buckley R.M., Whyte S.A. Machine learning to expedite concept monopile design // *Proceedings of the XVIII ECSMGE “Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society”, Lisbon, 2024. P. 2760–2763.*
118. Suryasentana S.K., Burd H.J., Byrne B.W., Aghakouchak A., Sorensen T. Comparison of machine learning models in a data-driven approach for scalable and adaptive design of laterally-loaded monopile foundations // *International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Deep Foundations Institute (DFI), USA, 2020. ISBN9780976322948.*
119. Muduli P.K., Das S.K., Das M.R. Prediction of lateral load capacity of piles using extreme learning machine // *Int. J. Geotech. Eng.* 2013. Vol. 7. № 4. P. 388–394.
120. Taherkhani A.H., Mei Q., Han F. Capacity prediction and design optimization for laterally loaded monopiles in sandy soil using hybrid neural network and sequential quadratic programming // *Comput. Geotech.* 2023. Vol. 163. Article 105745.
121. Nejad F.P., Jaksa M.B., Kakhi M., McCabe B.A. Prediction of pile settlement using artificial neural networks based on standard penetration test data // *Comput. Geotech.* 2009. Vol. 36. № 7. P. 1125–1133.
122. Jebur A.A., Atherton W., Al Khaddar R.M., Loffill E. Settlement prediction of model piles embedded in sandy soil using the Levenberg-Marquardt (LM) training algorithm // *Geotech. Geol. Eng.* 2018. Vol. 36. P. 2893–2906.
123. Ge Q., Li C., Yang F. Support vector machine to predict the pile settlement using novel optimization algorithm // *Geotech. Geol. Eng.* 2023. Vol. 41. № 7. P. 1–15.
124. Khatti J., Samadi H., Grover K.S. Estimation of settlement of pile group in clay using soft computing techniques // *Geotech. Geol. Eng.* 2023. Vol. 42. № 3. P. 1–32.
125. Alm T., Hamre L. Soil model for pile driveability predictions based on CPT interpretations // *Proc. of the 15th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2001. P. 1297–1302.*
126. Sheil B.B., Suryasentana S.K., Templeman J.O., Phillips B.M., Cheng W.C., Zhang L. Prediction of pipe-jacking forces using a Bayesian updating approach // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2022. Vol. 148. № 1. Article 04021173.
127. Deng L., Smith A., Dixon N., Yuan H. Machine learning prediction of landslide deformation behaviour using acoustic emission and rainfall measurements // *Eng. Geol.* 2021. Vol. 293. Article 106315.
128. Xu H., He X., Shan F., Niu G., Sheng D. Machine learning in the stochastic analysis of slope stability: a state-of-the-art review // *Modelling.* 2023. Vol. 4. № 4. P. 426–453.
129. Luo Z., Bui X.N., Nguyen H., Moayedi H. A novel artificial intelligence technique for analyzing slope stability using PSO-CA model // *Eng. Comput.* 2021. Vol. 37. P. 533–544.
130. Mahmoodzadeh A., Mohammadi M., Farid H.A.H., Hashim I.H., Nariman A.S., Nejati H.R. Prediction of safety factors for slope stability: comparison of machine learning techniques // *Natural Hazards.* 2022. Vol. 111. P. 1771–1799.
131. Aminpour M., Alaie R., Khosravi S., Kardani N., Moridpour S., Nazem M., Slope stability machine learning predictions on spatially variable random fields with and without factor of safety calculations // *Comput. Geotech.* 2023. Vol. 153. Article 105094.
132. Xiao T., Zhang L.M., Cheung R.W.M., Lacasse S. Predicting spatio-temporal man-made slope failures induced by rainfall in Hong Kong using machine learning techniques // *Geotechnique.* 2023. Vol. 73. № 9. P. 749–765.

133. Guardiani C., Soranzo E., Wu W. Time-dependent reliability analysis of unsaturated slopes under rapid drawdown with intelligent surrogate models // *Acta Geotech.* 2022. Vol. 17. P. 1071–1096.
134. Lin Y., Zhou K., Li J. Prediction of slope stability using four supervised learning methods // *IEEE Access.* 2018. Vol. 6. P. 31169–31179.
135. Zeng P., Zhang T., Li T., Jimenez R., Zhang J., Sun X. Binary classification method for efficient and accurate system reliability analyses of layered soil slopes // *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards.* 2022. Vol. 16. № 3. P. 435–451.
136. Novellino A., Cesarano M., Cappelletti P., Di Martire D., Di Napoli M., Ramondini M., Sowter A., Calcaterra D. Slow-moving landslide risk assessment combining machine learning and InSAR techniques // *Catena.* 2021. Vol. 203. Article 105317.
137. Bayaraa M., Rossi C., Kalaitzis F., Sheil B. Entity embeddings in remote sensing: application to deformation monitoring for infrastructure // *Remote Sens.* 2023. Vol. 15. № 20. Article 4910.
138. Cao B.T., Obel M., Freitag S., Mark P., Meschke G. Artificial neural network surrogate modelling for real-time predictions and control of building damage during mechanised tunnelling // *Adv. Eng. Softw.* 2020. Vol. 149. Article 102869.
139. Ninic J., Gamra A., Ghiassi B. Real-time assessment of tunnelling-induced damage to structures within the building information modelling framework // *Underground Space.* 2024. Vol. 14. P. 99–117.
140. Mokhtari S., Mooney M.A. Feasibility study of EPB shield automation using deep learning // *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art.* Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2019. P. 2691–2699.
141. Chen X., Li X., Zhu H. Condition evaluation of urban metro shield tunnels in Shanghai through multiple indicators multiple causes model combined with multiple regression method // *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2019. Vol. 85. P. 170–181.
142. Li X., Lin X., Zhu H., Wang X., Liu Z. Condition assessment of shield tunnel using a new indicator: the tunnel serviceability index // *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2017. Vol. 67. P. 98–106.
143. Zhu M., Zhu H., Guo F., Chen X., Ju J.W. Tunnel condition assessment via cloud model-based random forests and self-training approach // *Comput. Aided Civ. Inf. Eng.* 2021. Vol. 36. № 2. P. 164–179. DOI:10.1111/mice.12601.
144. Sheil B.B., Suryasentana S.K., Mooney M.A., Zhu, H., McCabe B.A., O'Dwyer K.G. Discussion: machine learning to inform tunnelling operations: recent advances and future trends // *Proc. Inst. Civil Eng.-Smart Infrastruct. Constr.* 2020. Vol. 173. № 1. P. 180–181.
145. Yu Y., Workman A., Grasmick J.G., Mooney M.A., Hering A.S. Space-time outlier identification in a large ground deformation data set // *J. Qual. Technol.* 2018. Vol. 50. № 4. P. 431–445.
146. Xue Y.D., Zhang S. A fast metro tunnel profile measuring method based on close-range photogrammetry // *Information Technology in Geo-engineering: Proceedings of the 3rd International Conference (ICITG), Guimaraes, Portugal.* Cham, Switzerland: Springer, 2019. P. 57–69.
147. Khetwal S., Pei S., Gutierrez M. A data-driven approach for direct assessment and analysis of traffic tunnel resilience // *Information Technology in Geo-engineering: Proceedings of the 3rd International Conference (ICITG), Guimaraes, Portugal.* Cham, Switzerland: Springer, 2019. P. 168–177.
148. Ding H., Liu S., Cai S., Xia Y. Big data analysis of structural defects and traffic accidents in existing highway tunnels // *Information Technology in Geoengineering: Proceedings of the 3rd International Conference (ICITG), Guimaraes, Portugal.* Cham, Switzerland: Springer, 2019. P. 189–195.
149. Hayashi H., Miyataka M., Gomi H., et al. Prediction of forward tunnel face score of rock mass classification for stability by applying machine learning to drilling data // *Information Technology in Geoengineering: Proceedings of the 3rd International Conference (ICITG), Guimaraes, Portugal.* Cham, Switzerland: Springer, 2019. P. 268–278.
150. Liu Y., Hou S. Rockburst prediction based on particle swarm optimization and machine learning algorithm // *Information Technology in Geoengineering: Proceedings of the 3rd International Conference (ICITG), Guimaraes, Portugal.* Cham, Switzerland: Springer, 2019. P. 292–303.
151. Zhao W., Wei Y., Liu B., Liu S., Xiao L. Design and application of automatic monitoring and BIM technology to the construction of shield-bored underneath building // *Information Technology in Geoengineering: Proceedings of the 3rd International Conference (ICITG), Guimaraes, Portugal.* Cham, Switzerland: Springer, 2019. P. 493–501.
152. Charles J.A., Gourvenec S., Vardy M.E. Recovering shear stiffness degradation curves from classification data with a neural network approach // *Acta Geotech.* 2023. Vol. 18. № 10. P. 1–15.
153. Lambert S., Toe D., Mentani A., Bourrier F., 2021. A meta-model-based procedure for quantifying the on-site efficiency of rockfall barriers // *Rock Mech. Rock Eng.* Vol. 54. P. 487–500.
154. Previtali M., Ciantia M.O., Spadea S., Castellanza R., Crosta G. Assessing rockfall barrier performance through block propagation codes and meta-models // *Proceedings of the 16th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics.* Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2022. P. 291–298.
155. Lanfranconi C., Sala G., Frattini P., Crosta G.B., Valagussa A. Assessing the rockfall protection efficiency of forests at the regional scale // *Landslides.* 2020. Vol. 17. P. 2703–2721.
156. Bao Y., Chen Z., Wei S., Xu Y., Tang Z., Li H. The state of the art of data science and engineering in structural health monitoring // *Engineering.* 2019. Vol. 5. № 2. P. 234–242.
157. Jeong S., Ko J., Kim J. The effectiveness of a wireless sensor network system for landslide monitoring // *IEEE Access.* 2019. Vol. 8. P. 8073–8086.

