

Научный электронный журнал гейнфо

Применение видеокаротажа для
исследования карстовых
проявлений в центральной
части г. Казани ... Стр. 18

Методы определения
содержания органических
веществ в грунтах: всегда ли
новое лучше старого? Стр. 28

Применение больших данных
и искусственного интеллекта
в геологии: краткий обзор
Стр. 36



GEOINFO

ISSN 2949-0677 (ONLINE)
WWW.GEOINFO.RU

ТОМ VII • 3-2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ НАУЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЖУРНАЛА «ГЕОИНФО»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Самарин Евгений Николаевич

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Абрамов Владимир Юрьевич

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

Артюшенко Игорь Александрович

Кандидат технических наук, доцент кафедры «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 МВА
baborykin@ya.ru

Белов Константин Владимирович

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

Бершов Алексей Викторович

Ассистент кафедры инженерной и экологической геологии, геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, генеральный директор, ООО «Петромоделинг»
alexey.bershov@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@igsnrr.ac.cn

Галкин Александр Николаевич

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры экологии и географии, УО «Витебский государственный университет им. 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.erenenko@gmail.com

Ермолов Александр Александрович

Кандидат географических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории геоэкологии Севера, географический факультет МГУ им. 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 (Шэнчжэнь, КНР)
6620240023@smbu.edu.com

Королев Владимир Александрович

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной и экологической геологии, геологический факультет МГУ им. 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 им. 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)
liujiank@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.miiigaik.ru

Маштаков Александр Сергеевич

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

Мирный Анатолий Юрьевич

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

Молдобеков Болот Дүйшеналиевич

Кандидат геолого-минералогических наук, доцент, содиректор, Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли
b.moldobekov@caig.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 им. М.В. Ломоносова в г. Душанбе
ffaartiidd@bk.ru

Самсонов Тимофей Евгеньевич

Кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник кафедры картографии и геоинформатики географического факультета, МГУ им. 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 им. М.В. Ломоносова
v.stepanenko@rcc.msu.ru

Судакова Мария Сергеевна

Кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры сейсмометрии и геоакустики, геологический факультет МГУ им. 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. Герсеванова АО «НИЦ Строительство»
trufanov54@gmail.com

Федоренко Евгений Николаевич

Кандидат геолого-минералогических наук, научный консультант, ООО «НИП-Информатика»
Evgeniy.Fedorenko@nipinfor.ru

Фоменко Игорь Константинович

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

Фролова Юлия Владимировна

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

Харитонова Наталья Александровна

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии, геологический факультет МГУ им. 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 им. Н.И. Маккавеева, профессор кафедры гидрологии суши, географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова
hydroserg@mail.ru

Черепанский Михаил Михайлович

Доктор геологических наук, профессор кафедры гидрогеологии имени В.М. Швеца, гидрогеологический факультет МГРИ им. 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

Кандидат технических наук, директор НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, учёный секретарь Российского общества по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению (РОМГГиФ)
linegeo@mail.ru

Шепитко Таисия Васильевна

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



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: 25.11.2025

© Ананко Виктор Николаевич, 2025

© ГеоИнфо, 2025

Фото на обложке: ГеоИнфо

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Структура и систематика эколого-геологических систем транспортно-коммуникационных комплексов 6

Королёв В.А., Галкин А.Н.

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Применение видеокаротажа для исследования карстовых проявлений в центральной части г. Казани 18

Латыпов А.И., Гараева А.Н., Яббарова Е.Н., Усманов Р.М., Кинжалова И.Н.

ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Методы определения содержания органических веществ в грунтах: всегда ли новое лучше старого? 28

Самарин Е.Н.

ПЕРЕВОДНЫЕ СТАТЬИ

Применение больших данных и искусственного интеллекта в геологии: краткий обзор 36

Чэнь Л., Ван Л., Мяо Цз., Гао Х., Чжан Ю., Яо Я., Бай М., Мэй Л., Хэ Цз.

Подробнее о роли аналитики больших данных в инженерно-геологических изысканиях 44

Вани В.Д., Радж В.Х., Датт А., Равиндранатх Р., Тьяги Л.К., Алмусави М., Ядав Д.К.

Оперативная количественная оценка показателей оползневой опасности с использованием беспроводных датчиков и управления данными на основе искусственного интеллекта 54

Кширасагар П.Р., Манохаран Х., Касим С., Кхан А.И., Аlam М.М., Абушарк Ю.Б., Абера В.

Применение искусственного интеллекта при геотехнических изысканиях 68

Мэй Х., Чжан В., Гу Цз.

ПРИЛОЖЕНИЕ. ДИСКУССИЯ ПРОФЕССИОНАЛОВ

Обратная сторона неразумной экономии на инженерных изысканиях 80

Загорский С., Щербинин С.

Малым рекам юга России не хватает силы половодья 88

Дьяченко Л.

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

1.6.21. Геэкология

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, аэрородомов, мостов и транспортных тоннелей

2.9. Транспортное строительство

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог



ECOLOGICAL GEOLOGY

- Structure and systematics of ecological-geological systems of transport-and-communication complexes** 6
- Korolev V.A., Galkin A.N.

ENGINEERING GEOLOGY

- Using video logging to study karst manifestations in the central part of Kazan** 18
- Latypov A.I., Garaeva A.N., Yabbarova E.N., Usmanov R.M., Kinzhalova I.N.

SOIL SCIENCE

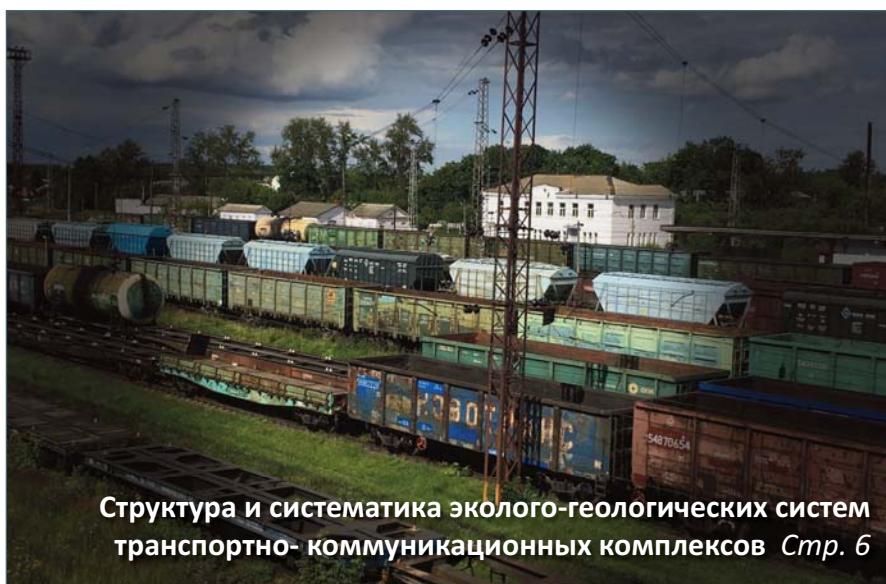
- Methods for determining the organic matter content in soils: is the new always better than the old?** 28
- Samarin E.N.

TRANSLATED ARTICLES

- Review of the application of big data and artificial intelligence in geology** 36
- Chen L., Wang L., Miao J., Gao H., Zhang Y., Yao Y., Bai M., Mei L., He J.
- Digging deeper: the role of big data analytics in geotechnical investigations** 44
- Vani V.D., Raj V.H., Dutt A., Raveendranath R., Tyagi L.K., Almusawi M., Yadav D.K.
- Expedite quantification of landslides using wireless sensors and artificial intelligence for data controlling practices** 54
- Kshirsagar P.R., Manoharan H., Kasim S., Khan A.I., Alam M.M., Abushark Y.B., Abera W.
- The application of artificial intelligence in geotechnical investigation** 68
- Mei H., Zhang W., Gu J.

APPENDIX. DISCUSSION OF PROFESSIONALS

- The flip side of unreasonable cost-cutting on engineering surveys** 80
- Zagorskii S., Shcherbinin S.
- Small rivers in southern Russia lack the spring flood strength** 88
- D'yachenko L.

**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: 25.11.2025

© Ananko Viktor Nikolaevich, 2025

© GeoInfo, 2025

Cover photo: GeoInfo





Источник фото: ГеоИнфо

СТРУКТУРА И СИСТЕМАТИКА ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНО-КОММУНИКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Поступила в редакцию: 14.06.2025

Принята к публикации 11.07.2025

Опубликована 25.11.2025

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

ГАЛКИН А.Н.

Профессор кафедры экологии и географии Витебского государственного университета имени П.М. Машерова, д. г.-м. н., профессор, г. Витебск, Белоруссия
galkin-alexandr@yandex.by

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются вопросы структуры, систематики и многообразия эколого-геологических систем транспортно-коммуникационных комплексов – одних из важнейших объектов техносферы, выполняющих роль перевозки различных грузов, людей, транспортировки полезных ископаемых, передачи энергии и информации и рассматриваемых как разновидность экосистем. Анализируются характерные эколого-геологические особенности их абиотических и биотических компонентов, а также взаимосвязи между ними, учет которых необходим при инженерно-экологических изысканиях и исследованиях на территориях расположения транспортно-коммуникационных комплексов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

эколого-геологическая система (ЭГС); транспортно-коммуникационные комплексы; структура; систематика, многообразие.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Королев В.А., Галкин А.Н. Структура и систематика эколого-геологических систем транспортно-коммуникационных комплексов // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 3. С. 6–17. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-6-17.

STRUCTURE AND SYSTEMATICS OF ECOLOGICAL-GEOLOGICAL SYSTEMS OF TRANSPORT-AND-COMMUNICATION COMPLEXES

Received: 14.06.2025

Accepted for publication 11.07.2025

Published 25.11.2025

KOROLEV V.A.

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

GALKIN A.N.

DSc, professor at the Department of Ecology and Geography, Masherov Vitebsk State University, Vitebsk, Belarus
galkin-alexandr@yandex.by

ABSTRACT

The article examines the structure, systematics, and diversity of ecological-geological systems of transport-and-communication complexes – some of the most important components of the technosphere, which perform the functions of transporting various goods and people, conveying mineral resources, and transmitting energy and information, and which are considered a specific type of ecosystems. The paper analyzes the characteristic ecological-geological features of their abiotic and biotic components, as well as the interrelations between them, which must be taken into account during environmental engineering surveys and investigations conducted in areas where transport-and-communication complexes are located.

KEYWORDS:

ecological-geological system (EGS); transport-and-communication complexes; structure; systematics.

FOR CITATION:

Korolev V.A., Galkin A.N. Struktura i sistematika ekologo-geologicheskikh sistem transportno-kommunikatsionnykh kompleksov [Structure and systematics of ecological-geological systems of transport-and-communication complexes]// Geoinfo. 2025. T. 7. № 3. S. 6-17.
DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-6-17 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

Среди существующего многообразия антропогенных эколого-геологических систем ЭГС транспортно-коммуникационных комплексов занимают особое положение. Именно от их стабильного функционирования зависит не только своевременное и качественное удовлетворение потребностей населения в перевозках и различных услугах, но и бесперебойная работа всех отраслей экономики, что с точки зрения экологии является важнейшим условием функционирования экосистем. Более того, надежность и безопасность транспортно-коммуникационной инфраструктуры напрямую влияют на национальную безопасность любого государства, что также имеет экологическое значение.

Эколого-геологической системой транспортно-коммуникационного комплекса называется определенный объем литосферы, в котором происходит взаимодействие геологической среды и

биоты, включая человека (социум), и обеспечение его транспортно-информационными потоками вещества, энергии и информации. Она представляет собой часть экосистемы и рассматривается как объект исследования экологической геологии, определяющий прежде всего ресурсную экологическую функцию литосферы [1, 2]. Данная ЭГС включает в себя природные компоненты: горные породы (литотоп), подземные воды (гидротоп), почвы (эдафотоп), геохимические и геофизические поля, приземный воздух (атмотоп), а также современные геологические процессы, влияющие на существование и развитие живых организмов, но одновременно техногенно измененные в той или иной степени. Наряду с ними важную роль играют и техногенные компоненты – инженерные сооружения разных типов, многие из которых являются источниками техногенной трансформации природных компонентов этих ЭГС.

Транспортно-коммуникационная система на территории любой страны представляет собой совокупность экономических субъектов (отраслей, предприятий и организаций) и видов деятельности, обеспечивающих и (или) создающих условия для функционирования отраслей материального производства и жизнедеятельности общества путем их снабжения транспортно-информационными потоками вещества, энергии и информации. По существу, это интегрированная сеть, включающая все виды транспорта (автодорожный, железнодорожный, водный, воздушный, космический и трубопроводный), а также объекты передачи электроэнергии и связи (информации), тесно взаимосвязанные и дополняющие друг друга. Ее ключевым ядром выступает транспорт или транспортная система, которая характеризуется согласованным развитием, эффективным использованием каждого вида транспорта и включает в себя

материально-техническую базу, технические средства, мощности, пропускную способность, а также совместимость и взаимодополняемость используемых технологий. Основная роль транспортной системы – обеспечивать потребности всех хозяйствующих субъектов государства и населения в перевозках и международных связях. Кроме того, транспорт вносит большой вклад в экспортный потенциал многих стран мира, успешно экспортируя транспортные услуги и став, по существу, одной из важных отраслей специализации в международном разделении труда. С экологической точки зрения транспортная система обеспечивает реализацию ресурсной экологической функции литосферы.

Несмотря на важность ЭГС транспортно-коммуникационных комплексов, их эколого-геологические особенности изучены недостаточно. Поэтому целью настоящей статьи является выявление и характеристика особенностей этих систем, а также их структуры и систематики.

РАССМОТРИМ ОСОБЕННОСТИ МИРОВОЙ ТРАНСПОРТНО-КОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ►

Все коммуникационные маршруты, транспортные предприятия и транспортные средства вместе формируют глобальную транспортную сеть. Она сформировалась в XX веке и продолжает развиваться. В ней можно выделить транспортные системы экономически развитых и развивающихся стран, а также региональные транспортные системы [3].

Лидирующую позицию по уровню развития в мире занимает региональная транспортная система Северной Америки. Она охватывает около 1/3 общей протяженности мировых транспортных путей, а по некоторым их видам, таким как автомобильные и трубопроводные, эта доля еще выше. Северная Америка лидирует и по объему грузоперевозок для большинства видов транспорта. Транспортная система Западной Европы уступает североамериканской по дальности перевозок, однако превосходит по плотности сети и интенсивности движения. На региональную систему стран СНГ приходится лишь десятая часть мировой транспортной сети, но по объему грузооборота она занимает первое место в мире.

Транспортный сектор в мировом ВВП составляет от 4 до 9%. Ежегодно в мире всеми видами транспорта перевозится более 100 млрд т грузов и свыше 1 трлн

пассажиров. В этих перевозках задействовано более 650 млн автомобилей, 40 тыс. морских судов, 10 тыс. регулярных рейсов самолетов, 200 тыс. локомотивов, составляющих комплекс технических транспортных средств. И их число постоянно увеличивается [3].

Важнейшим показателем эффективности работы транспорта является транспортная производительность, которая отражает соотношение между объемом перевозок и объемом производства.

Что касается путей сообщения, протяженность железнодорожных и автомобильных дорог в 1970–1990-х годах в целом стабилизировалась. Более того, в США и Западной Европе в последние десятилетия наблюдается сокращение железнодорожной сети из-за конкуренции с автотранспортом. В целом, происходят не столько количественные, сколько качественные изменения в мировой транспортной сети: увеличивается протяженность электрифицированных железных дорог, автомагистралей с твердым покрытием и сетей трубопроводов большого диаметра.

В мировом грузообороте преобладает морской транспорт, доля железнодорожного транспорта значительно сократилась, а доля трубопроводного стремительно растет. Основная часть международных морских перевозок приходится на большие объемы жидких и сыпучих грузов, исчисляемые сотнями миллионов тонн, включая сырую нефть, нефтепродукты, железную руду, каменный уголь и зерно. Отдельно стоит отметить генеральные, или тарно-штучные, грузы, включающие готовую промышленную продукцию, полуфабрикаты и продукты питания, годовой объем которых оценивается в 700 млн т.

В развитии мирового грузового транспорта важной тенденцией стала контейнеризация. Около 40% генеральных грузов теперь перевозится в контейнерах. Создаются трансконтинентальные контейнерные «мосты», комбинирующие морской транспорт с регулярными железнодорожными составами и автопоездами-контейнеровозами, например Транссибирский, Трансамериканский маршруты, маршруты Япония – Восточное побережье США, Западная Европа – Ближний и Средний Восток [3]. Ставятся все популярнее интермодальные перевозки, в которых задействованы два или более вида транспорта. Для таких перевозок характерны строгие сроки и регулярность доставки грузов.

В 1990-е годы началось формирование транспортных коридоров (полимагистралей), объединяющих различные

виды транспорта для перевозок грузов через несколько стран. В настоящее время в Европе выделено девять таких коридоров. На территории России и Белоруссии есть два коридора:

- 1) Берлин – Варшава – Минск – Москва – Нижний Новгород (с возможностью продления до Екатеринбурга);
- 2) Хельсинки – Санкт-Петербург – Москва / Псков – Киев – Кишинев – Бухарест – Димитровград – Александрополис с ответвлением Калининград / Клайпеда – Каунас – Вильнюс – Минск – Киев [4].

Вышесказанное позволяет заключить, что международная транспортировка грузов все больше становится единым технологическим процессом, часто осуществляемым на основе единого транспортного документа с непрерывным отслеживанием груза от отправителя до получателя.

Во второй половине XX века активизация внешнеэкономических, туристических, научно-технических, культурных, социальных и прочих контактов спровоцировала значительный скачок в международной миграции населения. В сфере перевозок пассажиров первенство удерживает личный автотранспорт, чья доля увеличилась с 56,8 до 61,0%. Авиационный транспорт почти сравнялся с железнодорожным и в будущем может его превзойти. В международных перевозках пассажиров ведущую позицию занимает авиатранспорт, обладающий явным преимуществом перед другими видами транспорта благодаря скорости доставки.

Наряду с ролью транспорта растет значение средств коммуникации, обеспечивающих передачу информации. В настоящее время помимо традиционных средств связи (радио, телефона, телеграфа, телефакса), активно используются современные электронные и космические технологии – мобильные коммутаторы, факсимильная, оптоволоконная и спутниковая связь. Последняя оказывает неизбежное влияние на развитие разных индустриальных сфер (в том числе космической), на экономический рост государства и на уровень жизни населения.

Современное развитие коммуникационных сетей в мире характеризуется существенной неравномерностью. Около 40% всех телефонных линий на планете сосредоточено в США. В России уровень телефонизации пока не соответствует современным стандартам. В сельской местности телефонизировано только около трети торговых, меди-

цинских и образовательных учреждений. Примером инновационной технологии в сфере информатики и связи является внедрение оптоволоконной связи. В частности, созданы две подводные оптоволоконные линии – через Тихий океан длиной 11,5 тыс. км (США – Гавайи – Япония) и через Атлантический океан длиной 6,5 тыс. км (США – Западная Европа) [3].

Резюмируя вышесказанное, еще раз подчеркнем, что, несмотря на обширность территорий, занимаемых ЭГС транспортно-коммуникационных комплексов, они остаются практически неизученными в эколого-геологическом отношении, а об их абиотических и биотических компонентах имеются лишь разрозненные сведения. В частности, слабо разработанными остаются вопросы их структуры и систематики, рассматриваемые ниже.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СИСТЕМАТИКИ ЭГС ТРАНСПОРТНО-КОММУНИКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ►

Структура эколого-геологических систем транспортно-коммуникационных комплексов показана на рисунке, из которого следует, что для них характерны такие же основные структурные компоненты (подсистемы), как и для других техногенных ЭГС – как абиотические (литотоп, гидротоп, атмотоп, технические сооружения) и биотические (эдафотоп), так и биотические (микробоценоз, фитоценоз, зооценоз), но техногенно измененные или искусственные (антропогенные) за счет социума и создаваемых им технических транспортно-коммуникационных сооружений.

Кроме того, как и в других техногенных эколого-геологических системах, в транспортно-коммуникационных ЭГС основное значение имеют различные технические подсистемы, такие как авто- и железные дороги, взлетно-посадочные полосы аэропортов, космодромы, линии электропередачи и связи, продукто- или трубопроводы, а также ряд других объектов их инфраструктуры (различная техника, вокзалы, депо, ангары, парки, АЗС и др.). Именно эти объекты оказывают наибольшее влияние на живые организмы в этих системах и формируют внешний вид ЭГС.

Технические сооружения вместе с их литогенной основой – литотопом – в зависимости от сочетаний образуют те или иные литотехнические системы (ЛТС). Это позволяет выделить в дан-

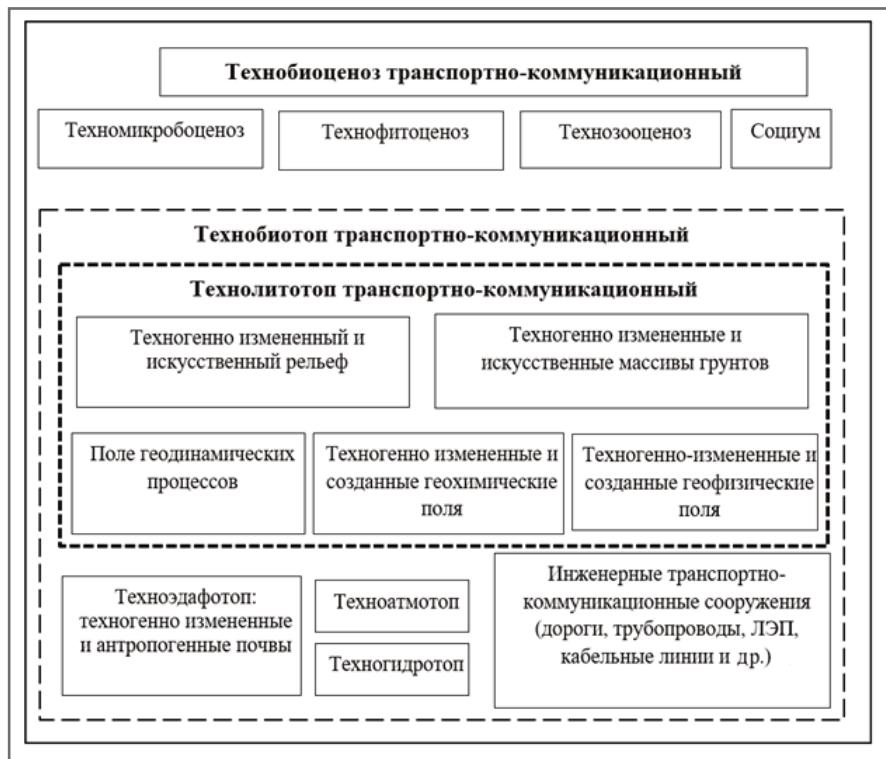


Рис. Структура ЭГС транспортно-коммуникационных комплексов

ном классе ЭГС восемь их типов: ЭГС **автотранспортных, железнодорожных, транспортных терминалов, водотранспортных, авиационных, транспортно-космических, коммуникационно-энергетических и промышленно-продуктопроводных комплексов** (см. таблицу) [5].

Основу **ЭГС автотранспортного комплекса** составляют автотранспортные линейные литотехнические системы (ЛТС), состоящие из дорожного полотна (разных типов), дорожных инженерных устройств и комплексов вспомогательных сооружений (в том числе автотранспортных предприятий), а также все виды автотранспорта.

Аналогично, основой **ЭГС железнодорожного комплекса** являются линейные железнодорожные ЛТС, состоящие из железнодорожного пути с сопутствующими инженерными сооружениями, а также подвижной состав с соответствующей инфраструктурой, депо и др.

ЭГС транспортных терминалов включает в себя комплекс наземных сооружений, технических и технологических устройств, взаимосвязанных в рамках единой системы и предназначенные для выполнения операций, связанных с процессом транспортировки, таких как: погрузочно-разгрузочные, складские работы, таможенное оформление, консолидация, декон-

солидация различных партий грузов, коммерческо-информационное и финансовое обслуживание. Такой комплекс, в котором осуществляется централизованное планирование с учетом обеспечения логистического товародвижения, еще называют транспортно-логистическим терминалом [6]. Как и прочие ЭГС, они включают в себя абиотические и биотические компоненты.

Существуют два основных типа терминалов: универсальные и специализированные. Универсальные терминалы – это комплексы складских помещений с центром распределения, предназначенные для обработки разнообразных, но совместимых грузов. В отличие от них, специализированные терминалы ориентированы на работу с конкретным видом груза, например нефтепродуктами или контейнерами.

Транспортно-логистический терминал отличается от логистического центра, склада и распределительного центра по своим функциям (**логистический центр** служит для хранения широкого спектра товаров, находящихся на разных этапах логистической цепочки – от поставщика до конечного потребителя; **распределительный центр** предназначен для хранения товаров на этапе их перемещения от места производства к оптовым или розничным точкам продаж).

Транспортно-логистические терминалы могут занимать значительные

Таблица. Систематика класса эколого-геологических систем транспортно-коммуникационных комплексов

Тип комплекса ЭГС	Подтип комплекса ЭГС	Группа комплекса ЭГС
1. Автотранспортный	Подвижного состава автотранспорта и автомобильных дорог	Грузового транспорта (общего назначения, самосвального и специализированного) Прицепов, полуприцепов и роспусков Автобусного транспорта (общего назначения и специализированного) Легкового транспорта (для личных перевозок, специализированного и специального) Автомобильных дорог разного назначения с инфраструктурой Вспомогательных сооружений (автозаправочных станций и станций технического обслуживания, мотелей, дорожных гостиниц, остановочных пунктов, станций, площадок отдыха и др.)
	Автотранспортных предприятий	Грузовых, пассажирских и смешанных грузопассажирских автocomбинатов и объединений Грузовых станций и терминалов Транспортно-экспедиционных агентств, контор и логистических центров Пассажирских станций и вокзалов Баз механизации погрузочно-разгрузочных работ, выполняющих грузовые операции
	Железнодорожного пути с инфраструктурой	Полотна (насыпи) железных дорог с инфраструктурой Раздельных пунктов (разъездов, обгонных пунктов, путевых постов и др.)
	Подвижного состава	Локомотивов (по роду работы: грузовых, пассажирских и маневровых) Моторвагонного подвижного состава (дизель-поездов, электропоездов и др.) Вагонов (пассажирских, грузовых, специализированных).
		Локомотивных депо с парком локомотивов (тепловозных, электровозных, моторвагонных, дизельных и смешанных) и инфраструктурой
		Вагонных депо (по типу вагонов с соответствующей инфраструктурой)
	Систем электроснабжения	Сооружений внешней энергетической системы (электрогенерирующих станций, распределительных подстанций, электромагистралей)
	Автоматизированных транспортных систем	Сооружений тяговой системы (тяговых преобразовательных подстанций и контактной сети)
	Систем железнодорожной сигнализации и связи	Сооружений и устройств системы автоматики и телемеханики
3. Транспортных терминалов	Универсальных и специальных транспортно-логистических терминалов	Сооружений технических средств, предназначенных для управления движением поездов и маневровой работы
4. Воднотранспортный	Универсальных и специальных транспортно-логистических терминалов	Комплексов складских и др. сооружений с логистическим центром распределения
	Водного пути	Внешнего водного пути (морей, включая заливы, и океанов)
	Флота (водных транспортных средств)	Внутреннего водного пути (естественного – реки или озера, судоходного или сплавного; искусственного – водохранилища, речного гидроузла, судоходного канала, межбассейнового водотранспортного соединения)
	Систем прибрежных пунктов	Морских и речных судов (по назначению и способу перемещения)
	Судоремонтных предприятий	Портов (по назначению с соответствующей инфраструктурой)
	Систем технических средств управления на водном транспорте	Мастерских, ремонтно-эксплуатационных баз флота, доков и т.п. Судов-мастерских
5. Авиационный	Систем технических средств управления на водном транспорте	Средств связи, приема, передачи и обработки информации
	Летательных аппаратов и их парка	Пассажирских, грузовых и специализированных (для оказания медицинской помощи, сельхоз работ, тушения пожаров и др.) летательных аппаратов
	Трасс воздушных линий	Трассовых аэродромов с инфраструктурой
	Аэропортов	Диспетчерских пунктов Взлетно-посадочных полос (разных классов) Аэровокзалов с инфраструктурой
	Систем обслуживания воздушных судов	Комплексов сооружений и устройств инженерно-авиационной службы
6. Транспортно-космический	Ракетно-космического	Ракет-носителей, космических аппаратов с инфраструктурой Стартового комплекса с инфраструктурой
	Наземного комплекса управления космическими аппаратами	Технических средств и сооружений для управления аппаратами, сбора и передачи информации
	Посадочного комплекса и поисково-спасательных средств	Зданий и сооружений с соответствующей инфраструктурой
7. Коммуникационно-энергетический	Сооружений связи	Сухопутных или подводных линий связи и сопутствующей инфраструктурой
	Электрических сетей	Линий ЛЭП разных классов с сопутствующей инфраструктурой
8. Промышленно-производственный	Нефтепродуктопроводов	Сухопутных или подводных нефтетрубопроводов с сопутствующей инфраструктурой
	Конденсатопроводов	Сухопутных или подводных конденсатопроводов с сопутствующей инфраструктурой
	Газопроводов	Сухопутных или подводных газопроводов с сопутствующей инфраструктурой
	Водопроводов	Водопроводных и канализационных сетей с сопутствующей инфраструктурой
	Аммиакопроводов	Сухопутных или подводных аммиакопроводов с сопутствующей инфраструктурой
	Пульпопроводов	Наземных пульпопроводов с сопутствующей инфраструктурой
	Метанолопроводов	Метанолопроводов с сопутствующей инфраструктурой
	Этиленопроводов	Этиленопроводов с сопутствующей инфраструктурой

площади – от 60 до 100 га и более в зависимости от выполняемых функций. Они имеют свободные проходы и проезды между зданиями, а также продуманную планировку. Грузовые терминалы, будучи предприятиями, занимаются множеством видов деятельности, таких как перевозка, обработка и хранение грузов. В процессе своей работы терминал взаимодействует с перевозчиками, клиентами, посредниками, таможенными службами, банками и другими партнерами, что часто приводит к размещению их представительств на территории терминала.

В настоящее время широко практикуется концентрированная переработка больших объемов грузов, что привело к созданию специализированных терминалов. Также существуют таможенно-логистические терминалы – комплексы зданий и площадей, которые предоставляют услуги по таможенному оформлению товаров и транспортных средств, их хранению и другим сопутствующим услугам [7].

ЭГС водно-транспортного комплекса объединяет водный путь (включая его дно – донный литотоп), флот (транспортные средства) и прибрежную сопутствующую инфраструктуру (порты, судоремонтные предприятия, средства связи и др.). Ключевым элементом данной ЭГС является линейная водно-транспортная ЛТС, включающая водный путь (то есть любой судоходный водный путь, проложенный по рекам, озерам, морям, океанам, водохранилищам или каналам), а также донный литотоп и технические средства водного транспорта с соответствующей инфраструктурой.

Критериями для выделения водного пути в качестве компонента экологогеологической системы¹ является наличие вдоль этого пути донного литотопа, представленного различными донными отложениями и грунтами, так или иначе взаимодействующими с проходящим водным транспортом [8]. Вопрос о выделении донного литотопа для водемов с большими глубинами (морями, океанами) остается открытым, поскольку взаимодействие донных грунтов с проходящим водным транспортом в этом случае носит косвенный (опосредованный) характер. Кроме того, необходимо иметь в виду, что водные пути прокладываются вдали от мелей, рифов, порогов и других донных препят-

ствий, но в ряде случаев вдоль водных путей проводятся дноуглубительные работы. При этом создается искусственный донный литотоп.

Судоходные водные пути делятся на внутренние и внешние. Внешние проходят в пределах морей и океанов и используются для судоходства в естественном состоянии, за исключением подходов к морским портам (морских каналов), которые устраивают с искусственными донными литотопами. Внутренние пути – это часть гидросферы, которая находится внутри какой-либо территории (озера, реки, водохранилища), обозначена навигационными знаками или иным способом и используется в целях судоходства. Примерами таких водных путей с искусственными донными литотопами являются шлюзованые реки, судоходные каналы, искусственные моря, водохранилища и др. [7]

Основным техническим компонентом такой ЭГС является флот – совокупность судов различных типов, размеров и назначений. В зависимости от типа перевозимого груза, суда делятся на сухогрузные и наливные. Сухогрузные предназначены для перевозки сыпучих материалов (зерна, руды, угля) и жидкого грузов в упаковке. Наливные суда, или танкеры, используются для транспортировки жидкостей наливом. По назначению суда также подразделяются на разные типы.

Другим техническим компонентом этих ЭГС является береговая инфраструктура (порты, пристани, остановочные пункты и т.п.).

Основу **ЭГС авиационного комплекса** составляют авиационные ЛТС, летательные аппараты разных типов и назначения и их парк, воздушные линии (трассы) и наземная инфраструктура, включая аэропорты, аэровокзалы и аэродромы со взлетно-посадочными полосами, ангары, авиаремонтные заводы и др. Как и в предыдущем случае, критерием для выделения ЭГС данного типа является наличие вдоль тех или иных участков воздушных трасс литотопа, находящегося во взаимодействии с летательными аппаратами. Если этого взаимодействия нет, то данная экосистема не может рассматриваться в качестве эколого-геологической. Это прямое взаимодействие имеется лишь на начальных и конечных участках авиатрасс – вблизи взлетно-посадочных полос, то есть там,

где высота полета летательных аппаратов незначительна, а также непосредственно на самих полосах и аэродромных площадках, литотопы которых испытывают прямое механическое и иное воздействие от самолетов. Во всех прочих случаях воздушные трассы не входят в качестве компонента в ЭГС авиационного комплекса, так как у них отсутствует литотоп. Летно-эксплуатационное обслуживание самолетов включает в себя множество различных наземных устройств и систем, необходимых для проведения полетов: аэродромное, радиотехническое, светотехническое, метеорологическое оборудование, а также медицинское обслуживание и обеспечение охраны воздушных судов и др.

ЭГС транспортно-космического комплекса объединяет ракетно-космический комплекс (РКК), наземную инфраструктуру управления космическими аппаратами, специализированные наземные комплексы, посадочный комплекс, а также поисково-спасательные силы и средства [9]. В состав таких ЭГС включаются лишь те компоненты РКК, которые имеют литотоп, то есть геологическую основу. Таким образом, космические трассы исключаются из данных ЭГС.

Ракетно-космический комплекс – это сложная система, объединяющая ракету-носитель (или несколько ракет) с необходимым оборудованием и наземной инфраструктурой для обеспечения ее функционирования. Он охватывает все этапы жизненного цикла ракеты начиная с транспортировки и хранения и заканчивая подготовкой к запуску, самим запуском и контролем полета на начальном участке траектории. В состав РКК входят [10]:

- 1) ракета-носитель – основной элемент, предназначенный для вывода космических аппаратов на орбиту;
- 2) технический комплекс – оборудование и сооружения для обслуживания, подготовки и испытаний ракеты;
- 3) стартовый комплекс – площадка и оборудование, обеспечивающие предпусковые операции и запуск ракеты;
- 4) комплекс средств измерений и обработки информации – системы для отслеживания полета и анализа данных;
- 5) комплекс падения отделяемых частей – зоны, куда падают отработавшие ступени ракеты.

Ракетно-космический комплекс – это универсальная система, являющаяся

¹ Напомним, что обязательным компонентом любой ЭГС является литотоп – геологическая составляющая экосистемы, ее литогенная основа, взаимодействующая с ее прочими абиотическими и биотическими компонентами.

частью более крупных космических комплексов. Его характеристики определяются типом используемой ракеты-носителя.

Ключевыми элементами РКК, обеспечивающими наземную подготовку ракет и космических аппаратов, являются технический (в совокупности с монтажно-испытательным комплексом) и стартовый комплексы, основанием для которых служат искусственные литотопы. Они составляют основу космической инфраструктуры космодрома. Техническое оборудование этих комплексов является базой для наземной эксплуатации ракет-носителей. Монтажно-испытательный комплекс (МИК) и технические комплексы – это взаимосвязанные системы, включающие оборудование, средства управления и сооружения, предназначенные для проведения всех необходимых работ с ракетами-носителями, космическими аппаратами и разгонными блоками до их отправки на стартовую площадку. Стартовый комплекс – это совокупность подвижного и стационарного оборудования, средств управления и сооружений, обеспечивающих все операции с ракетой-носителем (или ее частями) с момента ее прибытия на стартовую позицию и до самого запуска [9].

Монтажно-испытательный и технический комплексы, стартовый комплекс, заправочно-нейтрализационная станция, а также средства контроля и управления космическими ракетами в процессе подготовки к запуску и выведению космического аппарата (или другого орбитального объекта) на опорную орбиту находятся на космодроме – специализированном районе местности, оборудованном в инженерном и топогеодезическом отношении, с размещенными на нем сооружениями, инженерными коммуникациями, силами и средствами, осуществляющими и обеспечивающими хранение и поддержание в установленной готовности, подготовку к пуску, пуск и контроль полета ракет космического назначения на участке выведения. После того как космический аппарат (КА) будет выведен на опорную орбиту, контроль его функционирования переходит к средствам наземного комплекса управления (НКУ). НКУ представляет собой набор технических средств и сооружений, предназначенных для управления работой орбитальных объектов с момента их вывода на орбиту. Эти средства управляют как одним КА, так и несколькими одновременно. НКУ совместно с бортовым

комплексом управления (БКУ) составляет автоматизированную систему управления (АСУ) КА. Обычно в НКУ входят центр управления полетом (ЦУП) и наземный автоматизированный комплекс управления (НАКУ) орбитальными средствами. НАКУ включает в себя необходимую инфраструктуру и технические системы, командно-измерительные и измерительные пункты, центры и пункты управления орбитальными средствами, а также центры обработки измерительной информации, которые предназначены для формирования наземных комплексов, осуществляющих автоматизированный контроль параметров полета, состояния бортовой аппаратуры и управления их работой [9]. На завершающих этапах эксплуатации орбитальных средств космического комплекса могут быть задействованы поисковые и эвакуационные средства, например для спускаемого аппарата, доступные на полигоне посадки и на космодроме.

Все данные о работе бортовой аппаратуры ракеты-носителя поступают в измерительный комплекс космодрома для дальнейшего анализа. Информация о работе бортовых систем КА передается в командно-измерительные комплексы (КИК) и затем в центр управления. Необходимые команды и программы управления поступают в систему управления КА из ЦУП.

Специальный комплекс служит для приема, регистрации, обработки, хранения и передачи специальной информации с КА потребителям. Он включает в себя технические средства и сооружения с соответствующим оборудованием и размещается в центрах приема и обработки информации различных государственных структур, главных штабов видов Вооруженных сил и других заинтересованных организаций [9].

ЭГС коммуникационно-энергетического комплекса включает абиотические компоненты – литотоп и гидротоп (техноприродные, природно-техногенные или антропогенные), технические устройства (коммуникационно-энергетические объекты), эдафотоп как биокосный компонент, а также биотические компоненты (микробо-, фито- и зооценозы, в той или иной степени техногенно измененные, и социум). Данный комплекс предназначен для обеспечения различных видов связи (передачи информации), а также для передачи, преобразования и распределения электроэнергии. Он объединяет сооружения связи и объекты электрических

сетей. В состав комплекса входят многочисленные инфраструктурные элементы: базовые станции, ЛЭП, подстанции, распределительные пункты, токопроводы, принимающие и распределяющие устройства, а также здания и подъемно-транспортные средства, которые используются для работ, связанных с эксплуатацией этих объектов и др.

ЭГС промышленно-продуктопроводного комплекса объединяет: искусственные сооружения для транспортировки различных жидких и газообразных веществ (нефти, нефтеконденсата, метана, этилена, этанола, аммиака и др.), а также твердых веществ в виде растворов (пульпы); отраслевые предприятия трубопроводного транспорта, обеспечивающие надежное функционирование инженерных сооружений по перекачке продуктов. Технические элементы системы трубопроводного транспорта включают:

- 1) непосредственно трубопровод – линейную магистраль из сваренных и соответствующим образом изолированных труб с устройствами электрозащиты;
- 2) перекачивающие и компрессорные станции в виде начальных и промежуточных станций для транспортировки жидкой или газообразной продукции по трубе;
- 3) линейные узлы, представляющие собой устройства для соединения или разъединения параллельных или пересекающихся трубопроводов и перекрытия отдельных участков линий при ремонте;
- 4) линии электроснабжения, если силовые агрегаты (насосы, компрессоры) имеют электрический привод, и линии связи для передачи необходимой информации, обеспечивающей нормальное функционирование системы [7].

Различают промышленные (технологические) и магистральные трубопроводы. Первые являются частью производственной инфраструктуры предприятий и служат для перемещения сырья (газа, пара, жидкостей), полуфабрикатов, готовой продукции или отходов в рамках технологических процессов, вторые используются для транспортировки нефти и газа от мест добычи к местам переработки и до конечного потребления.

Магистральный трубопровод – это протяженная инженерная конструкция в виде непрерывной трубы, дополненная комплексом сооружений, обеспечивающих транспортировку жидкости или газа на большие расстояния с

заданными параметрами, такими как давление, температура и объем перекачки. В отличие от других линейных объектов, например дорог, трубопровод постоянно подвергается высоким нагрузкам из-за внутреннего давления транспортируемого вещества, функционируя как сосуд под давлением. Состав и назначение элементов трубопровода зависят от типа перекачиваемого продукта. Например, *основными компонентами магистрального нефтепродукто- или нефтепровода являются* [11, 12]:

- 1) головная перекачивающая станция, где происходит сбор нефти или нефтепродуктов, их приемка, сортировка, учет и подготовка к дальнейшей транспортировке по трубопроводу;
- 2) подводящие трубопроводы, соединяющие источники нефти или нефтепродуктов (месторождения, заводы) с головной станцией, доставляя сырье в резервуары;
- 3) промежуточные перекачивающие станции, расположенные вдоль трассы и усиливающие давление с обеспечением дальнейшей перекачки продукта;
- 4) конечный пункт, где происходит прием продукта из трубопровода, его распределение между потребителями или перегрузка на другие виды транспорта;
- 5) линейные сооружения – сам трубопровод, а также сопутствующие объекты, такие как колодцы, системы защиты от коррозии, переходы через водные преграды и дороги, здания для обслуживающего персонала, линии связи, подъездные пути и др.

Перекачивающие станции – это ключевые и сложные элементы нефтепроводной системы.

Головные перекачивающие станции (ГПС) выполняют функцию приема нефти, прошедшей предварительную обработку, и дальнейшей ее транспортировки в магистральный нефтепровод. Они включают в себя: резервуарный парк для хранения нефти, подпорные насосы для обеспечения необходимого давления, систему учета количества нефти, магистральные насосы для перекачки на большие расстояния, узел регулирования давления для поддержания стабильной работы, фильтры для очистки от загрязнений, предохранительные устройства для предотвращения аварийных ситуаций, а также систему технологических трубопроводов [16].

Промежуточные перекачивающие станции (ППС) располагаются вдоль трассы нефтепровода на расстояниях, определенных гидравлическими расче-

тами. Типичное расстояние между станциями составляет 100–200 км для первой очереди строительства и 50–100 км для второй. В отличие от ГПС, ППС не имеют резервуарного парка, подпорных насосов и узла учета нефти [13].

На протяженных магистральных нефтепроводах организуются эксплуатационные участки длиной 400–600 км. В начале каждого участка располагается нефтеперекачивающая станция, аналогичная по составу ГПС, но с резервуарным парком меньшего объема. Насосные станции оснащаются мощными насосами и сложным энергетическим оборудованием, потребляющим до нескольких тысяч киловатт [14].

Нефть или нефтепродукт последовательно перекачивается по трубопроводу через цепь перекачивающих станций до конечного пункта назначения. Существуют различные схемы перекачки на промежуточных станциях, которые определяются способом подключения насосов и резервуаров [13]:

- а) постстанционная перекачка – нефть поочередно принимается в один резервуар, а подается на следующую станцию из другого;
- б) перекачка через один резервуар – нефть поступает в резервуар, который служит буферной емкостью, и одновременно откачивается из него;
- в) перекачка с подключенным резервуаром – уровень нефти в резервуаре изменяется в зависимости от колебаний объемов поступающей и откачиваемой нефти;
- г) перекачка «из насоса в насос» – резервуары промежуточных станций отключаются от магистрального трубопровода.

Линейная часть трубопровода, как правило, сооружается по трем конструктивным схемам: подземной, наземной и надземной. По первой схеме трубы укладываются ниже поверхности земли (самый распространенный способ – около 98% всех трубопроводов). По второй схеме трубы укладываются на поверхность земли или на специально подготовленное грунтовое основание. Третья схема предусматривает укладку труб на опоры, расположенные на определенном расстоянии друг от друга [12].

Подземная схема прокладки трубопроводов предпочтительна в массивах плотных грунтов. Она гарантирует защиту труб от внешних воздействий, эффективно стабилизирует их расположение и повышает устойчивость. Кроме того, такая прокладка не меняет рельеф

местности и не препятствует сельскохозяйственным работам и передвижению транспорта. При подземной установке трубы и ее содержимое меньше подвержены резким колебаниям температуры, что существенно влияет на надежность технологических процессов.

Наземные и надземные схемы прокладки трубопроводов чаще используют при строительстве в неблагоприятных грунтовых условиях. Особенно широко эти схемы стали применяться в условиях Севера на многолетнемерзлых грунтах [15].

Рост мирового производства нефти и газа в шельфовых и морских зонах потребовал прокладки подводных магистральных трубопроводов – как заглубленных, так и незаглубленных. Такие трубопроводы называются морскими. Иногда магистральный трубопровод имеет морскую и сухопутную часть. И тогда он называется сухопутно-морским.

Несмотря на то что магистральный трубопровод функционирует как единая система, он оснащен средствами секционирования, позволяющими оперативно перекрывать отдельные участки в аварийных ситуациях. Эта мера необходима для ограничения масштаба утечек и снижения негативного воздействия на окружающую среду. Ключевым элементом этой системы, особенно на нефте- и нефтепродуктопроводах, являются задвижки. От их исправности напрямую зависит эффективность предотвращения потерь при авариях и снижение экологического риска. Помимо основной трубы нефтепровод включает в себя широкий спектр компонентов, таких как тройники, переходники для соединения труб разного диаметра, а также узлы для ввода и извлечения внутритрубных устройств очистки (скребков, шаров, поршней и др.) [16].