158. Soga K., Luo L. Distributed fiber optics sensors for civil engineering infrastructure sensing // *J. Struct. Integrity Maint.* 2018. Vol. 3. № 1. P. 1–21.
159. Bayaraa M., Sheil B., Rossi C. InSAR and numerical modelling for tailings dam monitoring – the Cadia failure case study // *Geotechnique*. 2024. Vol. 74. № 10. P. 985–1003.
160. Voyagaki E., Crispin J.J., Gilder C.E., Ntassiou K., O’Riordan N., Nowak P., Sadek T., Patel D., Mylonakis G., Vardanega P.J. The DINGO database of axial pile load tests for the UK: settlement prediction in fine-grained soils // *Georisk: Assess. Manage. Risk Eng. Syst. Geohazards*. 2022. Vol. 16. № 4. P. 640–661.
161. Vahab M., Shahbodagh B., Haghighat E., Khalili N. Application of physics-informed neural networks for forward and inverse analysis of pile-soil interaction // *Int. J. Solids Struct.* 2023. Vol. 277. Article 112319.
162. Zhang P., Yin Z.Y., Sheil B. Interpretable data-driven constitutive modelling of soils with sparse data // *Comput. Geotech.* 2023. Vol. 160. Article 105511.
163. Zhang P., Yin Z.Y., Jin Y.F., Sheil B. Physics-constrained hierarchical data-driven modelling framework for complex path-dependent behaviour of soils // *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 2023. Vol. 46. № 10. P. 1831–1850.
164. Ribeiro M.T., Singh S., Guestrin C. Why should i trust you? Explaining the predictions of any classifier // *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining*. 2016. P. 1135–1144.
165. Guidotti R., Monreale A., Ruggieri S., Turini F., Giannotti F., Pedreschi D. A survey of methods for explaining black box models // *ACM Comput. Surv. (CSUR)*. 2018. Vol. 51. № 5. P. 1–42.
166. Lundberg S.M., Lee S.I. A unified approach to interpreting model predictions // *Proceedings of the 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*, Long Beach, CA, USA, 4-9 December 2017. P. 4768-4777.
167. Mitchell M., Wu S., Zaldivar A., Barnes P., Vasserman L., Hutchinson B., Spitzer E., Inioluwa D.R., Timnit G. Model cards for model reporting // *Proceedings of the Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, 2019. P. 220–229.
168. Peng J., Liu X. Automated code compliance checking research based on BIM and knowledge graph // *Sci. Rep.* 2023. Vol. 13. № 1. Article 7065.
169. Shahin M.A., Jaksa M.B., Maier H.R. State of the art of artificial neural networks in geotechnical engineering // *Electron. J. Geotech. Eng.* 2008. Vol. 8. № 1. P. 1–26.
170. Baghbani A., Choudhury T., Costa S., Reiner J. Application of artificial intelligence in geotechnical engineering: a state-of-the-art review // *Earth Sci. Rev.* 2022. Vol. 228. Article 103991.
171. Latif K., Sharafat A., Seo J. Digital twin-driven framework for TBM performance prediction, visualization, and monitoring through machine learning // *Appl. Sci.* 2023. Vol. 13. № 20. Article 11435.
172. Kumar K. Geotechnical parrot tales (gpt): Harnessing large language models in geotechnical engineering // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2024. Vol. 150. № 1. Article 02523001.
173. Erichson N.B., Mathelin L., Yao Z., Brunton S.L., Mahoney M.W., Kutz J.N., Shallow neural networks for fluid flow reconstruction with limited sensors // *Proc. Roy. Soc.* 2020. Vol. A476. № 2238. Article 20200097.
174. Yuan B., Heitor A., Wang H., Chen X. Physics-informed deep learning to solve three-dimensional Terzaghi consolidation equation: forward and inverse problems // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2025. 24 September. <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10602-2>.
175. Ouyang W., Li G., Chen L., Liu S.-W. Machine learning-based prediction of drilled-shaft capacity // *Soils and Foundations*. 2024. Vol. 64. № 2. P. 262–274.
176. Tao R., Pan Y., Liu Z., et al. A physics-inspired machine learning approach for water-tightness estimation of defective cut-off walls with random construction errors // *Acta Geotech.* 2023. Vol. 18. P. 5959–5982. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02030-z>.
177. Perdikaris P., Raissi M., Damianou A., Lawrence N.D., Karniadakis G.E. Nonlinear information fusion algorithms for data-efficient multi-fidelity modelling // *Proc. Roy. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci.* 2017. Vol. 473. 2198. № 2198. Article 20160751.
178. Le Gratiet L., Garnier J. Recursive co-kriging model for design of computer experiments with multiple levels of fidelity // *Int. J. Uncertain. Quantif.* 2014. Vol. 4. № 5. P. 365–386.
179. Xu C., Cao B.T., Yuan Y., Meschke G. A multi-fidelity deep operator network (DeepONet) for fusing simulation and monitoring data: application to real-time settlement prediction during tunnel construction // *Eng. Appl. Artif. Intel.* 2024. Vol. 133. Article 108156.
180. Lam R., Allaire D.L., Willcox K.E. Multifidelity optimization using statistical surrogate modeling for non-hierarchical information sources // *56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2015. Article 0143.
181. Zhou X., Shi P. Multi-scale generative adversarial network for 2D subsurface reconstruction using multi-fidelity geological exploration data // *Adv. Eng. Inf.* 2025. Vol. 66. Article 103482.
182. Zhang P., Yin Z.Y., Jin Y.F., Yang J., Sheil B. Physics-informed multifidelity residual neural networks for hydromechanical modeling of granular soils and foundation considering internal erosion // *J. Eng. Mech.* 2022. Vol. 148. № 4. Article 04022015.
183. He G.F., Zhang P., Yin Z.Y., Jin Y.F., Yang Y. Multi-fidelity data-driven modelling of rate-dependent behaviour of soft clays // *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 2023. Vol. 17. № 1. P. 64–76.
184. Zhang P., Yin Z.Y., Sheil B. Multifidelity constitutive modeling of stress-induced anisotropic behavior of clay // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2024. Vol. 150. № 3. Article 04024003.

185. Brunton S.L., Proctor J.L., Kutz J.N. Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems // Proc. Natl. Acad. Sci. 2016. Vol. 113. № 15. P. 3932–3937.
186. Zhang P., Yin Z.-Y., Sheil B. A physics-informed data-driven approach for consolidation analysis // Geotechnique. 2023. Vol. 74. № 7. P. 620–631.
187. Apoji D., Sheil B., Soga K. Shaping the future of tunneling with data and emerging technologies // Data-Centric Eng. 2023. Vol. 4. Article e29.
188. Zhao Y., Liu Y., Mu E. A review of intelligent subway tunnels based on digital twin technology // Buildings. 2024. Vol. 14. № 8. Article 2452.
189. Chen L., Tophel A., Hettiyadura U., Kodikara J. An investigation into the utility of large language models in geotechnical education and problem solving // Geotechnics. 2024. Vol. 4. № 2. P. 470–498.
190. Xu H.R., Zhang N., Yin Z.Y., Njock P.G.A. GeoLLM: a specialized large language model framework for intelligent geotechnical design // Comput. Geotech. 2025. Vol. 177. Article 106849.
191. Qian Z., Shi C. Large language model-empowered paradigm for automated geotechnical site planning and geological characterization // Autom. Constr. 2025. Vol. 173. Article 106103.
192. Li H., Shi C. Few-shot learning of geological cross-sections from sparse data using large language model // Geodata and AI. 2025. Vol. 2. Article 100010.
193. Xu H.R., Zhang N., Yin Z.Y., Njock P.G.A. Multimodal framework integrating multiple large language model agents for intelligent geotechnical design // Autom. Constr. 2025. Vol. 176. Article 106257.
194. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y. Generative adversarial nets // Adv. Neural Inform. Process. Syst. 2014. Vol. 3. № 11.
195. Song Y., Sohl-Dickstein J., Kingma D.P., Kumar A., Ermon S., Poole B. Score-based generative modeling through stochastic differential equations // ArXiv preprint. 2020. arXiv:2011.13456v1 [cs.LG] 26 Nov 2020.
196. Montero F.C., Coelho B.Z., Smyrniou E., Taormina R., Vardon P.J. SchemaGAN: a conditional generative adversarial network for geotechnical subsurface schematisation // Comput. Geotech. 2025. Vol. 183. Article 107177.
197. Ge Q., Li J., Lacasse S., Sun H., Liu Z. Data-augmented landslide displacement prediction using generative adversarial network // J. Rock Mech. Geotech. Eng. 2024. Vol. 16. № 10. P. 4017–4033.
198. Tripura T., Chakraborty S. Wavelet Neural Operator for solving parametric partial differential equations in computational mechanics problems // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2023. Vol. 404. Article 115783.
199. Zhong W., Meidani H. 2025. Physics-informed geometry-aware neural operator // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. Vol. 434. Article 117540.
200. Jiang Y., Byrne E., Glassey J., Chen X. Integrating graph neural network-based surrogate modeling with inverse design for granular flows // Ind. Eng. Chem. Res. 2024. Vol. 63. № 20. P. 9225–9235.
201. Choi Y., Macedo J., Liu C. Differentiable graph neural network simulator for forward and inverse modeling of multi-layered slope system with multiple material properties // ArXiv preprint. 2025. arXiv:2504.15938.



Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>

Организаторы:

Независимый электронный журнал
Геоинфо

К ДЕСЯТИЛЕТИЮ ЖУРНАЛА «ГЕОИНФО»
ОТМЕТИМ В ХОРОШЕЙ
КОМПАНИИ!

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА В ОБЛАСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ
ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, ГЕОТЕХНИКИ,
МОНИТОРИНГА И ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ТЕРРИТОРИИ