ЭГС газопроводного комплекса состоит из трех основных технических элементов: трубопроводов, компрессорных станций и газораспределительных станций, а также литотопа, эдафотопа, гидротопа и биотических компонентов. Газораспределительные станции представляют собой комплекс технологического оборудования и устройств, предназначенный для понижения давления газа из магистрального газопровода до уровня, необходимого по условиям его безопасного потребления, включая очистку, редуцирование, предотвращение гидратообразования, одоризацию (добавления одоранта – вещества с резким запахом), а также измерение расхода газа. Рядом с

газораспределительными станциями располагаются газгольдеры – специальные хранилища для создания запасов газа, представляющие собой сосуды большого объема, предназначенные для хранения газов под давлением.

Транспортировка газа по трубопроводам осуществляется либо за счет давления газа, естественно создаваемого в скважинах, либо за счет давления, искусственно создаваемого с помощью компрессоров. Компрессорные станции, расположенные через каждые 100–200 км, поддерживают необходимое давление и скорость потока газа, которые снижаются из-за трения о стенки трубы. Они увеличивают давление, тем самым поддерживая пропускную способность газопровода. При этом добавляется только газ, чтобы избежать образования взрывоопасных смесей [17].

Компрессорные станции оснащены газоперекачивающими агрегатами, а также оборудованием для осушки, очистки и одоризации газа. Здесь существуют как головные сооружения (компрессорные), так и ряд вспомогательных (котельные, сооружения систем охлаждения, электро-, водоснабжения, канализации и др.). На станциях также функционируют химические лаборатории, где регулярно анализируют воду, масло и другие рабочие жидкости, а также контролируют уровень загазованности.

Газопроводы по функциям подразделяются на три основных типа: магистральные, распределительные (местные) и внутренние. Магистральные газопроводы служат для транспортировки газа на значительные расстояния от мест добычи или производства к потребителям. Распределительные газопроводы предназначены для доставки газа в пределах населенных пунктов, а внутренние – для распределения газа внутри зданий и сооружений.

Основная часть газопроводов – как магистральных, так и распределительных – прокладывается под землей (в траншеях). Однако в целях безопасности или из-за технических ограничений иногда используют надземную прокладку на эстакадах, опорах, мостах или непосредственно по поверхности земли. Внутри зданий газопроводы обычно крепятся к стенам.

По аналогии с нефтепроводами, в морских и шельфовых зонах прокладывают подводные магистральные газопроводы, которые могут быть как заглубленными в грунт, так и проложенными по дну. Нередко магистральный

газопровод состоит из подводного (морского) и наземного участков. Современные магистральные газопроводы могут работать под давлением 5,5–7,5 МПа и выше. Это обеспечивает высокую пропускную способность, достигающую 50 млрд м³ газа в год и более [11]. Несмотря на все меры предосторожности, небольшие потери газа неизбежны из-за особенностей конструкции газопроводов, наличия соединений и механизмов (задвижек, уплотнений и т.д.). Эти потери обычно составляют от 2,5 до 4,0% от общего объема транспортируемого газа.

В определенных условиях, особенно при низких температурах, может возникнуть проблема образования газогидратных пробок. Это происходит, когда молекулы воды окружают молекулы газа, формируя структуру, похожую на лед, которая закупоривает трубу и блокирует поток газа. Для борьбы с этим явлением применяют специальные вещества, такие как метанол или моногидрогликоль, которые растворяют гидраты.

Общая протяженность магистральных газопроводов может варьировать от нескольких десятков до тысяч километров, а диаметр труб – от 150 до 1420 мм. Но большинство имеет диаметр от 720 до 1420 мм. Трубы и арматура магистральных газопроводов рассчитаны на рабочее давление до 7,5 МПа.

Наряду с трубопроводом, компрессорными и газораспределительными станциями важным элементом газовой инфраструктуры многих стран мира являются подземные газохранилища (ПХГ) – системы сооружений, предназначенные для резервирования больших объемов природного газа. Эти хранилища способны вмещать сотни миллионов, а в некоторых случаях и миллиарды кубометров газа. Они, как правило, формируются вблизи крупных центров газопотребления.

В основном это «природные» резервуары, расположенные глубоко под землей (300–1000 м и более), созданные в пористых породах (например, в истощенных месторождениях углеводородов, обезвоженных водоносных горизонтах и т.д.) или в полостях массивов горных пород (в подземных горных выработках, таких как шахты, штольни и т.д., а также в пустотах размытых соляных толщ и т.д.).

Существует еще один способ хранения газа – изотермические подземные хранилища. Их создают в виде котлована, стены которого поддерживаются в

замороженном состоянии. Строительство начинается с укрепления верхней части котлована бетонным кольцом, на которое устанавливается теплоизолированная крыша. Для поддержания низких температур вокруг хранилища бурят морозильные скважины. После заполнения резервуара сжиженным газом, процесс заморозки прекращается и топливо хранится при криогенных температурах (минус 161–162 °С). Изотермические ПХГ являются самым затратным способом хранения, однако они являются единственным решением в регионах, где создание других типов хранилищ невозможно [18].

Независимо от типа ПХГ, на поверхности его размещения строятся необходимые инфраструктурные объекты. Каждое хранилище оснащено очистными установками, где газ очищается от примесей перед закачкой под землю. Очищенный газ поступает в пункт замера и учета, а затем – в компрессорный цех, где его компримируют путем повышения давления (сжатия) до нужного значения. Над ПХГ располагается газораспределительный пункт, где газ после подготовки разделяется на потоки для закачки в хранилище. Все ПХГ подключены к сети магистральных газопроводов, обеспечивающих поступление газа для закачки и его отбор для транспортировки потребителям [18].

ЭГС водопроводно-канализационного комплекса выполняет такую важнейшую ресурсно-экологическую функцию, как обеспечение экосистем водой, и объединяет ряд инженерных сооружений и технических устройств, предназначенных для забора воды из природных источников, улучшения ее качества до заданных норм, транспортирования на необходимые расстояния, хранения запасов, подачи и распределения потребителям, а также для отвода сточных вод. Классическая схема функционирования данной ЭГС включает работу водозаборных сооружений (водозаборов), насосных станций или водоподъемных сооружений, сооружений для очистки и обработки воды, водовода или магистрального водопровода, резервуаров различных типов для хранения и аккумулирования воды.

Водозаборы в зависимости от назначения подразделяются на сооружения, предназначенные для хозяйствственно-питьевого, производственного, противопожарного, поливочного и комбинированного водоснабжения. По типу водоисточника их разделяют на объекты, забирающие воду из поверхност-

ных или из подземных источников. Поверхностные водозаборы направляют свои усилия на использование водных ресурсов, расположенных на поверхности земли (озера, реки, водохранилища). Они бывают берегового и русского типов. В береговом варианте вода откачивается насосами непосредственно в резервуары, тогда как в русском варианте она поступает по самотечным линиям к береговым накопителям. Качество и состав воды в таких водозаборах требуют постоянного внимательного контроля. Подземные водозаборы применяют различные конструкции, такие как вертикальные, горизонтальные водозаборы и родниковые каптажи. К этой категории относятся скважины, шахтные колодцы, галереи, штолни и многие другие сооружения. Вода из подземных источников, как правило, чище и стабильнее, поскольку она защищена от негативного воздействия окружающей среды. Кроме того, по производительности водозаборы подразделяются на малые (менее $1 \text{ м}^3/\text{с}$), средние (от 1 до $6 \text{ м}^3/\text{с}$) и большие (более $6 \text{ м}^3/\text{с}$); по компоновке – на совмещенные (в одном сооружении) и раздельные (состоящие из комплекса сооружений); по степени стационарности – на стационарные и нестационарные. Водозаборы для хозяйственного-питьевого и производственного использования функционируют круглый год и, как правило, не прерывают подачу воды [19].

Насосные станции являются ключевым элементом систем водоснабжения, обеспечивающим подачу воды в необходимом объеме и под нужным давлением. Насосы, используемые на различных типах станций, классифицируются по некоторым признакам: по конструкции (горизонтальные, вертикальные, центробежные, осевые), по способу установки и по области применения (станции первого и второго подъема, циркуляционные, повышательные). В зависимости от уровня воды в водозаборе, насосные станции могут быть с положительной или с отрицательной высотой всасывания. Расположение машинного отделения (наземное, полузатягнутое или подземное) определяется особенностями местности и проектными решениями. Надежность водоснабжения и допустимость перерывов в подаче воды определяют категорию насосной станции (I, II или III), каждая из которых имеет свои требования к резервированию оборудования. При возникновении аварии, чтобы не останавливать работу, автоматически включаются запасные агрегаты. Кроме того,

работа оборудования может быть временно остановлена для его ремонта или замены. Чем выше категория надежности станции, тем более строгие требования к ней предъявляются [19].

Транспортирование воды к потребителям осуществляется по водоводам и магистральным водопроводам – протяженным трубопроводам преимущественно большого диаметра (от 300 мм и более), соединяющим отдельные элементы системы водоснабжения.

Основными требованиями, которые предъявляются к водоводам и магистральным водопроводам, являются их надежная и экономичная работа в период нормативного срока службы, что достигается правильным выбором трассы, материала и диаметров труб, а также режима их работы [20]. Для повышения надежности функционирования системы водоснабжения водоводы часто прокладывают в несколько линий (в одну, две или больше). Желательно, чтобы они проходили по возвышенностям, имели минимум искусственных сооружений и были легко доступны для обслуживания и ремонта. Для стабильного водоснабжения между параллельными водоводами делают перемычки, а вдоль трассы и на объектах устанавливают резервуары, компенсаторы и запорную арматуру.

По принципу работы водоводы делятся на напорные, безнапорные и комбинированные. В напорных водоводах вода перекачивается насосами или течет под давлением за счет разницы высот между источником и точкой потребления. Водоводы, использующие насосы, называются нагнетательными, а те, что работают за счет гравитации – гравитационными напорными или самотечно-напорными. Безнапорные водоводы (гравитационные или самотечные) работают с неполным заполнением трубы. Они используются реже, чем напорные, и их применение зависит от перепада высот между началом и концом трассы, рельефа местности и расстояния между точками подачи и отбора воды. Безнапорные трубы дешевле напорных, но необходимость обеспечения определенного уклона может увеличить длину трассы и общую стоимость строительства. Гравитационные водоводы часто встречаются в гористой местности, где вода из источника (каптажа) самотеком поступает к потребителю, расположенному ниже [19, 20].

Водоводы технической и другой непитьевой воды прокладываются, как правило, от водозабора до очистной станции или непосредственно до насе-

ленного пункта, крупного промышленного предприятия или другого объекта. Водоводы питьевой воды осуществляют подачу от накопительных резервуаров чистой воды до водопроводной сети объекта; при этом потребители получают воду через распределительную сеть, а не напрямую из водоводов.

Одними из основных сооружений в системе водоснабжения, гарантирующими хранение запасов воды и обеспечение ее подачи потребителю в необходимом количестве в любое время суток, являются резервуары. Их различают по следующим признакам: назначению; форме в плане (круглые или прямоугольные); высоте расположения (напорные и безнапорные); степени заглубления (подземные, наземные); материалу (железобетонные, стальные, бетонные и т.д.) [19].

В зависимости от назначения резервуары подразделяются на запасные, регулирующие и противопожарные. Запасные резервуары обеспечивают стабильную работу водопроводных систем. Регулирующие емкости способствуют более равномерной работе насосов, уменьшая необходимость в подаче воды в периоды ее наибольшего потребления; таким примером служат водонапорные башни. Противопожарные резервуары, которые часто устанавливаются на промышленных и сельскохозяйственных объектах, создают нужные запасы воды для борьбы с огнем. Резервуары, находящиеся на высоте, функционируют как водонапорные башни; при этом их стоимость ниже, чем у башен. Высоко расположенные напорные резервуары также часто используются для хранения аварийных и пожарных запасов. В отличие от них, безнапорные резервуары обычно выполняют регулирующую функцию на очистных сооружениях и называются резервуарами чистой воды. Они располагаются на границе двух зон системы: равномерной подачи насосами I подъема и неравномерной (ступенчатой) подачи насосами II подъема. Крупные резервуары из монолитного железобетона имеют объем от 50 до 2000 м^3 при диаметре от $4,7$ до $25,4 \text{ м}$ и высоте $3,5$ – $4,5 \text{ м}$. Сборные железобетонные резервуары имеют объем 50 – 3000 м^3 , если обладают цилиндрической формой, и 50 – 20000 м^3 , если их форма прямоугольная. Цилиндрические резервуары с купольным перекрытием могут иметь объем до 600 м^3 ; в регионах с умеренным климатом их заглубляют на половину высоты цилиндрической части, а верхнюю часть покрывают слоем земли толщиной около 1 м .

для теплоизоляции. Резервуары объемом более 600 м³ строятся с плоским перекрытием [19].

Таким образом, класс ЭГС транспортно-коммуникационных комплексов включает восемь типов, а каждый из них – ряд подтипов и групп экологогеологических систем, охватывающих все их многообразие.

Предложенная систематика ЭГС транспортно-коммуникационных комплексов может использоваться при составлении карт эколого-геологического зонирования различных территориальных образований (например, администра-

тивных областей, районов и т.д.), а также в ходе инженерно-экологических изысканий и исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

В результате выполненной работы можно сделать следующие выводы.

1. На основе учета специфики эколого-геологических систем транспортно-коммуникационных комплексов разработана их структура, отражающая характерные черты их компонентов с выделением технобиоценоза, технобиотопа и технолитотопа, обладающих специфическими особенностями.

2. Предложена систематика эколого-геологических систем транспортно-коммуникационных комплексов, включающая восемь основных типов, разделенных на подтипы и группы, что позволяет охватить все многообразие этих систем.

3. Выявленные особенности структуры и систематики ЭГС транспортно-коммуникационных комплексов можно рассматривать как общие, которые необходимо учитывать при инженерно-экологических исследованиях и изысканиях на различных территориях. 

Список литературы ►

1. Трофимов В.Т. Эколо-геологическая система, ее типы и положение в структуре экосистемы // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2009. № 2. С. 48–52.
2. Трофимов В.Т. Экологическая геология: учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2024. 415 с.
3. Мировая экономика: учебник / под ред. А.С. Булатова. М.: изд-во «Экономистъ», 2005. 734 с.
4. Леонович И.И., Пупейко О.В. Сеть дорог Республики Беларусь как составляющая транспортно-логистической системы // Вестник Белорусского национального технического университета. 2009. № 6. С. 71–81.
5. Галкин А.Н., Королев В.А. Классификация эколого-геологических систем Беларуси на основе учета особенностей литотопов и инженерно-хозяйственных объектов // Литасфера. 2023. № 1 (58). С. 98–109.
6. Загорский И.О., Володькин П.П., Рыжова А.С. Транспортная инфраструктура: учебное пособие. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 228 с.
7. Пильгун Т.В., Осипова Ю.А. Транспортные системы: учебно-метод. пособие: в 2 ч. Минск: БНТУ, 2023. Ч. 1. Инфраструктура грузовых перевозок. 87 с.
8. Ивуть Р.Б., Косовский А.А., Стефанович Н.В. Единая транспортная система и география транспорта: учеб. пособие. Минск: БНТУ, 2009. Дата последнего обращения: 16.05.2025. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/236>.
9. Пузин Ю.Я., Сафонов С.Л. Основы устройства и эксплуатации космических комплексов: учебное пособие. Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2022. 236 с.
10. Сердюк В.К. Проектирование средств выведения космических аппаратов: учеб. пособие для вузов. М: Машиностроение, 2009. 504 с.
11. Алиев Р.А., Белоусов В.Д., Немудров А.Г., Юфин В.А., Яковлев Е.И. Трубопроводный транспорт нефти и газа: учебник (2-е изд., перераб. и доп.). М.: Недра, 1988. 368 с.
12. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы. М.: ГУЛ ЦПП, 1998. 60 с.
13. Абузова Ф.Ф., Алиев Р.А., Новоселов В.Ф., Тугунов П.И., Несговоров А.М. Техника и технология транспорта и хранения нефти и газа: учеб. пособие. М.: Недра, 1992. 320 с.
14. РД 153-39.4-113-01. Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов. М.: АК «Транснефть», ОАО «Гипротрубопровод», 2002. 141 с.
15. Сошников Е.В. Проектирование и эксплуатация нефтеперекачивающих станций: учеб.-метод. пособие. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2020. 51 с.
16. Петров О.Н., Сокольников А.Н., Агровиценко Д.В., Верещагин В.И. Сооружение и эксплуатация насосных и компрессорных станций: учеб. пособие. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. 192 с.
17. Бердник А.Н. Компрессорные станции магистральных газопроводов: учеб. пособие. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2019. 142 с.
18. Подземные хранилища газа. Назначение и особенности эксплуатации // Отраслевой портал Dprom.online. Дата последнего обращения: 19.06.2025. URL: <https://dpronline.oilgas/podzemnye-hranilishcha-gaza/?ysclid=mc6w9y4s0109846115>.
19. Водопроводные системы и оборудование // Сайт ООО «Роспайп». Дата последнего обращения: 01.07.2025. URL: https://rospipe.ru/tekh_info/tekhnicheskie-stati/vodoprovodnye-sistemy-i-oborudovanie.
20. Магистральный водопровод // Сайт Tak-stroy.ru. Энциклопедия Строительства. Дата последнего обращения: 01.07.2025. URL: <https://tak-stroy.ru/vodoprovod/magistralnyj-vodoprovod>.

References ►

1. Trofimov V.T. Ekologo-geologicheskaya sistema, yeyo tipy i polozheniye v strukture ekosistemy [Ecological-and-geological system, its types and position in the ecosystem structure] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya. 2009. № 2. S. 48–52 (in Rus.).
2. Trofimov V.T. Ekologicheskaya geologiya: uchebnik [Ecological geology: a textbook]. M.: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2024. 415 s. (in Rus.).
3. Mirovaya ekonomika: uchebnik [World Economy: a textbook] / pod red. A.S. Bulatova. M.: izd-vo "Ekonomist", 2005. 734 s. (in Rus.).
4. Leonovich I.I., Pupeyko O.V. Set' dorog Respubliki Belarus' kak sostavlyayushchaya transportno-logisticheskoy sistemy [Road network of the Republic of Belarus as a component of the transport and logistics system] // Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. 2009. № 6. S. 71–81 (in Rus.).
5. Galkin A.N., Korolev V.A. Klassifikatsiya ekologo-geologicheskikh sistem Belarusi na osnove ucheta osobennostei litotopov i inzhenerno-khozyaistvennykh ob'ektorov [Classification of ecological-geological systems of Belarus on the basis of the characteristics of lithotopes and engineering-economic facilities] // Litasfera. 2023. № 1 (58). S. 98–109 (in Rus.).
6. Zagorskiy I.O., Volod'kin P.P., Ryzhova A.S. Transportnaya infrastruktura: uchebnoye posobiye [Transport infrastructure: a textbook]. Khabarovsk: Izdatel'stvo Tikhookeanskogo gos. universiteta, 2015. 228 c. (in Rus.).
7. Pil'gun T.V., Osipova Yu.A. Transportnyye sistemy: uchebno-metodicheskoye posobiye: v 2 ch. [Transport systems: teaching aid: in 2 parts]. Minsk: BNTU, 2023. Ch. 1. Infrastruktura gruzovykh perevozok [Part 1. Freight transport infrastructure]. 87 s. (in Rus.).
8. Ivut' R.B., Kosovskiy A.A., Stefanovich N.V. Yedinaya transportnaya sistema i geografiya transporta: uchebnoye posobiye [Unified transport system and geography of transport: a textbook]. Minsk: BNTU, 2009. Data poslednego obrashcheniya: 16.05.2025. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/236> (in Rus.).
9. Puzin Yu.Ya., Safronov S.L. Osnovy ustroystva i ekspluatatsii kosmicheskikh kompleksov: uchebnoye posobiye [Fundamentals of the design and operation of space complexes: a textbook]. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo universiteta, 2022. 236 s. (in Rus.).
10. Serdyuk V.K. Proyektirovaniye sredstv vyvedeniya kosmicheskikh apparatov: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Design of spacecraft launch vehicles: a textbook for universities]. M: Mashinostroyeniye, 2009. 504 s. (in Rus.).
11. Aliyev R.A., Belousov V.D., Nemudrov A.G., Yufin V.A., Yakovlev Ye.I. Truboprovodnyy transport nefti i gaza: uchebnik (2-ye izd., pererab. i dop.) [Pipeline transport of oil and gas: a textbook (2nd ed., revised and enlarged)]. M.: Nedra, 1988. 368 s. (in Rus.).
12. SNiP 2.05.06-85. Magistral'nyye truboprovody [SNiP 2.05.06-85. Main pipelines]. M.: GUL TSPP, 1998. 60 s. (in Rus.).
13. Abuzova F.F., Aliyev R.A., Novoselov V.F., Tugunov P.I., Nesgovorov A.M. Tekhnika i tekhnologiya transporta i khraneniya nefti i gaza: uchebnoe posobiye [Engineering and technology of transport and storage of oil and gas: a textbook]. M.: Nedra, 1992. 320 s. (in Rus.).
14. RD 153-39.4-113-01. Normy tekhnologicheskogo proyektirovaniya magistral'nykh nefteprovodov [RD 153-39.4-113-01. Standards for the technological design of main oil pipelines]. M.: AK "Transneft", OAO "Giprotruboprovod", 2002. 141 s. (in Rus.).
15. Soshnikov E.V. Proyektirovaniye i ekspluatatsiya nefteperekachivayushchikh stantsiy: uchebno-metodicheskoye posobiye [Design and operation of oil pumping stations: a textbook]. Khabarovsk: Izdatel'stvo DVGUPS, 2020. 51 s. (in Rus.).
16. Petrov O.N., Sokol'nikov A.N., Agrovichenko D.V., Vereshchagin V.I. Sooruzheniye i ekspluatatsiya nasosnykh i kompressornnykh stantsiy: uchebnoe posobiye [Construction and operation of pumping and compressor stations: a textbook]. Krasnoyarsk: Sibirskiy federal'nyy universitet, 2018. 192 s. (in Rus.).
17. Berdnik A.N. Kompressornyye stantsii magistral'nykh gazoprovodov: uchebnoe posobiye [Compressor stations of main gas pipelines: a textbook]. Khabarovsk: Izdatel'stvo Tikhookeanskogo gos. universiteta, 2019. 142 s. (in Rus.).
18. Podzemnyye khranilishcha gaza. Naznacheniye i osobennosti ekspluatatsii [Underground gas storage facilities. Purpose and operational features] // Otraslevoy portal Dprom.online. Data poslednego obrashcheniya: 19.06.2025. URL: <https://dpronline.oilgas/podzemnye-hranilishcha-gaza/?ysclid=mcd6w9y4s0109846115>. (in Rus.).
19. Vodoprovodnyye sistemy i oborudovaniye [Water supply systems and equipment // Sayt OOO «Rospayp». Data poslednego obrashcheniya: 01.07.2025. URL: https://ros-pipe.ru/tekh_info/tekhnicheskie-stati/vodoprovodnye-sistemy-i-oborudovanie. (in Rus.).
20. Magistral'nyy vodoprovod [Main water supply] // Sayt Tak-stroy.ru. Entsiklopediya Stroitel'stva. Data poslednego obrashcheniya: 01.07.2025. URL: <https://tak-stroy.ru/vodoprovod/magistralnyj-vodoprovod> (in Rus.).

ПРИМЕНЕНИЕ ВИДЕОКАРОТАЖА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАРСТОВЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ г. КАЗАНИ



Поступила в редакцию: 29.08.2025

Принята к публикации 20.11.2025

Опубликована 25.11.2025

ЛАТЫПОВ А.И.