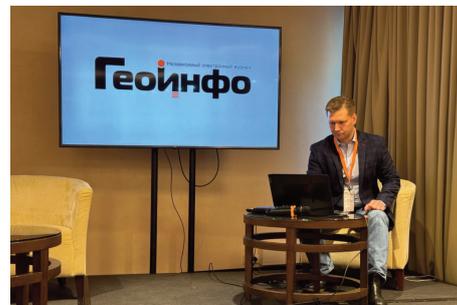
Геоинфо EXPO
2026

1000+ посетителей

30+ экспонентов

40+ мероприятий деловой программы

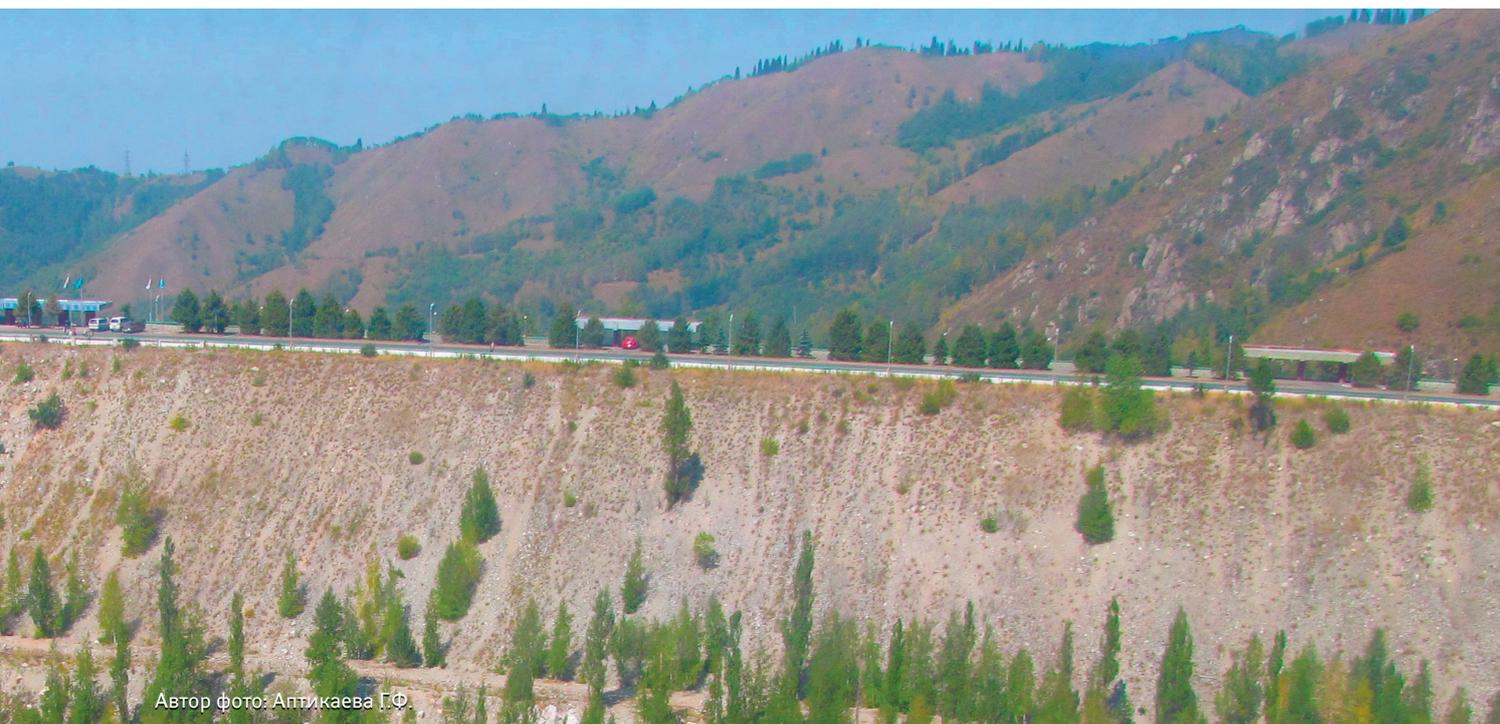
150+ докладов



Посещение выставки и всех мероприятий
деловой программы бесплатное

15-16 апреля 2026 года

Москва, Звезды Арбата 5*, Новый Арбат, 32



Автор фото: Аптикаева Г.Ф.

МОНИТОРИНГ ФИЛЬТРАЦИИ В ПРЕДЕЛАХ И ВОКРУГ ПЛОТИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ: КРАТКИЙ ОБЗОР

Принята к публикации 30.12.2025

Опубликована 30.01.2026

КАЙОДЕ О.Т.

Отделение геофизики физического факультета Университета «Ковенант», г. Ота, штат Огун, Нигерия

ОДУКОЙЯ А.М.

Факультет наук о Земле Университета Лагоса, г. Лагос, штат Лагос, Нигерия

АДАГУНОДО Т.А.

Отделение геофизики физического факультета Университета «Ковенант», г. Ота, штат Огун, Нигерия

АДЕНИДЖИ А.А.

Факультет физики и солнечной энергии Университета Боузена, г. Иво, штат Осун, Нигерия

АННОТАЦИЯ

Представляем вниманию читателей немного сокращенный адаптированный перевод доклада нигерийских специалистов «Мониторинг фильтрации в пределах и вокруг плотин с использованием геофизических методов: краткий обзор» (Kayode et al., 2018), сделанного на 2-й Международной научной конференции по устойчивому развитию и смежным наукам. Материалы этой конференции были опубликованы в соответствующем сборнике серии IOP Conference Series: Earth and Environmental Science («Материалы конференций издательства IOP: секция наук о Земле и окружающей среде»). Данная серия выпускается британской благотворительной научной организацией IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшей фактически международной. Оригинал представленного доклада нигерийских авторов (Kayode et al., 2018) находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет распространять, переводить и адаптировать его при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для перевода приводится в конце.

Медленное просачивание жидкости или газа через пористый материал или небольшие отверстия называется фильтрацией. В инженерной геологии это фильтрация воды сквозь грунты. Данный процесс часто представляет собой серьезную проблему для фундаментов зданий, а также для грунтовых плотин. Фильтрация воды через плотины или рядом с ними – причина большинства их прорывов, которые обычно носят катастрофический характер, приводят к многочисленным человеческим жертвам, разрушению инфраструктуры и потерям имущества. Поэтому мониторинг фильтрации в пределах и вокруг этих сооружений становится необходимым условием для поддержания их устойчивости.

В данной статье приводится обзор геофизических методов, используемых для мониторинга и контроля фильтрации в пределах и вокруг земляных плотин. Результаты этого исследования могут быть полезны главным образом для инженерных изысканий на площадках будущего строительства плотин, для обследования эксплуатируемых плотин и прилегающих к ним участков, а также для контроля качества их грунтовых оснований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

грунтовая плотина; фильтрация; повреждение; разрушение; мониторинг фильтрации; геофизические методы; электротомография; метод естественного электрического поля; метод вызванной поляризации.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Кайоде О.Т., Одукоя А.М., Адагунодо Т.А., Адениджи А.А. Мониторинг фильтрации в пределах и вокруг плотин с использованием геофизических методов: краткий обзор (пер. с англ.) // Геоинфо. 2025. Т. 7. № 4. С. 82–88. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-82-88.

MONITORING OF SEEPAGES AROUND DAMS USING GEOPHYSICAL METHODS: A BRIEF REVIEW

Accepted for publication 30.12.2025

Published 30.01.2026

KAYODE O.T.

Department of Physics, Geophysics Unit, Covenant University, Ota, Ogun State, Nigeria

ODUKOYA A.M.

Department of Geosciences, University of Lagos, Lagos, Lagos State, Nigeria

ADAGUNODO T.A.

Department of Physics, Geophysics Unit, Covenant University, Ota, Ogun State, Nigeria

ADENIJI A.A.

Department of Physics and Solar Energy, Bowen University, Iwo, Osun State, Nigeria

ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the report “Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review” by Nigerian specialists (Kayode et al., 2018) at the 2nd International Conference on Science and Sustainable Development. The proceedings of that conference were published in the corresponding collection of the series “IOP Conference Series: Earth and Environmental Science”. The series is issued by the publishing company of the British scientific society “Institute of Physics” (IOP) that is now virtually international. The original work, which was used for the translation, is an open access paper under the CC BY 3.0 license that allows it to be distributed, translated, and adapted, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Kayode et al., 2018), which was used for the translation, is given in the end.

The slow escape of a liquid or gas through a porous material or small openings is called seepage. It is a process of seeping in soil engineering whereby water in soils move. Seepages often pose a grave problem in building foundations and also a common problem in earth dams (dams are structures built to retain water/fluid) due to abnormal or excessive leakage. Seepage through or around dams have been responsible for most dam failures. Dam failures are usually catastrophic with many fatalities and causing the destruction of infrastructure and properties. Therefore, monitoring of seepage through and around dams becomes a necessity to maintain dam stability.

This paper reviews the geophysical techniques which have been considered for the monitoring and control of seepages around dams. The main field of application of this investigation is subjected to site characterization and foundation quality assurance.