Доцент кафедры общей геологии и гидрогеологии
Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского
(Приволжского) федерального университета, д. г.-м. н.,
г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация
airatlat@mail.ru

ГАРАЕВА А.Н.

Доцент кафедры общей геологии и гидрогеологии
Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского
(Приволжского) федерального университета, к. г.-м. н.,
г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

ЯББАРОВА Е.Н.

Ассистент кафедры общей геологии и гидрогеологии
Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского
(Приволжского) федерального университета, к. г.-м. н.,
г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

УСМАНОВ Р.М.

Ассистент кафедры общей геологии и гидрогеологии
Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского
(Приволжского) федерального университета, г. Казань,
Республика Татарстан, Российская Федерация

КИНЖАЛОВА И.Н.

Магистрант кафедры общей геологии и гидрогеологии
Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского
(Приволжского) федерального университета, г. Казань,
Республика Татарстан, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

В статье представлен обзор современных методов применения видеокаротажа (телеизионного каротажа) для изучения карстовых образований и оценки карстовой опасности территорий. Рассматриваются технические аспекты метода видеокаротажа, его преимущества и ограничения при исследовании карстовых полостей. Также представлен опыт его применения при оценке карстоопасности объектов в центральной части города Казани. Показано, что видеокаротаж на карстоопасных территориях позволяет более точно оценивать состояние грунтового массива, фиксировать положение полостей и их размеров, что способствует повышению безопасности строительства и эксплуатации инженерных сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

видеокаротаж; карст; карстовые полости; инженерно-геологические изыскания; геофизические методы; Казань.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Латыпов А.И., Гараева А.Н., Яббарова Е.Н., Усманов Р.М., Кинжалова И.Н. Применение видеокаротажа для исследования карстовых проявлений в центральной части г. Казани // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 3. С. 18-26.
DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-18-26.

USING VIDEO LOGGING TO STUDY KARST MANIFESTATIONS IN THE CENTRAL PART OF KAZAN

Received: 29.08.2025

Accepted for publication 20.11.2025

Published 25.11.2025

LATYPOV A.I.

DSc, associate professor at the Department of General Geology and Hydrogeology, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation
airatlat@mail.ru

GARAEVA A.N.

PhD, associate professor at the Department of General Geology and Hydrogeology, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

YABBAROVA E.N.

PhD, assistant lecturer at the Department of General Geology and Hydrogeology, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

USMANOV R.M.

Assistant lecturer at the Department of General Geology and Hydrogeology, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

KINZHALOVA I.N.

Master's degree student at the Department of General Geology and Hydrogeology, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

ABSTRACT

This article presents an overview of modern methods for using video logging (TV logging) to study karst formations and assess the karst hazard of areas. It examines the technical aspects of video logging, its advantages, and limitations in exploring karst cavities. The paper also presents practical experience in using this method to assess karst hazards in the central part of Kazan. It is shown that video logging in karst-prone areas makes it possible to assess the condition of a soil body, identify the location and dimensions of cavities more accurately, which contributes to improving the safety of construction and operation of engineering structures.

KEYWORDS:

video logging; karst; karst cavities; engineering-geological survey; geophysical methods; Kazan.

FOR CITATION:

Latypov A.I., Garaeva A.N., Yabbarova E.N., Usmanov R.M., Kinzhalova I.N. Primenenie videokarotazha dlya issledovaniya karstovykh proyavlenii v tsentral'noi chasti g. Kazani [Using video logging to study karst manifestations in the central part of Kazan] // Geoinfo. 2025. T. 7. № 3. S. 18–26. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-18-26 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

Карстовые процессы представляют серьезную угрозу для строительства и эксплуатации инженерных сооружений, требуя детального изучения структуры и распространения карстовых образований. Традиционные методы исследования карста, основанные на бурении и геофизических измерениях, не всегда обеспечивают достаточную детальность изучения внутренней структуры карстовых полостей. В этой связи особое значение приобретает применение видеокаротажа как высоконформативного метода прямого визуального исследования стенок скважин.

Видеокаротаж заключается в спуске в скважину миниатюрной видеокамеры с системой освещения, которая передает изображение на поверхность в режиме реального времени. Полученное видео записывается и анализируется специалистами.

Видеокаротаж позволяет решать следующие задачи:

- определение типов пород и их границ;
- выявление включений и прослоек;
- оценка степени выветривания пород;
- обнаружение трещин, разломов, зон дробления;
- определение ориентировки трещин;

- выявление карстовых полостей;
- определение уровня грунтовых вод;
- выявление водопритоков;
- наблюдение за фильтрацией.

В настоящее время метод видеокаротажа активно применяется в Российской Федерации и за рубежом. Толмачев и Хоменко [1] отмечают, что данный метод позволяет получить детальную визуальную информацию о структуре горных пород, трещиноватости и наличии карстовых полостей с высокой степенью разрешения. Костарев и Никишин [2] подчеркивают, что видеокаротаж позволяет наблюдать геологические особенности в скважине напря-

мую, что особенно важно при работе на карстоопасных территориях, где точность определения местоположения и размеров полостей критически важна для оценки инженерно-геологических условий.

Используемые в настоящее время системы видеокаротажа, как отмечают Вильямс и Джонсон [3], включают оптические телевизионные зонды высокого разрешения, способные работать в различных условиях освещенности и обеспечивать детализацию объектов размером до нескольких миллиметров. Чжоу и Батлер [4] указывают на возможность получения как статических изображений, так и видеозаписи в реальном времени, что существенно расширяет аналитические возможности метода.

ПРИМЕНЕНИЕ ВИДЕОКАРТАЖА ПРИ ОЦЕНКЕ КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ ►

Согласно СП 446.1325800.2019 видеокаротаж рекомендуется использовать в качестве обязательного метода при инженерных изысканиях на закарстованных территориях для категорий карстовой опасности II и выше [5].

Основным преимуществом видеокаротажа при изучении карста является возможность прямого визуального обнаружения и детального изучения карстовых полостей. Абукова и Трофимов [6] отмечают, что метод позволяет не только обнаруживать полости, но и определять их морфологические характеристики: форму, размеры, направление развития, степень заполнения продуктами выщелачивания.

Андрейчук и Климчук [7] подчеркивают, что видеокаротаж обеспечивает возможность изучения внутренней структуры карстовых каналов, что критически важно для понимания гидро-геологических процессов в карстовых массивах.

При инженерно-геологических изысканиях видеокаротаж позволяет получать количественные параметры карстовых образований, необходимые для оценки несущей способности оснований сооружений. Королев и Соколов [8] отмечают, что визуальная информация о степени развития карстовых процессов служит основой для разработки инженерных мероприятий по защите от карстово-суффозионных деформаций.

Наибольшая эффективность достигается при комплексном применении видеокаротажа и других геофизических методов. Так, Пайлет [9] демонстрирует,

что сочетание оптического и акустического каротажа существенно повышает достоверность результатов при изучении трещиноватых и закарстованных пород.

Методические рекомендации ВСЕГИНГЕО [10] предписывают использование видеокаротажа в комплексе с электрометрией, кавернометрией и расходометрией для получения полной характеристики карстовых образований. Видеокаротаж является важным дополнением к традиционным методам исследования скважин и позволяет получить уникальную визуальную информацию о геологическом строении участка.

Форд и Вильямс [11] отмечают особую важность видеокаротажа при изучении карстовых водоносных горизонтов, где визуальное наблюдение позволяет определять точки водопритоков и направления движения подземных вод. Это критически важно для понимания гидродинамики карстовых систем и прогнозирования их эволюции.

ПРЕИМУЩЕСТВА И ОГРАНИЧЕНИЯ МЕТОДА ►

Телевизионное каротажное исследование скважин характеризуется рядом значительных преимуществ, обусловленных природой визуального метода изучения геологических объектов. Его высокая детальность обеспечивается возможностью визуального анализа структурных особенностей горных пород с разрешающей способностью до миллиметровых значений, что позволяет детально изучать текстурные и структурные характеристики геологических образований. Этот метод обеспечивает получение прямой визуальной информации о геологическом строении исследуемого объекта без промежуточных интерпретационных процедур, что существенно повышает достоверность получаемых данных и исключает возможные искажения, характерные для косвенных методов исследования.

Важным преимуществом является возможность создания цифрового архива высококачественных изображений, обеспечивающего долгосрочное хранение визуальной информации и возможность многократного анализа полученных данных различными специалистами в разное время. Универсальность применения рассматриваемого метода проявляется в его эффективности при исследовании различных типов геологических разрезов и условий залегания горных пород, что делает его применимым в широком спектре геологических задач.

Однако телевизионный каротаж имеет определенные ограничения, связанные с физическими и техническими аспектами проведения исследований. Качество получаемых изображений существенно зависит от оптической прозрачности жидкости, заполняющей скважину. Повышенная мутность среды приводит к значительному ухудшению визуализации и снижению информативности метода. Геометрические ограничения метода связаны с минимально допустимым диаметром исследуемых скважин, что определяется размерами телевизионной аппаратуры и требованиями к качеству получаемых изображений.

Техническая сложность реализации метода обусловлена необходимостью использования высокотехнологичного специализированного оборудования и привлечения высококвалифицированных специалистов для проведения исследований и интерпретации результатов.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИДЕОКАРТАЖА ПРИ ОЦЕНКЕ КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ г. КАЗАНИ ►

Территория исторической части г. Казани представляет собой невысокую холмистую эрозионно-денудационную равнину, расчлененную долинами рек Волги и Казанки и расположенную в зоне сочленения денудационной Предкамской возвышенности и Заволжской низменности.

На многих улицах центральной части города в разное время наблюдались проявления карстово-суффозионных процессов.

В 1936 году у стен Казанского Кремля, напротив бывшего лесопильного завода, был зафиксирован локальный провал.

В 1941 году во дворе дома 16 на улице Дзержинского был обнаружен провал диаметром 3–4 м и глубиной 1,5–2 м.

В 1945 году на углу дома 2 на улице Чернышевского был зафиксирован провал диаметром 4 м и глубиной 3–3,5 м.

В 1947 году во дворе дома 47 на улице Островского был зарегистрирован провал диаметром 23 м и глубиной 7,5 м.

В 1958 году на откосе под кремлевской стеной возле старицы реки Казанки появился провал диаметром 3–4 м и глубиной 1,5–2 м, после чего рядом возникли еще два провала.

В 1960 году во дворе главного корпуса Казанского государственного уни-



Рис. 1. Схема расположения карстово-суффозионных форм рельефа на участке между улицами Кремлевская и Дзержинского

верситета был зафиксирован провал диаметром 3–4 м и глубиной 4 м.

В 1971 году у дома 16 на улице Дзержинского был обнаружен провал диаметром 6–8 м и глубиной 2–2,5 м.

В 1977 году около торгового комплекса «Пассаж» возник провал диаметром 7–8 м, в результате чего это здание пострадало.

В 2010 году рядом с домом 1 на Кремлевской площади произошел карстовый провал диаметром 10 м и глубиной 8 м.

Большая плотность карстово-суффозионных форм рельефа наблюдается на участке между улицами Кремлевская и Дзержинского (рис. 1). В геоморфологическом отношении этот участок находится в пределах второй надпойменной одицковско-московской террасы р. Волги. Естественный рельеф изменен в ходе строительного освоения территории и представляет собой террасированный склон, сформированный в XVIII веке. Рельеф эрозионно-тектонической поверхности фундамента отражает современную структуру и является результатом взаимодействия тектонических и эрозионно-денудационных процессов.

В центральной исторической части города рельеф коренных пород формировался преимущественно под воздействием процесса размыва и эрозии древней долины, что обуславливает ориентацию долин и останцов (хребтов, холмов) древнего рельефа, которые располагаются поперек современных валов.

Подземный рельеф коренных пород представлен двумя глубинными котловинами (прогибами со стороны Черного озера и озера Верхний Кабан), разделенными хребтиком, который начина-

ется от Кремля вдоль улицы Кремлевская и в настоящее время носит название «Казанский хребтик». Его протяженность в современном рельефе составляет 2 км, ширина – 500 м.

В неотектоническом отношении исследуемая территория относится к Казанскому мезоблоку, входящему в состав Кильмезского макроблока, расположена на Казанском куполе с восточной стороны и представляет собой флексурно-разрывную зону с амплитудой поднятия 70 м. Восточное крыло опускается под углом 0,045–0,048°, а западное – под углом 0,008–0,010°.

Эрозионный останец сложен пермскими отложениями, перекрытыми ма-ломощным чехлом четвертичных пород.

В разрезе пермских пород повсеместно вскрываются доломиты седиментационно-диагенетические, плотные, светло-серые и желтовато-серые, плитчатые, с пелитоморфной структурой и неясно выраженной горизонтально-слоистой текстурой за счет неравномерно-послойного распределения глинистого материала. Участками в разрезе отмечается повышенное содержание гипсовых агрегатов либо каверн размером до 2,0 см. На всем протяжении доломиты претерпели гипергенные изменения, вызвавшиеся в разрушении исходной структуры пород и их дезинтеграции на отдельные плитчатые отдельности. По характеру преобразования доломиты верхнеказанского подъяруса в большинстве интервалов дезинтегрированы до щебнисто-дресвяных обособлений с заполнителем в виде доломитовой или доломитово-глинистой муки. Обломки доломитов характеризуются плотным сложением, светло-серой

окраской, пелитоморфной структурой и горизонтально-слоистой текстурой.

На региональном уровне подобная обстановка способствует активному развитию карстовых и карстово-суффозионных процессов.

Карстующимися породами на участке исследований являются известняки и доломиты верхне- и нижнеказанского подъяруса, а также гипсы и ангидриты сакмарского яруса.

Карстовые процессы в сакмарском ярусе, происходящие в гипсах и ангидритах на большой глубине, в Казани не приводят к локальным разрушениям на поверхности. Однако в сочетании с тектоническими движениями они вызывают медленные опускания земной поверхности. Эти процессы не представляют опасности для зданий и сооружений.

Отложения нижнеказанского подъяруса трансгрессивно залегают на размытой закарстованной поверхности сульфатно-карбонатных пород сакмарского яруса. В составе нижнеказанского подъяруса выделяются преимущественно терригенные и карбонатные породы. Общая мощность отложений нижнеказанского подъяруса на территории участка изменяется от 35 до 56 м.

Верхнепермские отложения бронируют закарстованный массив нижнеказанского подъяруса, представленный преимущественно терригенными породами.

Центральная часть г. Казани представляет собой территорию с высокой плотностью застройки, на которой расположено множество объектов культурного наследия, большая часть которых имеет низкую жесткость несущих конструкций и неглубокое заложение фундаментов.

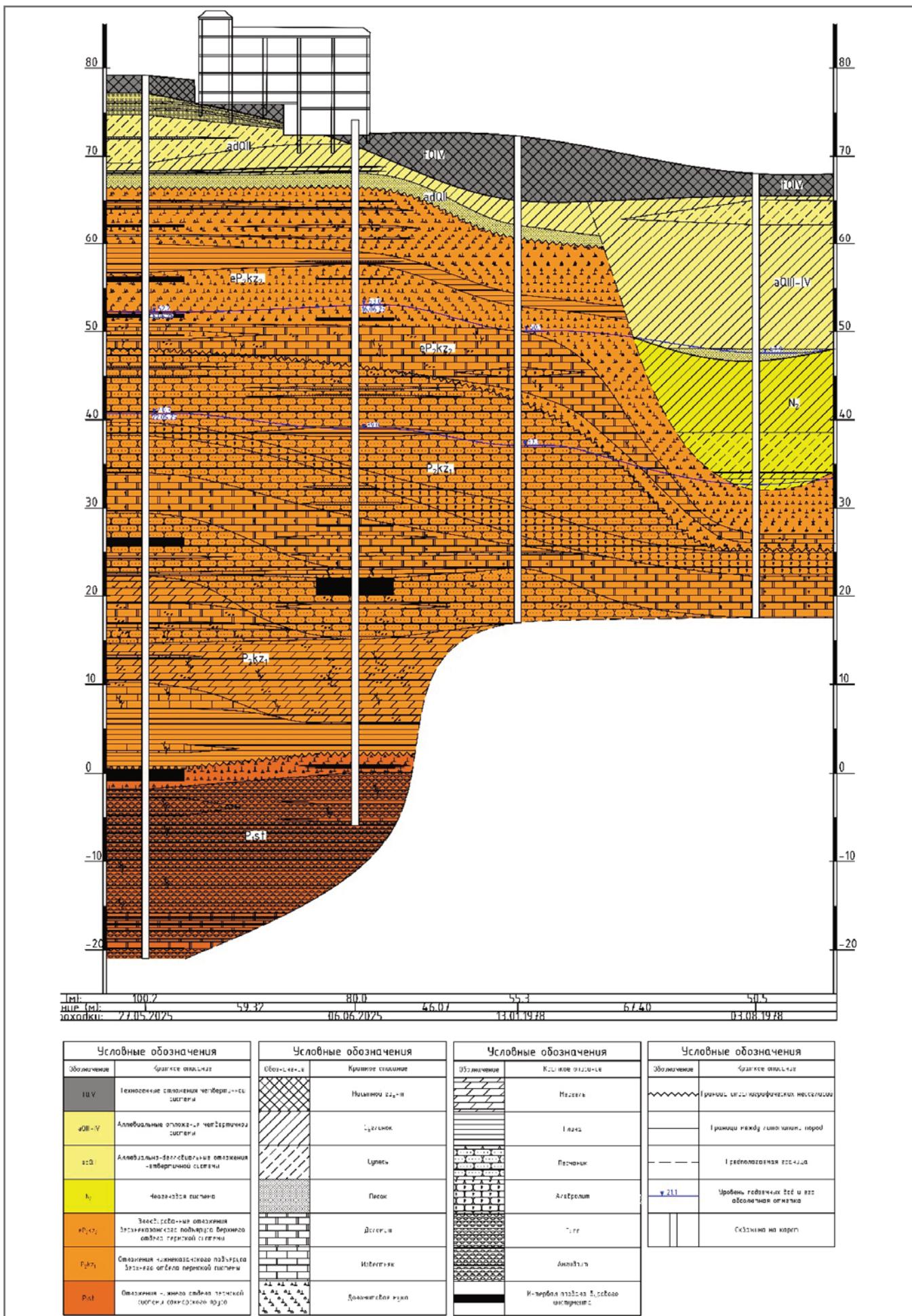


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез исследуемой территории



Рис. 3. Фотокернограмма скважины в интервале 38–74 м

На рисунке 2 приведен инженерно-геологический разрез исследуемой территории со схематичным изображением одного из таких зданий, расположенных вдоль улицы Дзержинского. При обследовании этого здания было пройдено несколько скважин глубиной до 100 м со сплошным отбором керна. При этом высокая степень нарушенности полускальных пород не позволила с необходимой точностью установить размеры возможных полостей в карстующемся массиве. При бурении наблюдались лишь некоторые незначительные провалы бурового инструмента. На рисунке 3 показана фотокернограмма одной из скважин в интервале 38–74 м.

В соответствии с действующими строительными нормами, в частности СП 499.1325800.2021 [12], ширину карстовой полости B , м, определяют по формуле:

$$B = B_0 + VT,$$

где B_0 – начальный размер карстовой полости, пустоты, трещины, м, определяемый по результатам бурения и данным геофизических исследований; V –

максимальная среднегодовая скорость роста полости (растворения) карстующихся пород, см/год, определяемая по данным инженерно-геологических изысканий; T – расчетный срок эксплуатации здания.

Величины B_0 определяют на основании прямых измерений размеров вскрытых полостей, а также информации о провалах бурового инструмента при проходке скважин.

На исследуемом объекте ни при геофизических работах, ни на основании буровых работ не удалось установить точные размеры полостей. Поэтому согласно нормам следует принять значение B_0 равным 1,5 м.

Тогда при расчетном сроке эксплуатации $T=50$ лет и максимальной среднегодовой скорости роста полости (растворения карстующихся пород) $V=0,1 \div 1$ см/год размер полости B составит:

$$B = B_0 + VT = 1,5 + \frac{(0,1 \div 1)}{100} \cdot 50 = (1,55 \div 2,0) \text{ м}.$$

Для этих условий были выполнены расчеты методом конечных элементов в программе SiO 2D в двухмерной поста-

новке с учетом напряженного состояния, механических свойств грунтов (на основе линейно-деформируемой модели грунта и принятого критерия прочности) и трех горизонтов грунтовых вод. В результате было установлено, что при таких исходных данных в покрывающей карстующуюся породу глинистой толще возникнут зоны пластического течения, что означает переход грунтового массива в область предельных состояний (рис. 4).

Очевидно, что если бы оценки с применением подобного подхода были близки к реальной карстовой опасности, то подавляющее большинство зданий в центральной части г. Казани (многие из которых имеют возраст более 100 лет) уже давно бы разрушились, чего не наблюдается в действительности. Причин подобного несоответствия требований норм с реальностью несколько.

Во-первых, фактическая растворимость карбонатных пород часто оказывается значительно ниже 0,1 см в год (и уж тем более ниже 1 см в год). Лабораторные исследования авторов показали, что полученные ими значения скло-

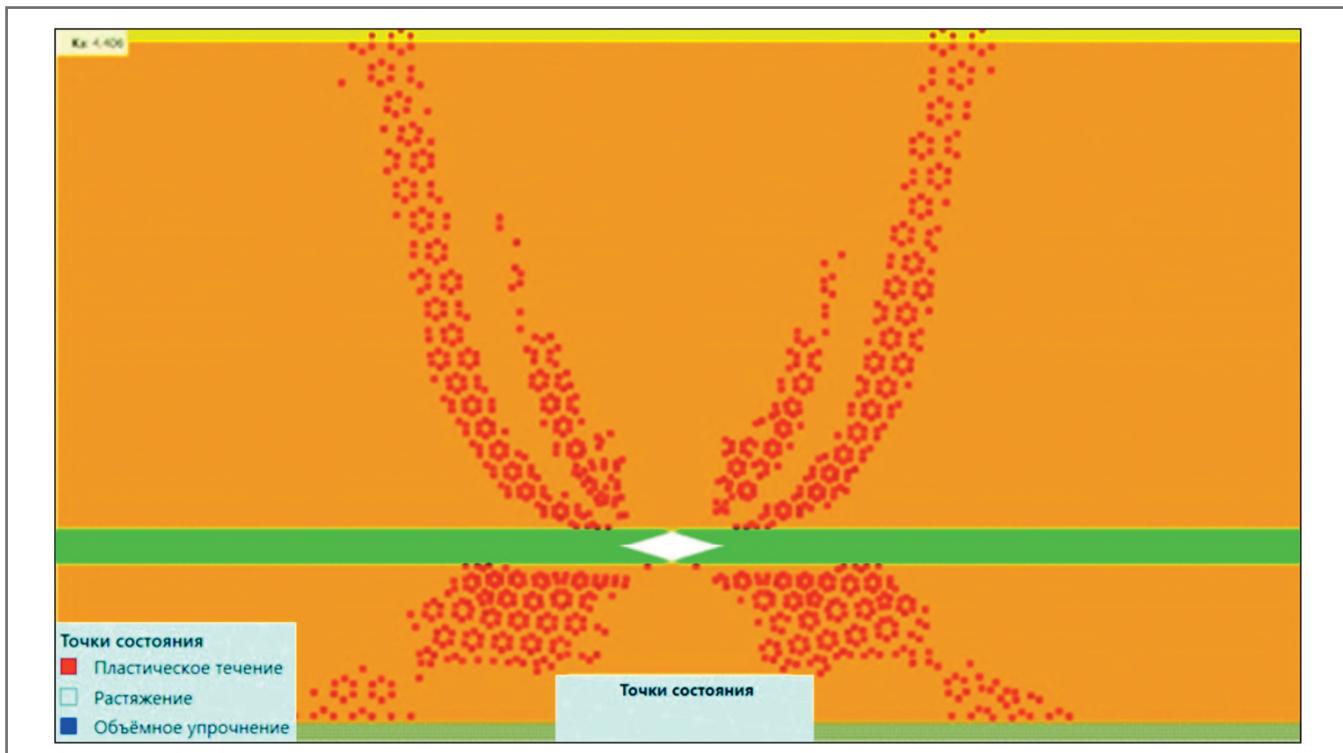


Рис. 4. Область предельного состояния в покрывающей толще. Оранжевым цветом показана покрывающая глинистая толща, зеленым – карстующаяся порода с полостью высотой 2,0 м

ности растворения на несколько порядков ниже принятых справочных величин, что вполне очевидно с точки зрения основ минералогии.