KEYWORDS:

earth dam; seepage; damage; failure; seepage monitoring; geophysical methods; electrical resistivity tomography; self-potential method; induced polarization method.

FOR CITATION:

Kayode O.T., Odukoya A.M., Adagunodo T.A., Adeniji A.A. Monitoring fil'tratsii v predelakh i vokrug plotin s ispol'zovaniem geofizicheskikh metodov: kratkii obzor (per. s angl.) [Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review (translation from English into Russian)] // Geoinfo. 2025. T. 7. № 4. S. 82–88. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-82-88 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

Непрекращающиеся случаи разрушения плотин становятся важной темой для изучения в последние десятилетия.

В качестве основных причины этих разрушений рассматриваются недостаточные или недостоверные знания о грунтовых условиях, некачественное про-

ектирование фундамента плотины, а также чрезмерная фильтрация воды в ее теле и вокруг него [1]. Чтобы предотвратить серьезные потенциальные

опасности, которые неизменно связаны с подобными разрушениями, есть острая необходимость в исследованиях процессов фильтрации [2]. В связи с этим необходимо обсуждать важность использования геофизических методов для тщательного обследования и отображения внутреннего состояния плотин, что чрезвычайно важно для гражданского строительства, в том числе для создания и эксплуатации гидротехнических сооружений.

Геофизические методы внесли огромный вклад в различные сферы человеческой деятельности, в том числе в мониторинг фильтрации через плотины и вокруг этих сооружений [3, 4]. И следует уделять больше внимания их применению в исследованиях окружающей среды. Благодаря использованию геофизических методов можно быстро и экономически эффективно получать информацию о геологическом строении на большой площади [5].

Как правило, плотины и водохранилища строятся преимущественно для орошения, водоснабжения, выработки гидроэлектроэнергии, защиты от наводнений или для тех или иных сочетаний перечисленного [6]. Во многих развитых странах, таких как США и Китай, плотины и водохранилища играют ключевую роль. Развитие гидроэнергетики и регулирование водных ресурсов в Китае стало возможным благодаря реализации проектов по строительству плотин и водохранилищ [7].

Серьезные разрушения грунтовых плотин происходят из-за фильтрации воды в них и на прилегающих территориях, однако если этот процесс остается в пределах проектных норм, то он не угрожает устойчивости сооружения. Но чрезмерная фильтрация неизбежно приводит к разрушению плотины, поскольку фильтрационные потоки делают сооружение неустойчивым, причем иногда уже в процессе поэтапного строительства [7].

Надежными индикаторами вероятных механизмов возникновения аномальной фильтрации являются результаты комплексного использования электротомографии и геотехнического мониторинга [8]. Существующие системы мониторинга фильтрации в большинстве своем мало чувствительны к незначительным изменениям фильтрационных потоков. Тем не менее востребованность в неинвазивных геофизических методах выросла, поскольку они позволяют выявлять аномальные проявления фильтрации на ранних стадиях [8].

В ряде работ была подтверждена значимость геофизических методов в исследованиях фильтрации в грунтовых плотинах. Среди них – метод электротомографии, который все более широко применяется для изучения фильтрации, для контроля устойчивости плотин и зданий [10–26]. Например, авторы работы [27] применили электротомографию при исследовании фильтрации в грунтовой плотине на Тайване. Эту плотину реконструировали для повышения уровня воды, после чего был проведен ряд повторных измерений в течение некоторого периода времени с целью изучения нескольких аномальных протечек, обнаруженных на низовом откосе сооружения. Интеграция результатов двумерной электротомографии и геотехнических данных позволила четко выявить вероятный механизм аномальной фильтрации.

Эффективность выявления аномальной фильтрации действительно может быть дополнительно повышена с помощью серии повторных измерений во времени [28, 29]. Так, авторы работы [30] применили 2D электротомографию для визуализации предполагаемых фильтрационных каналов в грунтовой плотине в нигерийском городе Зария. Этот метод был использован для диагностики изменений содержания воды в плотине и определения того, связаны ли они с аномальной фильтрацией в грунте или только с сезонными колебаниями. На основе интерпретации полученных данных были выделены различные зоны с относительно однородными значениями удельного электрического сопротивления. Результаты показали, что зоны с пониженным сопротивлением в пределах коренных пород представляют собой вероятные пути фильтрации. Таким образом, указанный геофизический метод был успешно применен для выявления путей фильтрации в коренных породах под грунтовой плотинной [30, 31].

Автор статей [32, 33] провел примечательное исследование с использованием различных геофизических методов, таких как электротомография, поверхностное электромагнитное и электрическое зондирование, для выявления причин потери воды на плотине Афамя В (являющейся частью системы плотин Аль-Афамя на реке Оронт в долине Аль-Гхаб в Сирии). Он отметил, что метод электротомографии был более эффективным и удобным для обнаружения проблем с инфильтрацией воды и протечками через коренные породы. Комплексные результаты приме-

нения указанных методов позволили выявить некоторые геологические структуры, которые оказывают негативное влияние и в конечном итоге могут привести к протечкам в основании плотины. Позднее было определено, что основной причиной рассматриваемой проблемы на этой плотине является вертикальная инфильтрация воды.

Авторы статьи [34] подготовили технико-экономическое обоснование возможности строительства второй очереди плотины электростанции на реке Гурара в северо-западной части Нигерии. Они использовали метод преломленных волн с разнесенной и симметричной расстановкой сейсмоприемников. Планируемое сооружение должно было располагаться на кристаллических коренных породах в северной части Центральной Нигерии. Результаты исследования показали высокую вероятность и значимые признаки фильтрации в этих материнских породах, а именно под западной частью предполагаемой оси плотины, где они оказались сильно трещиноватыми. Но все же в целом результаты показали пригодность исследованных материалов для строительства плотины.

Картина фильтрации и гидрогеологические механизмы, влияющие на нее, были изучены в том числе в районе городка Реймонд (Калифорния, США) [35] с использованием метода естественного электрического поля и метода электрического сопротивления постоянному току. Интерпретации их результатов способствовали имевшиеся до этого базовые сведения о гидрогеологических условиях и информация о типичных подповерхностных структурах, полученная на основе данных электроразведки, поскольку были рассмотрены различные сценарии фильтрации. Интерпретация данных, полученных методом естественного электрического поля, позволила выявить признаки фильтрации, согласующиеся с данными предыдущих наблюдений [36]. Правильная интеграция результатов геофизических исследований, данных по скважинам и численного моделирования позволяет лучше понять процессы фильтрации на исследуемых площадках [35].

В свете вышеизложенного в настоящей статье рассматривается эффективность электротомографии и других подходящих геофизических методов для выявления аномальной фильтрации в грунтовых плотинах и для более глубокого изучения возможных способов мониторинга таких аномальных процессов.

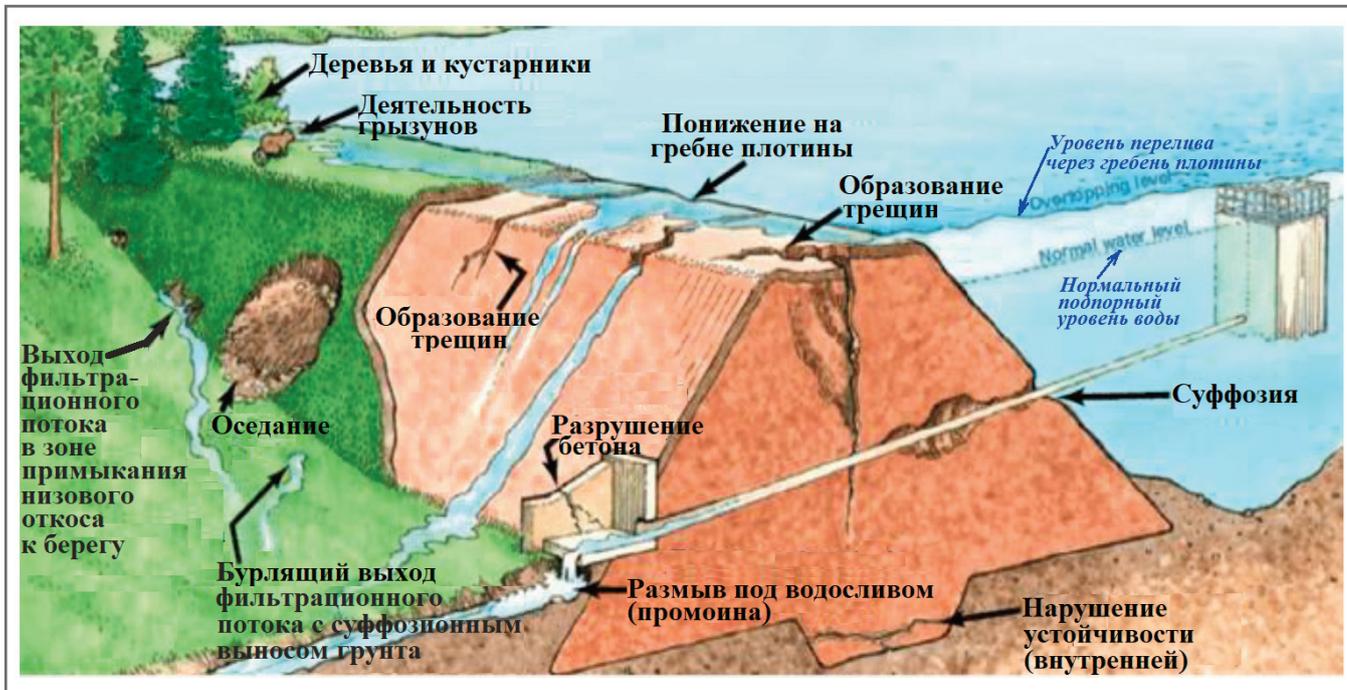


Рис. Факторы воздействия фильтрации на грунтовую плотину

ПРИЧИНЫ ФИЛЬТРАЦИИ ►

Исследовано множество факторов, способствующих фильтрации в плотинах. К ним относятся: трещины в теле плотины или в ее основании, особенно открытые; рыхлые (особенно слабо уплотненные) грунты в основании; норы грызунов; откопка дренажных систем; деревья с глубокой корневой системой; морозное пучение; усадочные трещины в окружающем плотину грунте; вырванные с корнем деревья; землетрясения; чрезмерное фильтрационное противодействие; застойные и запертые грунтовые воды; недостаточно эффективная система дренажа сооружения [1, 6, 37–39].

Фильтрация характерна для всех грунтовых плотин – вода медленно просачивается сквозь них и их основания. Если фильтрационные силы достаточно велики, это может привести к вымыванию грунта, ослаблению его структуры и в конечном счете к оползням. При отсутствии надлежащего мониторинга фильтрационные процессы могут вызывать серьезные негативные последствия для сооружения и окружающей среды [40].

Другими характерными признаками фильтрации, отмеченными в работах [39, 40], являются:

1. Сезонные изменения температуры внутри плотины.
2. Быстрое снижение уровня воды в водохранилище ниже ожидаемого при обычной эксплуатации.

3. Скопление воды на участках вокруг плотины.

4. Снижение темпов роста растений вокруг плотины по сравнению с более удаленными участками.

5. Изменение окраски растений с нарушенным ростом.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ФИЛЬТРАЦИИ НА ГРУНТОВЫЕ ПЛОТИНЫ ►

Плотины и насыпи наиболее уязвимы к фильтрации при определенных гидрологических и гидрогеологических условиях. Среди распространенных проблем, связанных с фильтрацией, которые могут привести к разрушению плотины, можно назвать: суффозию; избыточное поровое/внутреннее давление или водонасыщение; растворение растворимых пород (гипса, известняка, каменной соли); подземную эрозию; чрезмерное фильтрационное противодействие, приводящее к выпору или выбросу грунта [39, 41] (см. рисунок).

Суффозия

Суффозия представляет собой форму разрушения грунта, происходящего под воздействием фильтрационных сил. В слабых дисперсных грунтах образуются каналы, по которым частицы выносятся фильтрационными потоками. Эти каналы (полости) со временем расширяются вследствие продолжающегося выноса частиц материала. И, если этот процесс своевременно не

остановить, он может в конечном счете привести к осадкам грунтовой плотины [41, 42].

Внутренняя эрозия

Подземная эрозия – еще один распространенный механизм повреждения грунтовых плотин водой. Она вызывается движением воды по трещинам или другим дефектам вдоль границ между дисперсным грунтом и коренными скальными породами [37, 38, 43]. Разрушения из-за подземной эрозии часто обнаруживаются в районах с локальными оползнями, при небрежном строительстве, при наличии трещин и горизонтальной суффозии [37].

Растворение

Если основание дамбы сложено растворимыми породами, то их растворение в грунтовых водах может привести к проблемам, связанным с фильтрацией. Дождевые осадки, проникающие сверху, растворяют породы в зонах выше уровня грунтовых вод, а потоки подземных вод – ниже него. Поэтому следует проявлять особую осторожность при строительстве плотин на растворимых грунтах основания, таких как гипс, каменная соль и известняк [37, 38]. Если процессы растворения не контролировать, то это может постепенно привести к потере прочности подповерхностных образований.

Водонасыщение и поровое/внутреннее давление

В грунтовом основании плотины, особенно при наличии воды в водохранилище, обычно происходит фильтрация. Среди неблагоприятных последствий фильтрации – избыточное поровое давление и сниженное сопротивление сдвигу [37]. В результате постоянного водонасыщения и связанного с этим деформирования грунтов плотина настолько теряет устойчивость, что уже не может выдерживать напор воды, а это может привести к ее разрушению [37].

Фильтрационное противодействие, выпор или выброс грунта

Среди признаков водонасыщения и чрезмерного порового/внутреннего давления – выпор или выброс грунта. Эти явления происходят в результате избыточного фильтрационного противодействия, то есть когда нижележащий слой оказывает чрезмерное давление на перекрывающий его водоупорный или слабопроницаемый слой в основании плотины. Если поровое давление под водоупорным слоем превышает нагрузку от вышележащих грунтов, происходит повреждение или разрушение плотины. То есть такой сценарий приводит к выпору или выбросу грунта с характерным бурлящим выходом фильтрационного потока (с суффозионным выносом грунтового материала), если вода прорывает или размывает водоупорный слой [37].

МЕТОДЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ►

Методы электроразведки ►

Такой метод электрических сопротивлений, как электротомография, является неинвазивным геофизическим методом, при котором профили располагаются близко к телу исследуемой плотины параллельно ее оси по верхнему и нижнему бьефу. Он успешно применяется для выявления путей фильтрации в плотинах [12]. Геофизические методы сопротивлений основываются на характерных удельных электрических сопротивлениях материалов и на контрастах между этими сопротивлениями. Сопротивления грунтов определяются

путем пропускания через них электрического тока и измерения возникающих разностей потенциалов между питающими и приемными электродами.

Методы естественного электрического поля (ЕЭП) и вызванной поляризации (ВП) тоже являются проверенными для мониторинга фильтрации в подповерхностном пространстве [12]. Электрические потенциалы, возникающие при движении жидкости, могут быть зафиксированы с помощью профилей наземных наблюдений. Сравнение результатов использования метода ЕЭП/ВП при различных уровнях водохранилища позволяет выявлять траектории фильтрационных потоков.

Однако комбинация методов ЕЭП/ВП и электротомографии позволяет выявлять и уточнять пути фильтрации в плотинах более эффективно [44].

Электромагнитный метод ►

Электромагнитная съемка – это также неинвазивный геофизический метод, широко применяемый для мониторинга фильтрации в плотинах. При его использовании хорошими индикаторами путей фильтрации служат низкие и высокие величины проводимости, возникающие соответственно в пустотах, заполненных воздухом, и в зонах, заполненных водой или глинистыми материалами [44].

Электромагнитный метод можно избирательно применять для сопоставления его результатов с данными по ранее выявленным зонам фильтрации. При его использовании необходимо хорошо понимать гидрогеологические условия исследуемой территории, чтобы можно было корректно обнаруживать линии электроснабжения, подземные кабели, зоны с низкой электропроводностью и слои глин. Следует также принимать во внимание изменения электропроводности воды, возникающие из-за вариаций ее ионного состава и иных характеристик [45].

Метод преломленных волн ►

Метод преломленных волн также используется для мониторинга фильтрации в плотинах, однако довольно редко – из-за необходимости больших за-

трат. Он позволяет получать изображения подповерхностных структур и картировать горизонтальные и вертикальные изменения грунтовых условий на исследуемом участке [46]. Комбинированное применение метода преломленных волн и электротомографии обеспечивает более надежную и информативную оценку путей фильтрации в плотинах и на прилегающих к ним участках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Мониторинг фильтрации в пределах и вокруг земляных плотин имеет большое значение для гидротехнических сооружений и других объектов гражданского строительства. В целом, влияние фильтрации на плотины зависит от водоудерживающей способности грунтов, которая является ключевым фактором в инженерной геологии. Инженерные изыскания для проектирования плотин и для их обследования при эксплуатации должны выявлять грунтовые условия, которые могут приводить к аварийным ситуациям из-за фильтрации воды.

Комбинированное использование электротомографии и других методов, таких как метод естественного электрического поля или метод вызванной поляризации, доказало свою эффективность для количественной и качественной оценок фильтрационных потоков. Получение геоэлектрических разрезов методами электротомографии и естественного электрического поля по нескольким профилям, пересекающим участок примыкания плотины к берегу, позволяет реконструировать квазитрехмерную картину фильтрации [44].

И наконец, геофизики, проектировщики и строители должны тесно взаимодействовать при создании и эксплуатации плотин, чтобы избежать повреждений и неоправданных затрат, которые могут возникнуть при отсутствии такого сотрудничества. **И**

Авторы выражают благодарность руководству Университета «Ковенант» (Нигерия) за оказанную поддержку при подготовке публикации.

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Kayode O.T., Odukoya A.M., Adagunodo T.A., Adeniji A.A. Monitoring of seepage around dams using geophysical methods: a brief review // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 173. 2nd International Conference on Science and Sustainable Development. Article 012026. DOI:10.1088/1755-1315/173/1/012026

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►**(REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED PAPER) ►**

1. Lukman S, Otun S.A, Adie D.B, Ismail A, Oke I.A. A brief assessment of a dam and its failure prevention // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2011. Vol. 11. P. 97–109.
2. Close M.E., Stanton G.J., Pang L. Use of rhodamine WT with XAD7 resin for determining groundwater flow paths // *Journal of Hydrogeology*. 2002. Vol. 10. P. 368–376.
3. Adagunodo T.A., Sunmonu L.A., Oladejo O.P., Ojoawo I.A. Vertical electrical sounding to determine fracture distribution at Adumasun area, Oniye, Southwestern Nigeria // *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics*. 2013. Vol. 1. № 3. P. 10–22.
4. Adagunodo T.A., Sunmonu L.A., Oladejo O.P. Electromagnetic investigation into the cause(s) of road failure along Takie-Ikoyi road. Ogbomosho // *International Journal of Business and Applied Sciences*. 2014. Vol. 1. № 1. P. 78–85.
5. Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., Keys D.A. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 1976. 860 p.
6. Creager W.P., Justin J.D., Hinds J. *Engineering for Dams (Vols. I–III)*. New York: John Wiley & Sons, 1945.
7. Wang Q.G., Du Y.H., Su Y., Chen K.Q. Environmental impact post-assessment of dam and reservoir projects: a review // *Procedia Environmental Sciences*. 2012. Vol. 13. P. 1439–1443.
8. Lin C.-P., Hung Y.-C., Yu Z.-H., Wu P.-L. Investigation of abnormal seepages in an earth dam using resistivity tomography // *Journal of Geoenvironment*. 2013. Vol. 8. № 2. P. 61–70.
9. Voronkov O.K., Kagan A.A., Krivonogova N.F., Glagovsky V.B., Prokopovich V.S. Geophysical methods and identification of embankment dam parameters // *Proceedings of the 2nd International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. P. 593–599.
10. Okko O., Hassinen P., Korkealaakso J. Location of leakage paths below earth dams by geophysical techniques // *Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE)*, New Delhi, 1994. P. 1349–1352.
11. Abuzeid N. Investigation of channel seepage areas at the existing Kaffrein dam site Jordan using electrical-resistivity measurements // *Journal of Applied Geophysics*. 1994. Vol. 32. P. 163–175.
12. Panthulu T.V., Krishnaiah C., Shirke J.M. Detection of seepage paths in earth dams using self potential and electrical resistivity methods // *Engineering Geology*. 2001. Vol. 59. P. 281–295.
13. Karastathis V.K., Karmis P.N., Drakatos G., Stavarakakis G. Geophysical methods contributing to the testing of concrete dams, application at the Marathon Dam // *Journal of Applied Geophysics*. 2002. Vol. 50. P. 247–260.
14. Turkmen S., Ozguler E., Taga H., Karaogullarindan T. Seepage problems in the karstic limestone foundation of the Kalecik dam south Turkey // *Engineering Geology*. 2002. Vol. 63. № 3. P. 247–257.
15. Oh Y.C., Jeong H.S., Lee Y.K., Shon H. Safety evaluation of rock-fill dam by seismic (MASW) and resistivity method // *Proceedings of the 16th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 2003. P. 1377–1386.
16. Lim H.D., Kim K.S., Kim J.H., Kwon H.S., Oh B.H. Leakage detection of earth dam using geophysical methods // *72th Annual Meeting of the International Commission on Large Dams*, 2004. P. 212–224.
17. Sjudahl P., Dahlin T., Johansson S. Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden // *Environmental Geology*. 2005. Vol. 49. P. 267–273.
18. Song S.H., Song Y.H., Kwon B.D. Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam // *Exploration Geophysics*. 2005. Vol. 36. P. 92–96.
19. Kim J.H., Yi M.J., Song Y., Seol S.J., Kim K.S. Application of geophysical methods to the safety analysis of an earth dam // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 2007. Vol. 12. P. 221–235.
20. Cho I.K., Yeom J.Y. Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam // *Geophysics*. 2007. Vol. 72. P. 31–38.
21. Adagunodo T.A., Sunmonu L.A., Ojoawo A., Oladejo O.P., Olafisoye E.R. The hydro geophysical investigation of Oyo state industrial estate, Ogbomosho, Southwestern Nigeria, using vertical electrical soundings // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2013. Vol. 5. № 5. P. 1816–1829.
22. Adagunodo T.A., Sunmonu L.A., Adeniji A.A. Effect of dynamic pattern of the saprolitic zone and its basement on building stability: a case study of a high-rise building in Ogbomosho // *Journal of Applied Physical Science International*. 2015. Vol. 3. № 3. P. 106–115.
23. Adagunodo T.A., Adeniji A.A., Erinle A.V., Akinwumi S.A., Adewoyin O.O., Joel E.S., Kayode O.T. Geophysical investigation into the integrity of a reclaimed open dumpsite for civil engineering purpose // *Interciencia Journal*. 2017. Vol. 42. № 11. P. 324–339.
24. Akinwumi I.I. Soil Modification by the Application of Steel Slag // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2014. Vol. 58. № 4. P. 371–377.
25. Kayode O.T., Akinwumi I.I. Residual soils derived from charnockite and migmatite as road pavement layer materials // *Journal of Materials and Environmental Science*. 2017. Vol. 8. № 2. P. 657–665.