Во-вторых, процесс растворения в значительной степени зависит от гидрогеологических условий (наличия и положения уровня грунтовых вод, величины напора, направления фильтрационного потока, наличия водоупоров над карстующимися породами и др.). В рассматриваемом примере первый от поверхности слой доломитов расположен выше уровня грунтовых вод и перекрыт достаточно большой глинистой толщиной, что фактически исключает процесс его растворения.

Несмотря на эти очевидные первостепенные причины, существующий подход к оценке скорости роста подземных полостей и, как следствие, интенсивности протекания карстовых процессов часто используется на практике как единственно верный.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ►

С целью установления точных размеров и расположения полостей в грунтовом массиве летом 2025 года был выполнен видеокаротаж всех пройденных скважин. Он проводился с использованием видеокаротажного оборудования, оснащенного специальной водонепроницаемой камерой высокого разрешения (диаметром 25 мм, с разрешением



Рис. 5. Видеокаротаж скважины

1200 ТВЛ и углом обзора 145°) со светодиодной подсветкой (рис. 5). Опускание видеокамеры в скважину производилось аккуратно и равномерно до достижения заданного интервала исследования. При продвижении камеры фиксировались пройденные интервалы, что включало определение глубины по измерительным приборам и описание структуры пород. В режиме реального времени изображение передавалось на

монитор и одновременно записывалось на носитель для последующего анализа. Таким образом обеспечивалось получение подробной и достоверной информации о состоянии стенок скважины и характеристиках пород в процессе исследования. На рисунке 6 показаны примеры фотографий ствола скважины в карстующихся доломитах.

Использование видеокаротажа позволило установить, что доломитовая тол-

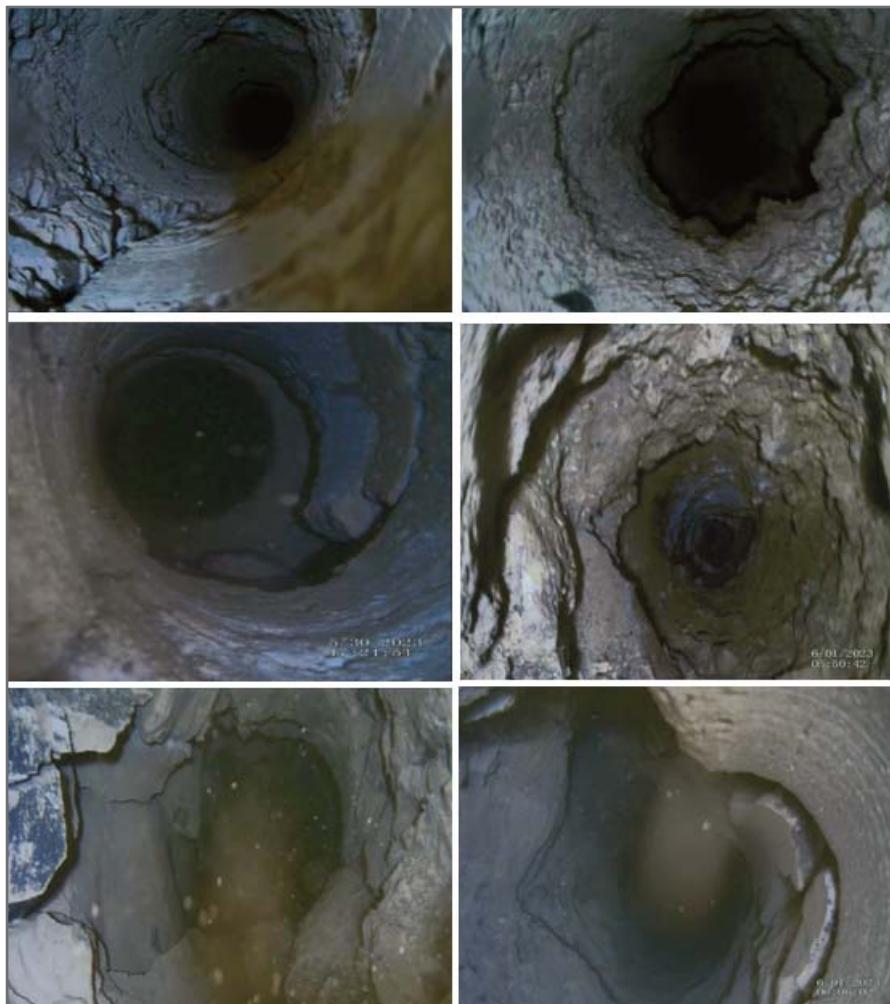


Рис. 6. Примеры фотофиксации стенок ствола скважины при видеокаротаже

ща верхнеказанского подъяруса разбита многочисленными вертикальными и наклонными трещинами протяженностью до 1,5 м и раскрытием до 1,0 см. Участками в доломитах появляются крупные щелевидные полости каверн выщелачивания, глубоко уходящие вглубь грунтового массива. По морфологическим особенностям и характеру

действия внешних сил наклонные и вертикальные трещины в карстовом массиве можно отнести к трещинам отрыва (с неровной рваной поверхностью, отсутствием смещений вдоль стенок, слабой извилистостью, относительно большой протяженностью). Трещиноватость пород приводит к образованию микрополостей (размером до 10 см) и пещери-

стых полостей (до 20 см), которые не всегда можно выявить по провалу бурового инструмента.

Таким образом, результаты видеокаротажа не выявили полостей значительного размера в зоне влияния обследованного здания и подтвердили низкую скорость протекания карстовых процессов в исторической части г. Казани. Именно по этой причине карстовые провалы на исследуемой территории носят довольно редкий характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Видеокаротаж представляет собой высокоеффективный метод исследования карстовых образований, обеспечивающий получение детальной визуальной информации о структуре и морфологии карстовых полостей. Комплексное применение метода с другими геофизическими исследованиями значительно повышает достоверность оценки карстовой опасности территорий.

Перспективы развития этого метода связаны с совершенствованием технических средств, разработкой автоматизированных систем обработки данных и интеграцией с цифровыми технологиями трехмерного моделирования геологических объектов.

Внедрение видеокаротажа в практику инженерно-геологических изысканий на карстоопасных территориях способствует повышению безопасности строительства и эксплуатации инженерных сооружений.

Оценка карстовой опасности участка центральной части г. Казани показала эффективность применения видеокаротажа, которая выражается как в точной фиксации положения полостей и их размеров, так и в корректности оценки скорости протекания карстового процесса. ■

Список литературы ►

1. Толмачев В.В., Хоменко В.П. Применение телевизионного каротажа для изучения карстовых полостей // Геология и разведка. 1985. № 7. С. 54–58.
2. Костарев В.П., Никулин А.А. Видеокаротаж скважин при инженерно-геологических изысканиях на карстоопасных территориях // Геология и разведка. 2007. № 6. С. 52–54.
3. Williams J.H., Johnson C.D. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies // Journal of Applied Geophysics. 2004. Vol. 55. № 1-2. P. 151–159. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2003.06.009. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926985103000764>.
4. Zhou H., Butler A.P. Optical televiewer logging for characterization of karst aquifers // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 1996. Vol. 29. № 1. P. 51–62. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P1.06>.
5. СП 446.1325800.2019. Инженерно-геологические изыскания для строительства на закарстованных территориях. Общие правила производства работ. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ, 2019.
6. Абукова Л.А., Трофимов В.Т. Комплексная оценка карстовой опасности с использованием геофизических методов // Инженерная геология. 2001. № 6. С. 45–50.

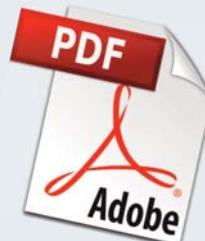
7. Андрейчук В.Н., Климчук А.Б. О возможностях и перспективах применения телевизионного каротажа в карстово-спелеологических исследованиях // Пещеры. Пермь, 1993. Вып. 23-24. С. 12–21.
8. Королев В.А., Соколов В.Н. Методы изучения карста при инженерно-геологических изысканиях. М.: КДУ, 2017. 234 с.
9. Paillet F.L. Application of borehole geophysics in the characterization of flow in fractured rocks // U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report. 2001. № 01-4084. 41 p.
10. Методические рекомендации по применению геофизических методов при изучении карста и оползней. М.: ФГБУ «ВСЕГИНГЕО», 2019. 87 с.
11. Ford D., Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Wiley & Sons, 2018. 576 p.
12. СП 499.1325800.2021. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от карстово-супфозионных процессов. Правила проектирования. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ, 2021.

References ►

1. Tolmachev V.V., Khomenko V.P. Primenenie televizionnogo karotazha dlya izucheniya karstovykh polostei [Application of television logging to study karst cavities] // Geologiya i razvedka. 1985. № 7. S. 54–58 (in Rus.).
2. Kostarev V.P., Nikulin A.A. Videokarotazh skvazhin pri inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh na karstopasnykh territoriyakh [Video logging of boreholes during engineering-geological surveys in karst-prone areas] // Geologiya i razvedka. 2007. № 6. S. 52–54.
3. Williams J.H., Johnson C.D. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies // Journal of Applied Geophysics. 2004. Vol. 55. № 1-2. P. 151–159. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2003.06.009. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926985103000764> (in Engl.).
4. Zhou H., Butler A.P. Optical televiewer logging for characterization of karst aquifers // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 1996. Vol. 29. № 1. P. 51–62 (in Engl.). <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P1.06>.
5. SP 446.1325800.2019. Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva na zakarstovannykh territoriyakh. Obshchie pravila proizvodstva rabot [SP 446.1325800.2019. Engineering-geological surveys for construction in karst areas. General rules for performing work]. M.: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaistva RF, 2019.
6. Abukova L.A., Trofimov V.T. Kompleksnaya otsenka karstovoi opasnosti s ispol'zovaniem geofizicheskikh metodov [Integrated assessment of karst hazard using geophysical methods] // Inzhenernaya geologiya. 2001. № 6. S. 45–50.
7. Andreichuk V.N., Klimchuk A.B. O vozmozhnostyakh i perspektivakh primeneniya televizionnogo karotazha v karstovo-speleologicheskikh issledovaniyakh [On possibilities and prospects of using television logging in karst-speleological studies] // Peshchery. Perm', 1993. Vyp. 23-24. S. 12–21.
8. Korolev V.A., Sokolov V.N. Metody izucheniya karsta pri inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh [Methods for Studying Karst in Engineering-Geological Surveys]. M.: KDU, 2017. 234 s.
9. Paillet F.L. Application of borehole geophysics in the characterization of flow in fractured rocks // U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report. 2001. № 01-4084. 41 p. (in Engl.).
10. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu geofizicheskikh metodov pri izuchenii karsta i opolznei [Methodological recommendations on the use of geophysical methods in the study of karst and landslides]. M.: FGBU "VSEGINGEO", 2019. 87 s.
11. Ford D., Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Wiley & Sons, 2018. 576 p. (in Engl.).
12. SP 499.1325800.2021. Inzhenernaya zashchita territorii, zdanii i sooruzhenii ot karstovo-suffuzionnykh protsessov. Pravila proektirovaniya [Engineering protection of territories, buildings, and structures against karst and suffusion processes. Design rules]. M.: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaistva RF, 2021.

ГеоИнфо

Независимый электронный журнал



WWW.GEOINFO.RU

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

ГЕНЕРАЛЬНЫЕ СПОНСОРЫ ПРОЕКТА



Геотехническая лаборатория
АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ»



ООО «ПЕТРОМОДЕЛИНГ»



Институт
экологического
проектирования
и изысканий

АО «ИНСТИТУТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗЫСКАНИЙ»

СПОНСОРЫ ПРОЕКТА



ООО НПП «ГЕОТЕК»

ООО НПП «ГЕОТЕК»



MALININSOFT



ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» / FUGRO

EngGeo
Обработка и хранение результатов
инженерно-геологических
изысканий

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
«ENG GEO»



НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ



ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ДЛЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ



MACCAFERRI / ГАБИОНЫ
МАККАФЕРРИ СНГ



МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ГРУНТАХ: ВСЕГДА ЛИ НОВОЕ ЛУЧШЕ СТАРОГО?

Поступила в редакцию: 20.09.2025

Принята к публикации 19.10.2025

Опубликована 25.11.2025

САМАРИН Е.Н.

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

АННОТАЦИЯ

Органическое вещество, присутствующее в грунтах, включает как органические остатки, частично сохранившие исходное строение, так и отдельные органические соединения специфической и неспецифической природы. В агромелиорации проводят полное фракционирование органического вещества, а для геотехнических целей существенное значение имеет лишь его общее содержание. Это важный классификационный признак, поэтому методике определения органического вещества в грунтах уделяется повышенное внимание. Однако если в почвоведении новые редакции ГОСТов остаются в рамках классических методов, признанных научным сообществом, то в инженерно-геологических изысканиях, а вслед за этим и в грунтоведении, наблюдается явная тенденция к упрощенным определениям, связанным главным образом с пиролизом органического вещества при различных температурах. Стоит ли удивляться, что вследствие таких манипуляций появляются новые литологические типы грунтов, например «болотный мергель».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

органическое вещество; неразложившиеся растительные остатки; гумус; неспецифические органические соединения; сухое сжигание; метод И.В. Тюрина; модификации метода И.В. Тюрина; пиролиз органики при разных температурах.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Самарин Е.Н. Методы определения содержания органических веществ в грунтах: всегда ли новое лучше старого? // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 3. С. 28-34.
DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-28-34.

METHODS FOR DETERMINING THE ORGANIC MATTER CONTENT IN SOILS: IS THE NEW ALWAYS BETTER THAN THE OLD?

Received: 20.09.2025

Accepted for publication 19.10.2025

Published 25.11.2025

SAMARIN E.N.

DSc, professor, Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
samarinen@mail.ru

ABSTRACT

Organic matter present in soils includes both organic residues that have partially preserved their original structure and individual organic compounds of a specific and non-specific nature. In agricultural reclamation, complete fractionation of organic substances is carried out, whereas for geotechnical purposes, only the total organic content is essential. This is an important classification feature; therefore, the methodology for determining organic matter in soils is given increased attention. However, while in soil science the new editions of GOST standards remain within the framework of classical methods recognized by the scientific community, in engineering and geological surveys, and subsequently in soil science, there is a clear tendency to simplified definitions related mainly to pyrolysis of organics at different temperatures. Is it any wonder that as a result of such manipulations, new lithological types of soils such as "peaty marl" appear?

KEYWORDS:

organic matter; undecomposed plant residues; humus; non-specific organic compounds; dry combustion; I.V. Tyurin's method; modifications of Tyurin's method; pyrolysis of organic matter at different temperatures.

FOR CITATION:

Samarin E.N. Metody opredeleniya soderzhaniya organicheskikh veshchestv v gruntakh: vsegda li novoe luchshe starogo? [Methods for determining the organic matter content in soils: is the new always better than the old?] // Geoinfo. 2025. T. 7. № 3. S. 28–34. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-28-34 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Состав органического вещества природного или искусственного происхождения резко различен. Если состав природного органического вещества обусловлен длительными преобразованиями первичных органических компонентов в процессе гумификации, то состав техногенного органического вещества чрезвычайно разнообразен [1].

Всю совокупность органических соединений, присутствующих в грунтах, называют органическим веществом грунтов. Это понятие включает как органические остатки (растений и животных), частично сохранившие исходное строение, так и отдельные органические соединения специфической и неспецифической природы. Органические остатки – это именно те компоненты, которые подвергаются первичному процессу гумификации, сущность которого заключается в формировании особых специфических гумусовых веществ [2]. В составе гумуса различают собственно гу-

миновые вещества, неспецифические соединения (вещества известного строения) и промежуточные продукты распада и гумификации – продукты частично гидролиза, окисления, деметоксирования лигнина, белков, углеводов [2].

Неспецифические соединения включают хорошо известные в биохимии вещества индивидуального строения, поступающие из разлагающихся растительных и животных остатков. Частично неспецифические соединения могут образовываться и за счет разложения специфических гумусовых веществ, которые под влиянием ферментов могут отщеплять аминокислоты, моносахариды и другие соединения, переходящие в поровый раствор. Неспецифические соединения представлены такими веществами, как лигнин, флавоноиды (фенольные соединения), пигменты, липиды, целлюлоза, протеин, белки, аминокислоты, моносахариды, воска, жирные кислоты и др. Указанные соединения присутствуют в грунтах в свободном со-

стоянии или связаны с минеральными компонентами и легко усваиваются и разлагаются микроорганизмами [2].

Специфические гуминовые вещества объединяют несколько групп органических соединений:

- 1) гуминовые кислоты, растворимые только в щелочных растворах;
- 2) гиматомелановые кислоты, извлекаемые из сырого остатка (геля) гуминовых кислот этиловым спиртом;
- 3) фульвокислоты;
- 4) гумин – практически нерастворимое и не извлекаемое из природных тел и компостов органическое вещество.

Гумин, или «негидролизуемый остаток», в свою очередь, включает ряд групп веществ: гумусовые кислоты, прочно связанные с минеральной частью, декарбоксилированные гуминовые вещества, утратившие способность растворяться в щелочах, неспецифические и нерастворимые органические соединения, обломки хитинового покрова насекомых [2].

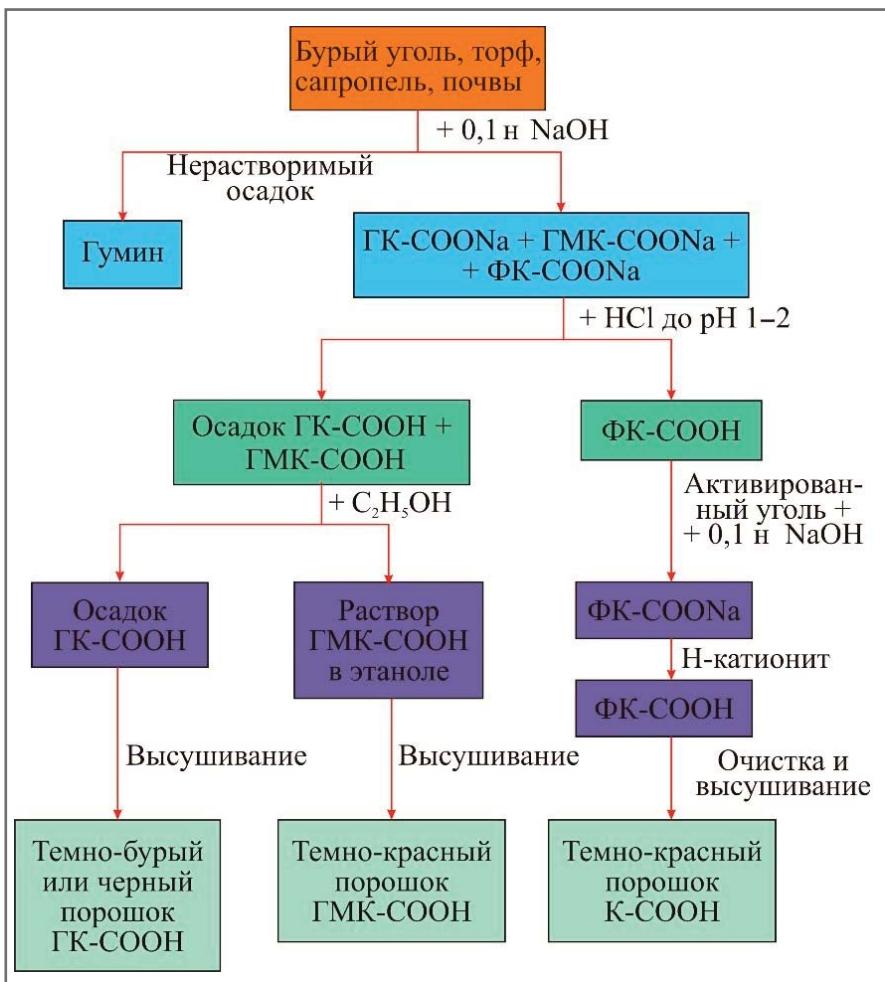


Рис. Схема выделения гуминовых веществ (по [3])

Исследование состава гуминовых веществ в грунтах проводится при их предварительном выделении, которое основано на последовательной обработке образцов грунтов раствором щелочи, а затем – осаждении кислотой гуминовых и гиматомелановых кислот при pH 1–2. Остающиеся в растворе фульвокислоты и неспецифические вещества выделяют адсорбцией и т.д. Осадки гуминовой и гиматомелановой кислот легко разделяются, поскольку последний растворим в этаноле. Чтобы в чистом виде получить фульвокислоты, кислый раствор пропускают через активированный уголь, промывают водой и ацетоном, затем снова растворяют адсорбированные кислоты раствором щелочи, пропускают через Н-катионит и высушивают (см. рисунок).

Фракционный анализ состава органического вещества играет важнейшую роль как в агрохимических исследованиях, с точки зрения повышения плодородия почв, так и в теоретическом почвоведении, составляя основу для понимания структуры соединений, объединяемых под общим названием «гумус».

В инженерной геологии и в инженерно-геологических изысканиях основное внимание уделяется валовому содержанию органического вещества в грунтах.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

Суммарное содержание всех органических веществ в грунте оценивается величиной относительного содержания органического вещества ($C_{опр}$), которое равно отношению массы органического вещества в образце абсолютно сухого грунта к массе грунта и измеряется в долях единицы или процентах. Согласно ГОСТ 23740-2016 [4] к органическому веществу относятся все органические соединения, входящие в состав грунта: растительные остатки, гумус, рассеянное органическое вещество и др.

По относительному содержанию органического вещества (степени заторфованности l_r) глинистые грунты согласно таблице Б.20 ГОСТ 25100-2020

подразделяются на следующие разновидности [5]:

- глинистые грунты с примесью органического вещества (с примесью органических остатков) $0,05 < l_r \leq 0,10$;
- органоминеральные грунты:

✓ с низким содержанием органического вещества (слабозаторфованные) $0,05 < l_r \leq 0,25$;

✓ со средним содержанием органического вещества (среднезаторфованные) $0,05 < l_r \leq 0,40$;

✓ с высоким содержанием органического вещества (сильнозаторфованные) $0,05 < l_r \leq 0,50$.

Неразложившиеся растительные остатки выделяются из грунтов либо пинцетом вручную, либо методом отмучивания [4], после чего прямым взвешиванием определяется их масса.

Между тем при определении содержания гумуса возникают серьезные затруднения, связанные как с методическими особенностями различных способов, так и с общетеоретическими положениями о строении гумуса.

Как известно, наиболее точными методами определения органического углерода являются метод сухого сжигания Г.Г. Густафсона и метод мокрого сжигания И.В. Тюрина в классическом варианте или в модификации ЦИНАО (Центрального научно-исследовательского института агрохимического обслуживания сельского хозяйства) [6, 7].

Сущность метода Густафсона заключается в сжигании пробы грунта/почвы в кварцевой трубке в токе кислорода при температуре 900 °C и выше в присутствии оксида меди в качестве катализатора. Выделившийся CO₂ улавливают и определяют либо весовым, либо объемным методом. Точность анализа не превышает 1% [7]. Метод закреплен в международном стандарте ISO 10694:1995 (Soil quality – Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis)) [8].

Сущность метода И.В. Тюрина состоит в окислении органического углерода смесью раствора бихромата калия (в избытке) и серной кислоты при кипячении в течение 5 минут (классический вариант метода) или при выдерживании в течение 30 минут в термостате при температуре 135 °C (модификация метода СПбГУ). Количество прореагированного углерода определяют спектрометрически по количеству образовавшегося в результате реакции трехвалентного хрома в варианте, предложенном Д.С. Орловым и Н.М. Гриндель в 1969 году (модификация метода ЦИНАО). В классическом ва-

рианте метода И.В. Тюрина предполагается количество непрореагированного бихромата калия устанавливать путем сравнения результатов титрования раствором соли Мора по фенилантраниловой кислоте в качестве индикатора холостой и анализируемой проб. Полнота окисления углерода составляет 85–90%. При использовании в качестве катализатора нитрата серебра можно повысить точность метода до 95% [7]. Метод закреплен в международном стандарте ISO 14235:1998 (Soil quality. Determination of organic carbon by sulfochromic oxidation) [8].

Однако даже самые точные методы не всегда позволяют добиться лучших результатов. Самая большая неопределенность при использовании упомянутых методик возникает при пересчете содержания органического углерода на собственно органическое вещество. С этой целью величину массовой доли углерода органических соединений, выраженную в процентах, принято умножать на коэффициент, равный 1,724 [6, 7]. Этот коэффициент был рассчитан в 1864 году на основании имеющихся в то время сведений о содержании в гуминовой кислоте 58% углерода ($100/58=1,724$). Такое же содержание углерода было принято и для гумуса почвы в целом. Однако в настоящее время установлено точно, что содержание углерода в гумусе разных типов почв неодинаково. Среднее содержание углерода колеблется от 54,5% (в гуминовых кислотах солонцов, солей, горнолуговых и серых лесных почв) до 58,7% (в гуминовых кислотах торфяно-болотных почв и торфяников) [2, 3].

Оба метода – и метод Густафсона, и метод И.В. Тюрина – наряду с весомым методом определения неразложившихся растительных остатков вошли в ГОСТ 23740-1979 «Грунты. Методы лабораторного определения содержания органических веществ». Этот ГОСТ, введенный в действие 01.01.1980, на взгляд автора, наиболее полно отражал как уровень развития аналитической базы, так и требования практики.

Более поздняя редакция – ГОСТ 23740-2016 [4] – для определения органического вещества рекомендует метод прокаливания навески грунта до постоянной массы, причем в трех вариантах – при 350 ± 10 °C, 450 ± 10 °C и 525 ± 25 °C в зависимости от его возраста и генезиса.

Отметим, что для почв нормативная литература также эволюционировала, хотя и не такими семимильными шагами. Так, наиболее ранним документом

является ГОСТ 26213-84 «Почвы. Определение гумуса по методу Тюрина в модификации ЦИНАО». Уже из названия очевидно, что в качестве основной методики для определения гумуса в почвах предлагается фотометрическое окончание мокрого сжигания органического углерода.

В более поздней редакции – ГОСТ 26213-1991 «Почвы. Методы определения органического вещества» – присутствует метод И.В. Тюрина в модификации ЦИНАО (спектрометрическое окончание опыта) и гравиметрический метод определения массовой доли органического вещества в торфяных и оторфованных горизонтах почв, который основан на определении потери массы после прокаливания пробы при температуре 525 ± 25 °C в течение 3 часов (согласно ГОСТ 27784-88). Последняя редакция документа – ГОСТ 26213-2021 «Почвы. Методы определения органического вещества» – изменений не претерпела [9]. То есть пиролиз предполагается использовать только для почв с высоким содержанием органики.

В морской геологии описаны две методики, представляющие собой некоторые вариации метода Густафсона в части удаления карбонатов [10, 11], правда под собственными именами авторов статей. Эти исследования нашли продолжение в виде патента Л.П. Пономаревой с соавторами (1992), в котором предложено определять органический углерод пиролизом при $480\text{--}520$ °C в токе кислорода, с оксидом кобальта (II,III) Co_3O_4 (в отношении с пробой 0,5–1,0) в качестве катализатора [12], что, по-существу, было ранее предложено Н.П. Бетелевым [13–16] и закреплено в отраслевой методике НИИОСП им. Н.М. Герсеванова [17]. Более того, Н.П. Бетелев сначала предлагал сжигание пробы в токе кислорода [13–15], несколько позднее – в токе воздуха [16].

Многочисленные исследования были выполнены в Санкт-Петербургском университете под руководством Д.Ю. Здобина [18–20] с целью обоснования возможности определения содержания органических веществ методом прокаливания навески грунта до постоянной массы по аналогии с действующими регламентами США, Великобритании, Франции и Швеции [8]:

- ASTM 2974-20. Standard test method for determination the water (moisture) content, ash content, and organic material of peat and other organic soils;
- BS 1377-3:1990. Methods of test for soil for civil engineering purposes – Part 3:

Chemical and electrochemical tests; Clause 4 – Determination of the mass loss on ignition or an equivalent method;

- XP P94-047:1998. Sols: Reconnaissance et Essais – Determination de la teneur ponderale en matiere organique – Methode par calcination;
- XP P94-047:1998. Sols: Reconnaissance et Essais – Determination de la teneur ponderale en matiere organique – Methode par calcination;
- SS 0271 05:1990. Geotechnical tests – Organic content – Ignition loss method.

В отечественной практике метод прокаливания для определения содержания органического вещества кроме упомянутого ранее ГОСТ 26213-2021 [9] закреплен также в следующих стандартах:

- ГОСТ 27784-88 (действующий). Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв. М.: Издательство стандартов, 1988. 4 с. [21];
- ГОСТ 27753.10-88 (действующий). Грунты тепличные. Метод определения органического вещества. М.: Изд-во стандартов, 1988. 4 с. [22].
- ГОСТ 11306-2013 (действующий). Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. М.: Стандартинформ, 2019. 5 с. [23].

Собственно, именно благодаря результатам работ Д.Ю. Здобина с соавторами стало возможным утверждение новой редакции ГОСТ 23740-2016 [4], упомянутой ранее. Согласно действующей редакции нормативного документа, содержание гумуса и рассеянного органического вещества определяется методом прокаливания до постоянной массы навески грунта, из которой предварительно удалены водорастворимые соли и карбонаты. При этом для гоноценовых аквальных грунтов (органоминеральных и связных дисперсных минеральных) рекомендуется проводить прокаливание при 350 ± 10 °C, для связных и несвязных дисперсных минеральных грунтов, по возрасту не относящихся к гоноценовым – при 450 ± 10 °C, для органоминеральных грунтов – при 525 ± 25 °C [4].

Справедливости ради следует отметить, что возможность использования пиролиза при указанных температурах для определения содержания органического вещества доказывалась авторами путем сравнения результатов со значениями, полученными методом мокрого сжигания И.В. Тюрина. К сожалению, при этом стандартные оценки методики – правильность, сходимость и вос-

производимость, получаемые на основе анализа стандартных образцов с известным содержанием органического углерода – авторами не рассматривались и остались за рамками анализа.

В озерно-болотных водоемах при определенных условиях – в местах разгрузки карбонатных вод – формируются специфические отложения (называемые карбонатсодержащим сапропелем), для которых характерно высокое содержание CaCO_3 [24]. При содержании карбонатов более 25% такой сапропель в практике инженерно-геологических изысканий с определенного момента получил некорректное название «болотный мергель» [25, 26], которое было внесено в стандарт предприятия и в течение долгого времени использовалось одним из ведущих геологических предприятий города Москвы. Содержание органического вещества для таких грунтов также предлагалось определять пиролизом декарбонатизированных образцов при температуре 525 ± 25 °C [28]. Отдельно отметим, что согласно классификации, приведенной в ГОСТ Р 54000-2010 [27], при массовой доле CaO на сухое вещество, равной не менее 10%, сапропель называется органоизвестковым,

а при содержании CaO не менее 20% – известковым (содержание карбонатов – 17,85 и 35,7% соответственно), а содержание органического углерода предлагается определять по методу И.В. Тюрина и пиролизом при 525 ± 25 °C [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, краткий обзор методической литературы, относящейся к определению органического вещества в почвах или грунтах позволяет сделать вполне определенный вывод: для почв содержание ГОСТа за последние 40 лет не изменилось, тогда как в практике инженерных изысканий очевидна тенденция к постоянному упрощению, что в итоге привело к утверждению пиролиза как единственного метода для определения органического углерода. Хорошо это или плохо?

С одной стороны, методика пиролиза многократно повышает скорость определения. Кроме того, лабораторное оборудование при пиролизе сводится к наличию муфельной печи и аналитических весов, что особенно важно для лабораторий, оборудованных на судах, принимающих участие в морских инженерных изысканиях. Собственно, вся эта эпопея

с упрощением методики определения содержания органических веществ и затевалась в конечном счете для упрощения изысканий в морских акваториях.

С другой стороны, конечно, ни о каком научном обосновании при таком подходе речи быть не может в принципе, поскольку точность метода определялась преимущественно по корреляционным зависимостям. Совершенно очевидно, что потеря массы образцом при прокаливании будет связана не только с окислением органического углерода, но и с потерей воды различными типоморфными соединениями, находящимися в полуколлоидном состоянии. И чем меньше содержание органики в пробе, тем больше будет относительная ошибка определения. Недаром все имеющиеся стандарты, рекомендующие пиролиз – ГОСТ 27784-88 [21], ГОСТ 27753.10-88 [22], ГОСТ 11306-2013 [23] – относятся к почвам с высоким содержанием органических веществ. Применительно к инженерно-геологическим изысканиям правильнее было бы говорить о соответствии величины потери при прокаливании определенному содержанию органического углерода. **и**

Список литературы ►

1. Грунтоведение / под ред. В.Т. Трофимова (6-е изд., перераб. и дополн.). М.: МГУ, 2005. 1024 с.
2. Орлов Д.С., Садовников Л.К., Суханова Н.И. Химия почв: учебник. М.: Высшая школа, 2005. 558 с.
3. Орлов Д.С. Гуминовые вещества в литосфере // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 2. С. 56–63.
4. ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.
5. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Общая классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 38 с.
6. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв (2-е изд., перераб. и дополн.). М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
7. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
8. Фомин Г.С., Фомин А.Г. Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам: справочник. М.: Изд-во «Протектор», 2001. 304 с.
9. ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 8 с.
10. Горбатенко С.А., Токарчук Т.Н. Методика экспрессного определения CaCO_3 и С органического в морских осадках // Современные методы морских геологических исследований: материалы Всесоюзного совещания (отв. ред. А.П. Лисицын). Том 2. М.: Изд-во Института океанологии, 1987. С. 63.
11. Люцарев С.В. Романкевич Е.А. Органическое вещество донных осадков // Нефтегазогенетические исследования в Индийском океане (отв. ред. А.А. Геодекян и др.). М.: Изд-во Ин-та океанологии АН СССР, 1982. С. 84–88.
12. Пономарева Л.П., Ткаченко Г.Г., Кротова Л.В. SU1733951A1. Способ определения органического углерода в морских донных осадках: патент на изобретение. Опубликован 15.05.1992.
13. Бетелев Н.П., Кулачкин Б.И. Методы определения содержания органических веществ в грунтах // Инженерная геология. 1990. № 4. С. 91–100.
14. Бетелев Н.П. Новый метод определения содержания органического вещества в грунтах и горных породах // Инженерная геология. 1979. № 2. С. 105–109.
15. Бетелев Н.П. Определение содержания органического углерода в илах и горных породах прокаливанием проб в токе кислорода без предварительного удаления карбонатов // Литология и полезные ископаемые. 1981. № 5. С. 152–159.
16. Бетелев Н.П. Усовершенствование метода определения органического углерода сухим сжиганием // Геоэкология. 1994. № 3. С. 104–108.

17. Рекомендации по определению органических веществ в грунтах и горных породах сухим сжиганием без предварительного удаления карбонатов. М.: Изд-во НИИОСП, 1990. 32 с.
18. Здобин Д.Ю., Абакумов Е.В., Шешукова А.В., Зуев В.С. Характеристика органического вещества прибрежно-морских грунтов Кандалакшского залива Белого моря // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. 2007. Выпуск 3. С. 37–43.
19. Здобин Д.Ю., Бахматова К.А., Матинян Н.Н., Свертилов А.А., Гостинцева Е.В., Семенова Л.К., Соколова Ю.Ю. Новый метод определения содержания органического вещества в грунтах // Грунтоведение. 2014. № 2. С. 14–25.
20. Здобин Д.Ю., Бахматова К.А., Матинян Н.Н., Свертилов А.А., Гостинцева Е.В., Семенова Л.К., Соколова Ю.Ю. Методы лабораторного определения содержания органических веществ в грунтах // Инженерная геология. 2015. № 1. С. 26–36.
21. ГОСТ 27784-88. Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв. М.: Изд-во стандартов, 1988. 5 с.
22. ГОСТ 27753.10-88 (действующий). Грунты тепличные. Метод определения органического вещества. М.: Изд-во стандартов, 1988. 4 с.
23. ГОСТ 11306-2013 (действующий). Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. М.: Стандартинформ, 2019. 5 с.
24. Санько А.Ф., Ярцев В.И., Дубман А.В. Генетические типы и фации четвертичных отложений Беларуси. Минск, 2012. 311 с.
25. Методические указания по инженерно-геологическому обследованию болот при изысканиях автомобильных и железных дорог. М.: СоюздорНИИ, 1973. 111 с.
26. Методические указания по проектированию земляного полотна на слабых грунтах. М.: Оргтрансстрой, 1968. 197 с.
27. ГОСТ Р 54000-2011. Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2011. 12 с.
28. Бирюков Н.С., Казарновский В.Д., Мотылев Ю.Л. Методическое пособие по определению физико-механических свойств грунтов. М.: Недра, 1975. 177 с.

References ►

1. Gruntovedenie [Soil Science] / pod red. V.T. Trofimova (6-e izd., pererab. i dopoln.). M.: MGU, 2005. 1024 s. (in Rus.).
2. Orlov D.S., Sadovnikov L.K., Sukhanova N.I. Khimiya pochv: uchebnik [Soil Chemistry: textbook.]. M.: Vysshaya shkola, 2005. 558 s. (in Rus.).
3. Orlov D.S. Guminovye veshchestva v litosfere [Humic substances in the lithosphere] // Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal. 1997. № 2. S. 56–63 (in Rus.).
4. GOST 23740-2016. Grunty. Metody opredeleniya soderzhaniya organiceskikh veshchestv [Soils. Methods for determining organic matter content]. M.: Standartinform, 2019. 8 s. (in Rus.).
5. GOST 25100-2020. Grunty. Obshchaya klassifikatsiya [Soils. General classification]. M.: Standartinform, 2020. 38 s. (in Rus.).
6. Arinushkina E.V. Rukovodstvo po khimicheskому analizu pochv (2-e izd., pererab. i dopoln.) [Guide to chemical analysis of soils (2nd edition, revised and supplemented)]. M.: Izd-vo MGU, 1970. 487 s. (in Rus.).
7. Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv [Theory and practice of chemical analysis of soils] / pod red. L.A. Vorob'evoi. M.: GEOS, 2006. 400 s. (in Rus.).
8. Fomin G.S., Fomin A.G. Pochva. Kontrol' kachestva i ekologicheskoi bezopasnosti po mezhdunarodnym standartam: spravochnik [Quality control and environmental safety according to international standards: handbook.]. M.: Izd-vo «Protektor», 2001. 304 s. (in Rus.).
9. GOST 26213-2021. Pochvy. Metody opredeleniya organiceskogo veshchestva [Soils. Methods for determining organic matter]. M.: Rossiiskii institut standartizatsii, 2021. 8 s. (in Rus.).
10. Gorbatenko S.A., Tokarchuk T.N. Metodika ehkspressnogo opredeleniya SASO3 i C organiceskogo v morskikh osadkakh [Method for rapid determination of CaCO_3 and organic C in marine sediments] // Sovremennye metody morskikh geologicheskikh issledovanii: materialy Vsesoyuznogo soveshchaniya (otv. red. A.P. Lisitsyn). Tom 2. M.: Izd-vo Instituta okeanologii, 1987. S. 63 (in Rus.).
11. Lyutsarev C.V. Romankevich E.A. Organicheskoe veshchestvo donnykh osadkov [Organic matter in bottom sediments] // Neftegazogeneticheskie issledovaniya v Indiiskom okeane (otv. red. A.A. Geodekyan i dr.). M.: Iz-vo In-ta okeanologii AN CCCR, 1982. S. 84–88 (in Rus.).
12. Ponomareva L.P., Tkachenko G.G., Krotova L.V. SU1733951A1. Sposob opredeleniya organiceskogo ugleroda v morskikh donnykh osadkakh: patent na izobretenie [Method for determining organic carbon in marine bottom sediments: patent]. Opublikovan 15.05.1992 (in Rus.).
13. Betelev N.P., Kulachkin B.I. Metody opredeleniya soderzhaniya organiceskikh veshchestv v gruntakh [] // Inzhenernaya geologiya. 1990. № 4. S. 91–100 (in Rus.).
14. Betelev N.P. Novyi metod opredeleniya soderzhaniya organiceskogo veshchestva v gruntakh i gornykh porodakh [Methods for determining organic matter content in soils and rocks] // Inzhenernaya geologiya. 1979. № 2. S. 105–109 (in Rus.).

15. Betelev N.P. Opredelenie soderzhaniya organiceskogo ugleroda v ilakh i gornykh porodakh prokalivaniem prob v toke kisloroda bez predvaritel'nogo udaleniya karbonatov [Determination of organic carbon content in silts and rocks by ignition in an oxygen stream without preliminary carbonate removal] // Litologiya i poleznye iskopaemye. 1981. № 5. S. 152–159 (in Rus.).
16. Betelev N.P. Usovershenstvovanie metoda opredeleniya organiceskogo ugleroda sukhim szhiganiem [Improvement of the method for determining organic carbon by dry combustion] // Geoekologiya. 1994. № 3. S. 104–108 (in Rus.).
17. Rekomendatsii po opredeleniyu organiceskikh veshchestv v gruntakh i gornykh porodakh sukhim szhiganiem bez predvaritel'nogo udaleniya karbonatov [Guidelines for determining organic matter in soils and rocks by dry combustion without preliminary carbonate removal]. M.: Izd-vo NIIOSP, 1990. 32 s. (in Rus.).
18. Zdobin D.Yu., Abakumov E.V., Sheshukova A.V., Zuev V.S. Kharakteristika organiceskogo veshchestva pribrezhno-morskikh gruntov Kandalakshskogo zaliva Belogo morya [Characterization of organic matter in coastal-marine soils of the Kandalaksha Bay, White Sea] // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. 2007. Vypusk 3. S. 37–43 (in Rus.).
19. Zdobin D.Yu., Bakhmatova K.A., Matinyan N.N., Svertilov A.A., Gostintseva E.V., Semenova L.K., Sokolova Yu.Yu. Novyi metod opredeleniya soderzhaniya organiceskogo veshchestva v gruntakh [New method for determining organic matter content in soils] // Gruntovedenie. 2014. № 2. S. 14–25 (in Rus.).
20. Zdobin D.Yu., Bakhmatova K.A., Matinyan N.N., Svertilov A.A., Gostintseva E.V., Semenova L.K., Sokolova Yu.Yu. Metody laboratornogo opredeleniya soderzhaniya organiceskikh veshchestv v gruntakh [Laboratory methods for determining organic matter content in soils] // Inzhenernaya geologiya. 2015. № 1. S. 26–36 (in Rus.).
21. GOST 27784-88. Pochvy. Metod opredeleniya zol'nosti torfyanykh i otorfovannykh horizontov pochv [Soils. Method for determining ash content in peat and peat-containing soil horizons]. M.: Izd-vo standartov, 1988. 5 s. (in Rus.).
22. GOST 27753.10-88 (deistvuyushchii). Grunty teplichnye. Metod opredeleniya organiceskogo veshchestva [Greenhouse soils. Method for determining organic matter]. M.: Izd-vo standartov, 1988. 4 s. (in Rus.).
23. GOST 11306-2013 (deistvuyushchii). Torf i produkty ego pererabotki. Metody opredeleniya zol'nosti [Peat and its processed products. Methods for determining ash content]. M.: Standartinform, 2019. 5 s. (in Rus.).
24. San'ko A.F., Yartsev V.I., Dubman A.V. Geneticheskie tipy i fatsii chetvertichnykh otlozhennii Belarusi [Genetic types and facies of Quaternary deposits of Belarus]. Minsk, 2012. 311 s. (in Rus.).
25. Metodicheskie ukazaniya po inzhenerno-geologicheskому obsledovaniyu bolot pri izyskaniyakh avtomobil'nykh i zheleznykh dorog [Guidelines for engineering-geological survey of swamps during road construction]. M.: SoyuzdRNII, 1973. 111 s. (in Rus.).
26. Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu zemlyanogo polotna na slabykh gruntakh [Guidelines for designing roadbeds on soft soils]. M.: Orgtransstroy, 1968. 197 s. (in Rus.).
27. GOST R 54000-201. Udobreniya organiceskie. Sapropeli. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Organic fertilizers. Sapropels. General technical requirements]. M.: Standartinform, 2011. 12 s. (in Rus.).
28. Biryukov N.S., Kazarnovskii V.D., Motylev Yu.L. Metodicheskoe posobie po opredeleniyu fiziko-mekhanicheskikh svoistv gruntov [Manual for determining the physical-and-mechanical properties of soils]. M.: Nedra, 1975. 177 s. (in Rus.).

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо



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

WWW.GEOINFO.RU

Организаторы:

ГеоИнфо

— независимый электронный журнал

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



ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШИХ ДАННЫХ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ГЕОЛОГИИ: КРАТКИЙ ОБЗОР

Принята к публикации 9.11.2025

Опубликована 25.11.2025

ЧЭНЬ Л.

Научно-исследовательский центр
Геологической службы Китая
(Национальные геологические архивы
Китая), г. Пекин, Китай

ВАН Л.

Научно-исследовательский центр
Геологической службы Китая
(Национальные геологические архивы
Китая), г. Пекин, Китай

МЯО Цз.

Научно-исследовательский центр
Геологической службы Китая
(Национальные геологические архивы
Китая), г. Пекин, Китай
mjinli@mail.cgs.gov.cn

ГАО Х.

Факультет географии и
информационной инженерии
Китайского университета наук о Земле
(Ухань), г. Ухань, Китай

ЧЖАН Ю.

Факультет информационной
инженерии Китайского университета
наук о Земле (Пекин), г. Пекин, Китай

ЯО Я.

Факультет географии и
информационной инженерии
Китайского университета наук о Земле
(Ухань), г. Ухань, Китай

БАЙ М.