26. Adewoyin O.O., Joshua E.O., Akinyemi M.L., Omeje M., Joe E.S. Application of 2D electrical resistivity imaging and cone penetration test to assess hazardous effect of near surface water on foundations in Lagos, Nigeria // Journal of Physics Conference series. 2017. Vol. 852. № 1. Article 012033.
27. Lin C.-P., Hung Y.-C., Yu Z.-H., Wu P.-L. Investigation of abnormal seepages in an earth dam using resistivity tomography // Journal of Geo- Engineering. 2013. Vol. 8. № 2. P. 61–70.
28. Johansson S., Dahlin T. Seepage monitoring in an earth embankment dam repeated resistivity measurements // European Journal of Environmental and Engineering geophysics. 1996. Vol. 1. P. 229–247.
29. Sjodahl P., Dahlin T., Johansson S. Using the resistivity method for leakage detection in a blind test at the Rossvation embankment dam test facility in Norway // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2010. Vol. 69. P. 643–658.
30. Ani D.C., Arewa J.O. Electrical resistivity imaging of suspected seepage channels in an earthen dam in Zaria, North-Western Nigeria // Open Journal of Applied Sciences. 2013. Vol. 3. P. 145–154.
31. Alemaw B.F., Keaitse E.O., Chaoka T.R. Management of water supply reservoirs under uncertainties in arid and urbanized environment // Journal of Water Resources and Protection. 2016. Vol. 8. P. 990–1009.
32. Al-Fares W. Contribution of the geophysical methods in characterizing the water leakage in Afamia B dam, Syria // Journal of Applied Geophysics. 2011. Vol. 75. № 3. P. 464–471.
33. Al-Fares W. Application of electrical resistivity tomography technique for characterizing leakage problem in Abu Baara earth dam, Syria // International Journal of Geophysics. 2014. Article ID 3681281.
34. Oladapo M.I., Adeoye O., Oluwakemi O., Adebobuyi F.S., Badejo O., Ifarajimi W. Seismic refraction study of Gurara dam phase II, northwestern Nigeria // Journal of Geology and Mining Research. 2013. Vol. 5. № 11. P. 239–249.
35. Minsley B.J., Burton B.L., Ikard S.J., Powers M. Hydrogeophysical investigations at Hidden dam, Raymond, California // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2011. Vol. 16. № 4. P. 145–164.
36. Sjodahl P., Dahlin T., Johansson S. Embankment dam seepage evaluation from resistivity monitoring data // Near Surface Geophysics. 2009. Vol. 7. № 5-6. P. 463–474.
37. Training Aids for Dam Safety: Evaluation of Seepage Conditions. Denver, Colorado, U.S.: Bureau of Reclamation, 2000.
38. Flores-Berrones R., Ramirez-Reynaga M. and Macari E.J. Internal erosion and rehabilitation of an earth dam // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2011. Vol. 137. № 2. P. 150–160.
39. Omofunmi E.O., Kolo J.G., Oladipo A.S., Diabana P.D., Ojo A.S. A review on effects and control of seepage through earth-fill dams // Current Journal of Applied Science and Technology. 2017. Vol. 22. № 5. P. 1–11.
40. Auvinet G., Lopez-Acosta N. P. Rapid drawdown condition in submerged slopes // 15 Presentations of Friends and Colleagues in Tribute to Eng. Jess Alberro Aramburu. Mexico City, Mexico: Instituto de Ingeniería (UNAM) & Mexican Society of Geotechnical Engineering (SMIG), 2010. P. 167–189. ISBN 978-607-02-0866-9.
41. Alberro J. Efecto de los flujos transitorios en el comportamiento de las estructuras de tierra: 18th Nabor Carrillo Lecture. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotecnica (SMIG), Tuxtla Gutierrez, Chiapas, Mexico, 2006. [Effect of transient flows on the behaviour of earth structures: 8th Nabor Carrillo Lecture, Mexican society of geotechnical engineering SMIG, Tuxtla Gutierrez, Chiapas Mexico, 2006 (in Spanish)].
42. Wang Y., Li C., Zhou X., Wei X. Seepage piping evolution characteristics in Bim soil – an environmental study // Water. 2017. Vol. 9. № 458. P. 1–18.
43. Fell R., Wan C., Foster M. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2003. Vol. 129. № 4. Article 307.
44. Brosten T.R., Llopis J.L., Kelley J.R. Using Geophysics to Assess the Condition of Small Embankment Dams: ERDC/GSL TR-05-17. Vicksburg, Mississippi, US: US Army Corps of Engineers Research and Development Center, 2005.
45. Montgomery J.R., Kofoed V.O. Mapping, tracking, and monitoring flow paths through earthen dams // Dam Safety 2001: the 18th annual conference of the Association of State Dam Safety Officials, held September 9–13, 2001, in Snowbird, Utah, USA. Lexington, Kentucky, USA: Association of State Dam Safety Officials, 2001.
46. Mustafa S.R., Ibrahim E.H., Elawadi E., Metwaly M., Agami N.A. Seismic refraction and resistivity imaging for assessment of groundwater seepage under a dam site, southwest of Saudi Arabia // International Journal of the Physical Sciences. 2012. Vol. 7. № 48. P. 6230–6239.