Научно-исследовательский центр
Геологической службы Китая
(Национальные геологические архивы
Китая), г. Пекин, Китай

МЭЙ Л.

Научно-исследовательский центр
Геологической службы Китая
(Национальные геологические архивы
Китая), г. Пекин, Китай

ХЭ Цз.

Четвертый институт океанографии
Министерства природных ресурсов,
г. Бэйхай, Китай

АННОТАЦИЯ

Представляем немного сокращенный адаптированный перевод статьи китайских ученых «Применение больших данных и искусственного интеллекта в геологии: краткий обзор» (Chen et al., 2020). Она была опубликована в журнале *Journal of Physics: Conference Series* («Физический журнал: Серия “Конференции”») издательством британской благотворительной научной организации IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшей фактически международной. Эта статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник с указанием DOI. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Chen et al., 2020) приводится в конце.

Технологии больших данных и искусственного интеллекта (ИИ) обеспечили появление новых методов и возможностей для многих применений в геологии. Тем не менее приложения для работы с большими данными в сферах наук о Земле, основанные на ИИ, все еще находятся в зачаточном состоянии, а методы и цели по-прежнему разрознены, отсутствует единая теоретическая и прикладная основа. В данной статье рассматриваются: применение технологий больших данных и ИИ, их текущее состояние, имеющиеся проблемы и тенденции развития для использования в геологии. Данная публикация может послужить ориентиром для будущих исследований и разработок в этой сфере.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

геология; науки о Земле; большие данные; геологические большие данные; искусственный интеллект; машинное обучение; глубокое обучение; глубокие нейронные сети; высокопроизводительные вычисления; исторические данные; пространственно-временная база данных; междисциплинарные исследования.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Чэн Л., Ван Л., Мяо Цз., Гао Х., Чжан Ю., Яо Я., Бай М., Мэй Л., Хэ Цз. Применение больших данных и искусственного интеллекта в геологии: краткий обзор (пер. с англ.) // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 3. С. 36–42. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-36-42.

REVIEW OF THE APPLICATION OF BIG DATA AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN GEOLOGY

Accepted for publication 9.11.2025

Published 25.11.2025

CHEN L.

Development and Research Center of China Geological Survey (National Geological Archives of China), Beijing, China

WANG L.

Development and Research Center of China Geological Survey (National Geological Archives of China), Beijing, China

MIAO J.

Development and Research Center of China Geological Survey (National Geological Archives of China), Beijing, China

mjjinli@mail.cgs.gov.cn

GAO H.

Faculty of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, China

ZHANG Y.

Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, China

YAO Y.

Faculty of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, China

BAI M.

Development and Research Center of China Geological Survey (National Geological Archives of China), Beijing, China

MEI L.

Development and Research Center of China Geological Survey (National Geological Archives of China), Beijing, China

HE J.

Fourth Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Beihai, China

ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the paper “Review of the application of big data and artificial intelligence in geology” by Chinese scientists (Chen et al., 2020). It was published in the journal “Journal of Physics: Conference Series” by the publishing company of the British scientific society “Institute of Physics” (IOP) that is now virtually international. It is an open access paper under the CC BY 3.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source and DOI are referred to. In our case, the full reference to the original paper (Chen et al., 2020), which was used for the presented translation, is given in the end.

Big data and artificial intelligence (AI) have provided new methods and opportunities for many applications in geology. Nevertheless, big data and AI-based geoscience applications are still in their infancy, and the methods and objectives are still scattered, lacking a unified theoretical and application framework. This study reviews the application of big data and AI in geology and analyzes and summarizes the current status, development trends and existing problems of ongoing studies from the perspectives of geology. This study can provide a reference for the future research and development of the application of big data and AI in the field of geology.

KEYWORDS:

geology; Earth sciences; big data; geological big data; artificial intelligence; machine learning; deep learning; deep neural networks; high-performance computing; historical data; spatiotemporal database; interdisciplinary research.

FOR CITATION:

Chen L., Wang L., Miao J., Gao H., Zhang Y., Yao Y., Bai M., Mei L., He J. Primenenie bol'shikh dannykh i iskusstvennogo intellekta v geologii: kratkiy obzor (per. s angl.) [Review of the application of big data and artificial intelligence in geology (translated from English into Russian)] // *GeoInfo*. 2025. T. 7. № 3. S. 36–42. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-36-42 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

В геологии в основном изучается литосфера, в том числе состав, внутренняя структура и развитие Земли [1]. Из-за масштабности и сложности объектов геологических исследований часто приходится сталкиваться с проблемами, связанными со сложными источниками данных и низкой точностью [2]. Благодаря быстрому развитию наук и технологий появилось огромное количество новых технических методов, в том числе для геофизических, геохимических исследований [3–5], изотопной геологии [6], дистанционного зондирования Земли [7] и т.д. Эти технологии увеличивают точность и объем геологических данных.

Искусственный интеллект (ИИ) относится к компьютерным наукам. Это интеллект, проявляемый системой, созданной людьми [8]. ИИ можно разделить на две категории – слабый (узкий) и сильный (общий) [8]. В области слабого ИИ нельзя создать интеллектуальные машины, способные рассуждать и решать проблемы, как человек [9]. Сильный ИИ предполагает возможность создания действительно интеллектуальных машин, способных к рассуждению и решению задач и, может быть, даже считающихся разумными и обладающими самосознанием [9]. Направления исследований в сфере ИИ включают экспертизные системы, машинное обучение, распознавание речи, компьютерное зрение и рекомендательные системы (системы рекомендаций) [10]. Среди них наиболее быстро развивающимся и наилучшим образом отражающим интеллект направлением является машинное обучение [11].

В сфере машинного обучения исследуется то, как компьютеры имитируют или реализуют поведение человека в процессе обучения, характеризующееся способностью автоматически совершенствоваться на основе опыта. Через алгоритмы машинного обучения возможно приобретение новых знаний или навыков. Для преодоления узких мест в развитии машинного обучения (таких

как обилие типов моделей, обширность обучения, сложность определения весов параметров и широкий диапазон параметров) появилась технология глубокого обучения, которая получила широкое распространение и стала ключевым направлением развития ИИ [12].

Глубокое обучение – это разновидность технологии машинного обучения, в которой используются глубокие нейронные сети для решения задачи обучения представлению признаков (на основе применения многослойных нейронных сетей для автоматического извлечения высокоуровневых признаков из сложных данных. – Ред.). Основные цели работы нейронной сети глубокого обучения – имитация процесса обучения человеческого мозга с помощью алгоритма глубокой нейронной сети и объединение низкоуровневых признаков в абстрактное представление более высокого уровня с использованием нелинейной взаимосвязи между вводом и выводом, чтобы в конечном итоге достичь совершенного уровня и возможности применения [13].

Очень важную роль в результатах обучения модели ИИ играет богатство данных [14]. В связи с взрывным ростом объемов данных и быстрым развитием сетевых вычислительных технологий, обеспечивающих базовое информационное обеспечение для ИИ, появилась концепция больших данных [15]. Большие данные – это крупномасштабный набор данных, которые трудно собирать, хранить, анализировать и которыми трудно управлять с помощью традиционных программных средств для баз данных [16]. Это относится не только к значительному количеству данных, но и к большому разнообразию их типов и низкой плотности распределения значений [15]. Технология больших данных может помочь самим разным компаниям извлекать необходимую информацию из больших массивов данных с низкой плотностью распределения значений. В результате данные могут быть преобразованы из количественных в каче-

ственны, что действительно будет представлять ценность [15].

В последние годы благодаря своему быстрому развитию технологии больших данных и искусственного интеллекта нашли определенное применение в геологии [17]. С повышением производительности вычислительных систем (особенно благодаря быстрому развитию технологии высокопроизводительных вычислений с использованием графических процессоров) проблемы ограничения вычислительных мощностей при использовании технологий больших данных и ИИ были в значительной степени решены [18]. Это снижает нагрузку рассматриваемых технологий на вычислительном уровне и расширяет возможности их применения и перспективы их развития при геологических исследованиях [19]. Искусственный интеллект обычно используется для изыскательских работ, поисков и разведки полезных ископаемых, обнаружения геохимических аномалий [20].

В этой статье как раз и рассматривается применение технологий больших данных и ИИ в геологии.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ БОЛЬШИХ ДАННЫХ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ГЕОЛОГИИ ►

Геологические большие данные – это новое понятие, возникшее в результате внедрения теории больших данных в геологию [17]. Данные при геологических исследованиях поступают из широкого спектра источников. С внедрением новых технологий, снижением стоимости хранения и накоплением исторических данных геологическая информация стала приобретать характеристики больших данных – по объему, ценности, разнообразию и временному охвату [2]. Традиционные методы обработки данных постепенно перестают соответствовать требованиям к методам и скорости обработки геологических данных [17]. Технологии больших данных и ИИ дали геологической отрасли эффективные методы работы с информа-

цией, а развитие высокопроизводительных вычислений значительно расширило возможности применения моделей ИИ в геологии.

Геологические науки являются наблюдательными дисциплинами и основываются на обобщенном анализе собранной информации с использованием интегрирующих рассуждений [18]. Из-за сложностей с получением исчерпывающих данных и ограниченности собственного опыта и знаний исследователей трудно выполнять анализ, делать заключения, которые полностью соответствовали бы реальным ситуациям. А технологии больших данных и ИИ по сравнению с традиционными методами позволяют использовать огромные объемы геологических данных для обобщения характеристик, выявления закономерностей геологических процессов, объективного, беспристрастного и быстрого анализа явлений и получения более научно обоснованных результатов [19]. Поэтому исследования в области технологий обработки геологических больших данных дадут новый толчок развитию геологии.

Геологические большие данные характеризуются наличием многих источников, разнообразием типов и большими объемами, что делает возможным применение теории больших данных и связанных с ней технологий в геологической отрасли, но вместе с тем вызывает ряд проблем [2]. Например, наличие множества источников затрудняет интеллектуальный анализ данных. Поскольку существуют разные источники, типы и объемы данных, методы их обработки и модели анализа также различны, поэтому трудно определить степень влияния каждого типа данных на конечные результаты. Плотность распределения значений в случае больших геологических данных относительно низка, поэтому итоговые результаты анализа могут быть недостоверными, что оказывает огромное влияние на поиски и разведку полезных ископаемых, мониторинг опасных геологических явлений и процессов и на другие аспекты. В Китае пока (на момент написания статьи. – Ред.) не так много исследований по технологии больших геологических данных, поэтому трудно гарантировать качество геологических данных с низкой плотностью распределения значений, а обеспечение точности и сохранности данных также сталкивается со многими проблемами [19].

До настоящего времени многие учеными предпринимали попытки примене-

ния технологических методов, связанных с большими данными и ИИ, в геологии. В сфере научных геологических исследований благодаря все более широкому использованию новых технологий больше экономических преимуществ, источников и объемов данных имеет направление поисков и разведки полезных ископаемых. Поэтому именно данное направление лучше подходит для применения искусственного интеллекта и теоретических методов работы с большими данными. Одни из наиболее широко используемых моделей ИИ в этой области – искусственные нейронные сети (модели глубокого обучения), которые зарекомендовали себя как мощные инструменты для классификации и идентификации полезных ископаемых [20, 23]. Крэкнелл и Ридинг [24] сравнили пять алгоритмов машинного обучения для геологического картирования и показали, что предпочтительной моделью для литологической классификации является алгоритм «случайный лес» (Random Forest, RF). В последние годы широкое внимание привлекли исследования ключевых технологий машинного обучения, применяемых в области разведки полезных ископаемых и соответствующего картирования. При картировании перспективных месторождений полезных ископаемых было использовано несколько методов контролируемой классификации (supervised classification). Родригес-Гальяно и др. [25] использовали искусственную нейронную сеть, дерево решений, алгоритм «случайный лес» и метод опорных векторов по отдельности для картирования месторождений полезных ископаемых. Сравнив результаты использования этих четырех методов, они обнаружили, что метод «случайный лес» превосходит остальные три метода машинного обучения [25].

Кроме того, из-за сложности геологической среды и неизвестного распределения геохимических данных традиционные математические и статистические методы неэффективны для выявления геохимических аномалий. Поэтому для определения геохимических аномалий некоторые методы машинного обучения были использованы в экспериментальном порядке [4–5]. Преимущество этих методов заключается в том, что они не делают предположений/допущений по распределению данных и хорошо справляются с нелинейными связями между геохимическими данными. Например, Тваракави и др. [4] использовали метод опорных

векторов и его надежную модификацию с использованием метода наименьших квадратов для картирования концентраций триоксида мышьяка, используя распределение концентраций золота, присутствующего в отложениях Аляски. Бёшэр и др. [26] применили искусственные нейронные сети для картирования почв в нижнем течении реки Сиррпуйоки (Sirppujoki) на юго-западе Финляндии. Чэн и др. [27] провели исследования на юге провинции Цзилинь в Китае и успешно выявили там геохимические аномалии с помощью метода (модели) ограниченной машины Больцмана. Гонбади и др. [5] использовали контролируемое машинное обучение для выявления медно-порфировых геохимических аномалий в провинции Керман в Иране. Чэн и др. [28] предложили пространственно ограниченную модель нейронной сети, основанную на использовании множества автотенкодеров (автокодировщиков), для эффективного улучшения способности нейронной сети (глубокого обучения) идентифицировать многомерные аномалии в разведочной геохимии. Чэн и др. [29] представили также подход с применением многосверточных автокодировщиков с неинтерактивной структурой сети для точного распознавания геохимических аномалий. Вышеуказанные исследования показали, что модели машинного обучения являются эффективными инструментами для распознавания многомерных геохимических аномалий.

Кроме того, технологии ИИ и больших данных обладают большим потенциалом в таких направлениях геологических исследований, как идентификация геологических образцов, минералогические исследования руд и сейсмический мониторинг.

Теоретические методы больших данных могут быть успешно применены в области идентификации геологических образцов. Стандарты классификации данных для идентификации геологических образцов известны, а источники данных весьма разнообразны. Высокую справочную ценность для текущего определения образцов имеют исторические данные по идентификации [19]. Модель ИИ может быть обучена на исторических геологических больших данных. И тогда она может применяться для распознавания типов образцов, что может не только значительно увеличить эффективность, но и повысить точность и избежать ошибок, вызванных искусственным распознаванием [24]. В настоящее время в области иден-

тификации образцов полезных ископаемых используются модели глубокого обучения, которые дают хорошие результаты [30]. Надо полагать, что в будущем в этой области очень перспективным также будет использование методов больших данных и ИИ.

Теория геологических больших данных имеет широкие перспективы применения и в минералогических исследованиях. Использование технологий больших данных и моделей ИИ для анализа и извлечения знаний из геологических больших данных может помочь геологам в понимании моделей месторождений, анализе процессов их формирования, выявлении металлогенических закономерностей и в содействии поискам и разведке полезных ископаемых и освоению их месторождений [24].

Сейсмический мониторинг связан с экономикой и жизнью населения страны, а сейсморазведка также является важным технологическим методом в геологической отрасли. Развитие науки и техники, применение новых технологий в сферах мониторинга землетрясений и сейсморазведки привели к появлению огромного объема данных. Поэтому эффективность и точность анализа сейсмической информации существенно повышаются с применением технологий больших данных и ИИ и высокопроизводительных вычислительных технологий. И это окажет большую помощь для сейсмического мониторинга и полевых геологоразведочных работ.

ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ ►

Технологии ИИ и больших данных широко применяются в информатике и науке о данных, однако в геологии их использование все еще находится на начальной стадии. Нет необходимого полного набора теорий и систем, объединяющего теоретические проблемы геологии с машинным обучением.

Соответствующие достижения в геологии включают выявление геохимических аномалий [4–5], идентификацию полезных ископаемых [20, 23] и многие другие направления. Это говорит о том, что технологии больших данных и ИИ имеют широкие перспективы для исследований и высокую прикладную ценность в геологии.

Преимущество больших пространственных данных заключается в том, что они отражают тонкую структуру связей «Земля – время» [30], а подход «снизу вверх» может быть использован для моделирования традиционных геологических задач. Если ИИ использовать как

средство, большие данные – как входные данные, а решение задач – как цель, то можно эффективно получать результаты с более высокой точностью по сравнению с традиционными статистическими методами. Однако неопределенность ИИ, особенно глубокого обучения, делает неопределенным развитие использования этих технологий в разных направлениях геологии [22].

Важными особенностями геологии являются многомасштабные эффекты, пространственно-временная неоднородность и пространственно-временные корреляции [31]. Исследования в геологических науках стремительно развиваются от одномасштабных к многомасштабным и от статических к динамическим [31]. В ходе этого развития становятся крайне необходимыми новые модели и новые данные. И возможности для этого обеспечивают технологии ИИ и больших данных. Поэтому фокусами будущих исследований становятся достоверность данных, их погрешности и надежность моделей.

С учетом четырех характеристик больших данных (их огромного объема, разнообразия типов, низкой плотности распределения и быстрой генерации [15]), технические средства их анализа и исследований отличаются от традиционных. Требуются более высокие вычислительные мощности и более эффективные методы обработки данных. Технологии высокопроизводительных вычислений значительно улучшили вычислительные возможности [107], которые играют очень важную роль при анализе и обработке больших данных и реализации сложных моделей ИИ. Мощные вычислительные ресурсы будут основой для эффективного построения пространственно-временных баз данных в геологии и решения задач, связанных с разнородными пространственными данными, полученными из многих источников и в разные периоды времени.

Кроме того, в будущем предстоит решить научно-технический вопрос о том, как эффективно построить платформу искусственного интеллекта на основе пространственно-временной базы данных для поддержки среди больших данных и, таким образом, провести анализ и исследование пространственных данных из множества источников.

ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ►

В этой статье кратко описано текущее состояние исследований в области применения технологий больших дан-

ных и искусственного интеллекта в геологии. Авторами сделаны следующие выводы.

Благодаря разнообразию методов сбора, снижению затрат на хранение и накопление геологических данных последние постепенно приобретают характеристики больших данных. Внедрение технологий больших данных и искусственного интеллекта дало геологической отрасли более разнообразные методы обработки данных и возможность извлекать геологические закономерности, скрытые в массивах геологических данных. Наиболее развитое научное направление применения технологий больших данных и ИИ в геологии в настоящее время – это поиски и разведка полезных ископаемых. В качестве надежных инструментов классификации и идентификации полезных ископаемых зарекомендовали себя такие наиболее широко используемые модели ИИ, как искусственные нейронные сети. В сфере геохимии были применены на практике и дали хорошие результаты некоторые методы обнаружения аномалий, основанные на машинном обучении. В таких направлениях, как идентификация геологических образцов, минералогические исследования и мониторинг землетрясений, модели ИИ могут быть обучены на основе исторических данных и опыта для повышения эффективности, уменьшения ошибок и повышения точности.

Использование технологий ИИ и больших данных в геологии находится в начальном состоянии. Для их развития в этой отрасли еще не разработан полный набор теорий и систем. Но их применение уже продемонстрировало такие преимущества, как обеспечение точности и эффективности моделирования. Однако неопределенность в ответах ИИ, особенно на основе глубокого обучения, пока делает развитие соответствующих технологий в геологии неопределенным.

Непрерывное развитие технологий больших данных и искусственного интеллекта дает множество новых средств и методов, которые открывают большие возможности для инноваций в геологии. В рамках тенденции развития «от одномасштабного к многомасштабному, от статического к динамическому» важной задачей, которую необходимо решить в будущем, является создание пространственно-временной базы данных и платформы ИИ в геологии в соответствии с особенностями геологиче-

ских исследований. Чтобы решить эту задачу, ученым-геологам необходимо выйти за рамки традиционного мышления и начать знакомиться с соответствующими теориями больших данных и искусственного интеллекта и активно участвовать в междисциплинарном сотрудничестве.

Применение технологий больших данных и ИИ в геологии становится все более популярным и позволяет получать интересные результаты. При этом приходится сталкиваться с возникновением многих новых возможностей и соответствующих вызовов. В научных исследованиях нет легких путей, а меж-

дисциплинарные исследования еще более сложны. Однако есть основания полагать, что благодаря постоянным углубленным исследованиям и анализу геологические науки с помощью технологий больших данных и искусственного интеллекта обязательно добываются значительного прогресса. 

Источник для перевода ► (Source for the translation) ►

Chen L., Wang L., Miao J., Gao H., Zhang Y., Yao Y., Bai M., Mei L., He J. Review of the application of big data and artificial intelligence in geology // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 1684. Article 012007. DOI:10.1088/1742-6596/1684/1/012007.

Список литературы, использованной авторами переведенной статьи ► (References used by the authors of the translated paper) ►

1. Muehlberger W.R. Earth Science // Science. 1966. Vol. 152. № 3724. P. 950–951.
2. Huang S.F., Liu X.H. Thinking about the application of geological big data and geological information development // China Mining Magazine. 2016. Vol. 25. № 08. P. 166–170.
3. Wang X.S., Zhao B.L., Dong S.T., Zhang Y., Yi W.Q., Xu G.C. Challenges and strategies for large seismic exploration data of oil and gas industry // China Petroleum Exploration. 2014. Vol. 19. № 04. P. 43–47.
4. Twarakavi N.K.C., Misra D., Bandopadhyay S. Prediction of arsenic in bedrock derived stream sediments at a gold mine site under conditions of sparse data // Natural Resources Research. 2006. Vol. 15. № 1. P. 15–26.
5. Gonbadi A.M., Tabatabaei S.H., Carranza E.J.M. Supervised geochemical anomaly detection by pattern recognition // Journal of Geochemical Exploration. 2015. Vol. 157. P. 81–91.
6. Hamilton E.I. Principles of isotope geology // Earth Science Reviews. 1978. Vol. 14. № 2. P. 190–191.
7. Siegal B.S., Gillespie A.R. Remote Sensing in Geology. Wiley, 1980.
8. Russell S.J., Norvig P. Artificial Intelligence: a Modern Approach. Prentice Hall, 1995. P. 2829–2833.
9. Mccorduck P., Selfridge O., et al. History of artificial intelligence // International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1977.
10. Zhu W., Chen H.H., Tian S.Y., Wang H.W. Artificial intelligence: new blue ocean from a scientific dream – analysis and countermeasures of the development situation of AI industry // Science & Technology Progress and Policy. 2016. Vol. 33. № 21. P. 66–70.
11. Jordan M.I., Mitchell T.M. Machine learning: trends, perspectives, and prospects // Science. 2015. Vol. 349. № 6245. P. 255–260.
12. Mitchell T.M., Carbonell G.J., Michalski R.S. Machine Learning. McGraw-Hill, 2003.
13. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. 2015. Vol. 521. № 7553. P. 436–444. DOI:10.1038/nature14539.
14. Braga A., Logan R. The emperor of strong AI has no clothes: limits to artificial intelligence // Information. 2017. Vol. 8. № 4. Article 156. DOI:10.3390/info8040156.
15. Hilbert M. Big Data for development: a review of promises and challenges // Development Policy Review. 2016. Vol. 34. № 1. P. 135–174.
16. Manyika J., Chui M., Brown B., et al. Big Data: the Next Frontier for Innovation, Competition, and Productivity. Analytics, 2011.
17. Yan G., Xue Q., Xiao K., et al. An analysis of major problems in geological survey big data // Geological Bulletin of China. 2015. Vol. 34. № 7. P. 1273–1279.
18. Huynh L.N., Lee Y., Balan R.K. DeepMon: Mobile GPU-based deep learning framework for continuous vision applications // The International Conference, 2017.
19. Zhang Q., Jia X.Y., Wu Z., Wang J.R., Jiao S.T., Chen W.F. Big data will lead to a great change in geological science research // China Geoscience union annual meeting, Beijing, China, 2015.
20. Thompson S., Fueten F., Bockus D. Mineral identification using artificial neural networks and the rotating polarizer stage // Computers & Geosciences. 2001. Vol. 27. № 9. P. 1081–1089.
21. Yao Y.P., Chai Y.C., Ma F.C. New opportunities for the development of Geological Science: reflections on the development trend of Geology // Chinese Science Bulletin. 2004. Vol. 18. P. 1919–1924.

22. Yao Y, Zhang J, Hong Y, et al. Mapping fine-scale urban housing prices by fusing remotely sensed imagery and social media data // Transactions in GIS, 2018. Vol. 22. № 1. DOI:10.1111/tgis.12330.
23. Baykan N.A., Yilmaz N. Mineral identification using color spaces and artificial neural networks // Computers & Geosciences. 2010. Vol. 36. № 1. P. 91–97.
24. Cracknell M.J., Reading A.M. Geological mapping using remote sensing data: a comparison of five machine learning algorithms, their response to variations in the spatial distribution of training data and the use of explicit spatial information // Computers & Geosciences. 2014. Vol. 63. № 1. P. 22–33.
25. Rodriguez V.G., Sanchez M.C., Chica M.O., et al. Machine learning predictive models for mineral prospectivity: an evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines // Ore Geology Reviews. 2015. Vol. 71. P. 804–818.
26. Beucher A., Osterholm P., Martinkauppi A., et al. Artificial neural network for acid sulfate soil mapping: application to the Sirppujoki River catchment area, south-western Finland // Journal of Geochemical Exploration. 2013. Vol. 125. № 1. P. 46–55.
27. Chen Y., Lu L., Li X. Application of continuous restricted Boltzmann machine to identify multivariate geochemical anomaly // Journal of Geochemical Exploration. 2014. Vol. 140. № 4. P. 56–63.
28. Chen L., Guan Q., Xiong Y., Liang J., Wang Y., Xu Y. A spatially constrained multi-autoencoder approach for multivariate geochemical anomaly recognition // Computers and Geosciences. 2019. Vol. 125. P. 43–54. DOI:10.1016/j.cageo.2019.01.016.
29. Chen L., Guan Q., Feng B., Yue H., Wang J., Zhang F. A multi-convolutional auto-encoder approach for multivariate geochemical anomaly recognition // Minerals. 2019. Vol. 9. № 5. Article 270. DOI:10.3390/min9050270.
30. Park Y.M., Kwan M.P. Multi-contextual segregation and environmental justice research: toward fine-scale spatiotemporal approaches // International Journal of Environmental Research & Public Health. 2017. Vol. 14. № 10. Article 1205. DOI:10.3390/ijerph14101205.
31. Regenauerlieb K., Veveakis M., Poulet T., et al. Multiscale coupling and multiphysics approaches in earth sciences: applications // Journal of Coupled Systems & Multiscale Dynamics. 2013. Vol. 1. № 3. P. 281–323.
32. Kindratenko V.V., Enos J.J., Shi G., et al. GPU clusters for high-performance computing // IEEE International Conference on CLUSTER Computing and Workshops, 2009.



Телеграм-канал журнала

ГеоИнфо Независимый электронный журнал

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>

Организаторы:

ГеоИнфо

— независимый электронный журнал

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/>

ПОДРОБНЕЕ О РОЛИ АНАЛИТИКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ

Принята к публикации 11.09.2025

Опубликована 25.11.2025

ВАНИ В.Д.

Институт аэрокосмической инженерии, г. Дундигал, р-н Хайдарабад, шт. Телангана, Индия v.divyavani@iare.ac.in

РАДЖ В.Х.

Факультет прикладных наук Инженерного колледжа «Нью Хорайзон» (New Horizon – «Новый горизонт»), г. Бангалор, шт. Карнатака, Индия

ДАТТ А.

Университет «Лавли Профессионал» («Прекрасный профессиональный университет»), г. Фагвара, шт. Пенджаб, Индия

РАВИНДРАНАТХ Р.

Факультет менеджмента Инженерного колледжа «Мангала» (Mangalam – «Удача»), г. Коттаям, шт. Керала, Индия

ТЬЯГИ Л.К.

Институт менеджмента и технологий «Ллойд» (Lloyd), г. Грейтр-Нойда, шт. Уттар-Прадеш, Индия

АЛМУСАВИ М.

Факультет инженерии компьютерных технологий Колледжа технической инженерии Исламского университета, г. Наджаф, Ирак

ЯДАВ Д.К.

Институт инженерии и технологий «Ллойд», сектор Ноледж Парк II, г. Грейтр-Нойда, шт. Уттар-Прадеш, Индия

АННОТАЦИЯ

Предлагаем вниманию читателей немного сокращенный и адаптированный перевод доклада преимущественно индийских инженеров-геологов и геотехников «Подробнее о роли аналитики больших данных в инженерно-геологических изысканиях» (Vani et al., 2024), который был сделан на 3-й Международной конференции по гражданскому строительству, проектированию строительных объектов и инженерным методам охраны окружающей среды (ICS-MEE), проходившей 2–3 мая 2024 года в индийском городе Коттаям штата Керала. Данное мероприятие было организовано Инженерным колледжем «Мангала», получило финансовую поддержку от Министерства науки и технологий Индии и собрало более 1000 участников со всего мира. Материалы этой конференции были в том же году опубликованы в рецензируемом сборнике трудов научных конференций E3S Web of Conferences, который выпускает французское издательство EDP Sciences (Edition Diffusion Presse Sciences).

Рассматриваемая статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0, позволяющей распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений, ссылки на первоисточник и

DOI. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Vani et al., 2024) приводится в конце.

В данной обзорной статье рассматривается преобразующая роль аналитики больших данных для инженерно-геологических исследований, которая заключается в переходе от традиционных методов прошлого к парадигме, основанной на данных, что позволяет дополнить процесс принятия решений и повысить точность результатов исследований подземной среды. Данный обзор демонстрирует значительные улучшения в описании площадок будущего строительства, оценках рисков и методах строительства при использовании методов статистической аналитики больших массивов данных при инженерно-геологических изысканиях. В статье подчеркивается способность технологии больших данных радикально трансформировать инженерно-геологические изыскания благодаря усовершенствованию прогнозного моделирования, управления рисками и повышению устойчивости инженерных практик. Также подчеркивается важнейшая роль технологии больших данных в решении проблем глобального потепления и разрушения озонового слоя. Путем анализа многих случаев из практики и методов, основанных на искусственном интеллекте (ИИ), в работе проливается свет на повышение эффективности и экологические преимущества инженерно-геологических изысканий с использованием ИИ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

инженерная геология; большие данные; искусственный интеллект; машинное обучение.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Вани В.Д., Радж В.Х., Датт А., Равиндранатх Р., Тяги Л.К., Алмусави М., Ядав Д.К. Подробнее о роли аналитики больших данных в инженерно-геологических изысканиях (пер. с англ.) // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 3. С. 44–53.
DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-44-53.

DIGGING DEEPER: THE ROLE OF BIG DATA ANALYTICS IN GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS

Accepted for publication 11.09.2025

Published 25.11.2025

VANI V.D.

Institute of Aeronautical Engineering, Dundigal, Hyderabad
District, Telangana, India
v.divyavani@iare.ac.in

TYAGI L.K.

Lloyd Institute of Management and Technology, Greater Noida,
Uttar Pradesh, India

RAJ V.H.

Department of Applied Sciences, New Horizon College of
Engineering, Bangalore, Karnataka, India

ALMUSAWI M.

Department of computers Techniques engineering, College of
technical engineering, The Islamic University, Najaf, Iraq

DUTT A.

Lovely Professional University, Phagwara, Punjab, India

YADAV D.K.

Lloyd Institute of Engineering & Technology, Knowledge Park II,
Greater Noida, Uttar Pradesh, India

RAVEENDRANATH R.

Department of Management Studies, Mangalam College of
Engineering, Kottayam, Kerala, India

ABSTRACT

We bring to the attention of our readers a slightly abridged and adapted translation of the report by primarily Indian geological and geotechnical engineers "Digging deeper: the role of big data analytics in geotechnical investigations" (Vani et al., 2024), which was presented at the 3rd International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering (ICS-MEE) held on 2–3 May 2024 in the Indian city of Kottayam, Kerala. That event was organized by the Mangalam College of Engineering, received financial support from the Ministry of Science and Technology of India, and gathered more than 1,000 participants from all over the world. In the same year, the proceedings of that conference were published in the peer-reviewed conference proceedings series "E3S Web of Conferences" issued by the French publishing house "EDP Sciences" ("Edition Diffusion Presse Sciences"). The paper on the basis of that report by Indian specialists is available in open access under the CC BY 4.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes, original source, and DOI are noted. In our case, the full reference to the original paper (Chen et al., 2020), which was used for the presented translation, is given in the end.

This review paper explores the transformative role of big data analytics in geotechnical engineering, transferring past conventional methods to a data-driven paradigm that complements decision-making and precision in

subsurface investigations. By integrating large statistics analytics with geotechnical engineering, this study demonstrates big improvements in site characterization, danger assessment, and production methodologies. The research underscores the capability of big data to revolutionize geotechnical investigations through improved prediction models, threat management, and sustainable engineering practices, highlighting the critical role of big data in addressing international warming and ozone depletion. Through the examination of numerous case studies and AI-driven methodologies, this paper sheds light at the efficiency gains and environmental benefits attainable in geotechnical engineering.

KEYWORDS:

geotechnical engineering; big data; artificial intelligence; machine learning.

FOR CITATION:

Vani V.D., Raj V.H., Dutt A., Raveendranath R., Tyagi L.K., Almusawi M., Yadav D.K. Podrobnee o roli analitiki bol'shikh dannykh v inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh (per. s angl.) [Digging deeper: the role of big data analytics in geotechnical investigations (translated from English into Russian)] // Geoinfo. 2025. T. 7. № 3. S. 44–53.
DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-44-53 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

Строительство, в том числе геотехническое, значительно выигрывает при огромных объемах данных, собираемых в ходе инженерно-геологических изысканий. Для перевода данных в осмысленную форму необходимы их анализ и визуализация. Последние также нужны для понимания трудностей, с которыми сталкиваются организации, собирающие и/или использующие инженерно-геологические данные. Для анализа и визуализации данных, например, для систем бизнес-интеллекта (Business Intelligence, BI) подходит интерактивный продукт компании Microsoft под названием Power BI.

При инженерно-геологических изысканиях для оценки геоданных, изменяющихся как в пространстве, так и во времени, важнейшую роль играет статистический анализ. По причине быстрого развития средств измерений и оцифровки были разработаны специальные методы анализа данных для эффективной обработки огромного количества неоднозначной и неполной информации. В сферах цифрового интеллекта (digital intelligence) и цифровой экономики происходит непрерывная смена парадигм в направлении от традиционных моделей, основанных на физике, к подходам, основанным на данных (data-driven frameworks). Это объясняется тем, что модели, основанные на данных, являются более гибкими и полезными в ситуациях, когда физические особенности или механизмы либо недостаточно хорошо поняты, либо слишком сложны для точного моделирования [1].

Для характеристики генетических свойств геоматериалов авторами работы [2] была предпринята попытка использовать биологические понятия из области генетики. Они предложили но-

вую стратегию, основанную на общих характеристиках определенных типов горных пород в определенной местности или зоне. Этот подход позволяет выявлять генетические признаки геоматериалов путем анализа параметрических данных по ним с использованием теории больших данных (big data). Была создана программная платформа для обработки и оценки больших объемов данных. В процессе представленного в указанной публикации исследования было проанализировано около 80 тысяч наборов данных по физико-механическим свойствам геоматериалов из типичного района в целях выработки рекомендаций по определению характеристик геоматериалов, обеспечению проектирования данными и возможному их использованию для предотвращения стихийных бедствий.

В инженерной геологии хорошо известно, что особенности площадок будущего строительства имеют индивидуальный характер. Данные, полученные в результате исследований на одной площадке, нельзя напрямую использовать для другой. Тем не менее на практике часто случается так, что принятие решений для конкретной площадки опирается не на набор данных, специфичный именно для нее, а на обобщенную информацию. Например, для расчета проектных характеристик грунтов инженеры часто используют модели трансформации (transformation models), причем в большинстве случаев их калибруют с использованием обобщенных данных. С другой стороны, полный отказ от применения таких моделей был бы крайне непрактичным и избыточным [3]. Их эффективность позволяет предположить, что использование обобщенных данных может принести пользу при принятии решений по конкретным

площадкам. В эпоху технологии *больших данных* инженерам-геологам целесообразно учитывать полезность обобщенных баз данных.

В публикации [4] рассматривается значение расчетов надежности в геотехническом проектировании с акцентом на контроль качества на протяжении всего жизненного цикла здания или сооружения. Подчеркивается, что хотя неопределенности можно обрабатывать вероятностными методами, они обычно являются «известными неизвестными», для работы с которыми требуются исторические данные и измеримая информация.

При работе со сложными реальными данными, неточными данными и географической изменчивостью, которые трудно обрабатывать с использованием детерминированных методов, большую роль играет достоверность. Поскольку географические неопределенности влияют, например, на сейсмические характеристики разных участков, важна геопространственная база данных для описания инженерно-геологической информации, специфичной для конкретной площадки, а также для совершенствования методик геопространственного зонирования. В работе [5] представлена многоисточниковая геопространственная информационная система, включающая такие компоненты, как платформа больших данных, геостатистическая оценка плотности распределения значений, оптимизация метода геостатистической интерполяции и др. Эта система была применена для территории Сеульского Столичного Региона в Южной Корее для обеспечения геопространственного зонирования сейсмических воздействий, характерных для конкретных площадок. Для каждого административного района зонирование

включало получение многоисточниковых геопространственных карт, геослоев и факторов воздействия на площадки.

Инженерно-геологические изыскания требуют проведения специальных испытаний, однако сделанные на их основе выводы могут быть неверными из-за сложности методик, неточного управления данными или уникальных свойств грунтов. Для обеспечения бесперебойного хода работ и точности данных при изысканиях используют геоинформационную систему на основе ВР нейронной сети (обучаемой методом обратного распространения ошибки – BackPropagation). Такой подход обеспечивает надлежащую обработку данных и дает заслуживающую доверия основу для исследований, гарантируя надежность и точность результатов [6].

В Казахстане в свое время большое внимание исследователей было уделено созданию инженерно-геологической базы данных для Университета Назарбаева в г. Астане. Для построения этой базы данных использовался фиксированный набор данных, включавший карту города и информацию, сгенерированную пользователями по данным более чем 2000 скважин. В зависимости от стратиграфических особенностей и геологического происхождения террито-рию Астаны разделили на восемь зон. При этом выделили шесть основных инженерно-геологических элементов [7]. Были учтены инженерно-геологические характеристики грунтов. Границы между элювиальными и аллювиальными грунтами, а также пределы пластичности были точно связаны с модулем упругости E . Для определения опти-мальных изменений длины забивных свай для каждой зоны была составлена инженерно-геологическая карта.

ПОЯВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ ►

В области инженерной геологии работа по предписаниям уступила место использованию более точных приближений, основанных на ограниченной информации, полученной при инженерных изысканиях на площадках. В эпоху, когда методы принятия решений должны больше основываться на данных и зависеть от них, особенно при работе с зеттабайтами (миллиардами терабайт) информации, процесс обработки геоданных включает несколько этапов, представленных на рисунке 1.

Согласно статье [8] каждое данное имеет ценность независимо от его каче-



Рис. 1. Цифровой конвейер геоданных включает пять этапов.

ства или способности вписываться в физическую модель. Определение этой ценности путем изучения реальности данных с использованием вероятностных методов, машинного обучения или других подходов, основанных на данных, представляет собой серьезную задачу для научного сообщества. Ее ре-шение позволит по-новому взглянуть на работу инженеров-геологов и геотехни-ков в иммерсивной цифровой среде, где, вероятно, уже присутствует машин-ный интеллект.

При этом следует отметить, что на пути усилий по продвижению гендерно-го равенства в геотехнической профес-сии есть ряд препятствий, ограничи-вающих привлечение и представитель-ство женщин в академической среде. Например, в Индии, хотя в сфере про-ектирования для строительства женщи-ны в настоящее время составляют около 15–17% профессорско-преподаватель-ского состава, в сфере геотехники их только 11%. В США только в одном из десяти научно-исследовательских ин-ститутов две женщины или более зани-мают академические должности, а более чем в трети таких учреждений их нет вовсе. Поэтому среди женщин меньше тех, кто завершает соответствующее об-учение и получает степень бакалавра, магистра или доктора, – и это актуаль-ная проблема [9]. То есть для развития и устойчивости отрасли геотехники большое значение имеет в том числе

поддержка сильного женского профес-сорско-преподавательского состава в этой профессии.

В работе [10] предлагается делать упор на развитие инженерной геологии и в том числе геотехники, основанных на данных. Предлагается применять инновационные алгоритмы для работы с геоданными с помощью новых техноло-гий, отвечающих практическим требо-ваниям и использующих существующие знания.

Продолжаются исследования в обла-сти описания площадок на основе дан-ных. Они охватывают в том числе такие вопросы, как объясняемая идентифика-ция участков на основе данных и работа с «непривлекательными» данными. Сре-ди требующих решения задач – разви-тие машинного обучения с превраще-нием его в ключевой инструмент, мето-дов этого обучения с достижением ин-теллектуальности по аналогии с цифро-выми двойниками. Цель данной пове-стки – в перспективе революционизи-ровать машинное обучение в сфере ин-женерной геологии.

В докладе [11] рассматривается при-менение технологий больших данных и ис-кусственного интеллекта (ИИ) при ис-следованиях геопасностей в основ-ном на примере района водохранилища «Три ущелья» (Three Gorges). В этой ра-боте предлагается актуальная информа-ция о возможностях ИИ при изучении геопасностей. Она может стать ориен-

тиром для будущих исследований. Для улучшения знаний о геологических условиях в разных местностях и связанных с ними рисках необходимо выработать рекомендации по усилению технологий ИИ и больших данных в сфере инженерно-геологических изысканий.

Инженерно-геологическое описание площадки имеет очень большое значение для проектов гражданского строительства. В настоящее время этот процесс стал более точным и эффективным благодаря сочетанию технологий искусственного интеллекта и интернета вещей (Internet of Things, IoT) [12]. С использованием ИИ анализируются геологические и геопространственные данные, тогда как технология интернета вещей делает возможными мониторинг и сбор полевых данных по площадке в реальном времени.

Точность описания площадки становится выше и прогнозы получаются качественнее при вводе в модели ИИ геофизических данных, собираемых посредством встроенных в грунт сенсорных сетей, которые дают динамическую картину подповерхностных условий.

Совместное использование технологии искусственного интеллекта и интернета вещей при инженерных изысканиях можно облегчить благодаря таким платформам и инструментам, как информационное моделирование объектов строительства (Building Information Modeling, BIM) и геоинформационные системы (ГИС, GIS). От этой синергии зависят развитие современной инфраструктуры и обеспечение долговечности и устойчивости проектов гражданского строительства в будущем.

Концепция «Индустря 4.0» («Четвертая промышленная революция» – переход к автоматизированному и интеллектуальному производству, интеграция цифровых технологий и физических производственных систем) и новые технологии, такие как машинное обучение, стимулируют развитие инженерной геологии в направлении цифровой трансформации и интеллектуализации. Однако из-за скудности и «непривлекательности» данных исследования в области машинного обучения и его применения в инженерно-геологической практике продвигаются медленно. В одном из таких исследований [13] предлагается разработать обучающую базу данных, отражающую специфику конкретного проекта и знания в области инженерной геологии, такие как механика грунтов и принципы численного анализа.

Стремительное развитие новых технологий существенно расширило наши знания и компетенции в области искусственного интеллекта. Например, быстрое увеличение объемов географических данных, мощные вычислительные возможности и достижения в области ИИ привели к росту использования географического анализа в экологических приложениях. Искусственный интеллект меняет все поле исследований и делает возможным выполнение геопространственного анализа с высоким разрешением [14]. Большие массивы данных до сих пор требовали использования традиционных инструментов обработки данных, однако на замену таким приложениям пришел искусственный интеллект, обеспечивающий лучшее понимание и возможность извлечения информации из огромных объемов данных [15].

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ ►

В условиях глобального потепления и разрушения озонового слоя необходимы технологии, которые могут заменить опасные методы в строительной отрасли [16]. Подходы, основанные на использовании искусственного интеллекта, могут уменьшить зависимость от лабораторных работ, снизить выбросы углекислого газа и повысить точность геотехнического проектирования и строительства. В публикации [17] представлено исследование использования в инженерной геологии интеллектуальных алгоритмов обучения, таких как: искусственные нейронные сети; нечеткая логика (Fuzzy Logic); эволюционный алгоритм обучения GEP (Gene Expression Programming); адаптивная нейро-нечеткая система вывода (ANFIS – adaptive neuro-fuzzy inference system), то есть гибридная система, которая сочетает принципы нейронных сетей и нечеткой логики; инструмент «дисперсионный анализ» (ANOVA – Analysis of Variance) (следует отметить, что это статистический метод, который не является интеллектуальным алгоритмом обучения, но используется в машинном обучении для анализа различий между средними значениями двух или более выборок и оценки их статистической значимости. – Ред.). Данные алгоритмы помогают прогнозировать геотехнические и экологические проблемы, тем самым снижая опасные глобальные эффекты.

Экспериментальные подходы к земляным работам в уже застроенных ме-

стах, где строительство осложнено, могут приводить к ошибкам (в том числе из-за человеческого фактора), вызывающим непредвиденные проблемы. Но при использовании эволюционных подходов к обучению большинство таких задач удалось решить.

Исследование, представленное в статье [18], было сосредоточено на применении искусственных нейронных сетей (ИНС) для прогнозирования конечной осевой несущей способности буровых свай, часто используемых для строительства дорог, мостов и высотных сооружений. В указанной работе использовались результаты испытаний на нагрузку фундаментов глубокого заложения в Неваде, взятые из соответствующей базы данных (Nevada Deep Foundation Stress Test Database). Модель ИНС показала хорошие результаты по неизвестным данным в отношении обобщений и точности прогнозирования: среднеквадратическая ошибка составила 12486,509 кН, средняя абсолютная ошибка – 10589,4364 кН, а коэффициент детерминации R^2 достиг 0,87.

В обзоре [19] рассказывается о многомерном наборе данных по глинам китайской провинции Цзянсу (J-CLAY/5/124), использованном для разработки модели искусственной нейронной сети с целью прогнозирования модуля упругости основания дорожной одежды (subgrade resilience modulus, M_r). Модель ИНС была обучена и оптимизирована с помощью метода поиска с запретами, или табу-поиска (tabu search). Результаты использования этой версии показали высокую точность: значения скорректированного коэффициента детерминации R^2 составили 0,87560629 и 0,892192118. Прогнозы имели низкие погрешности: средняя абсолютная ошибка составила 0,217086317, а среднеквадратическая ошибка – 0,071266013. Оптимизация табу-поиска повысила общую эффективность модели, что дало увеличение таких показателей, как: полнота (recall); точность (precision); F1-мера, или сбалансированная F-оценка (F1 score); общая точность (accuracy). Также это привело к снижению функции потерь (loss reduction). Таким образом, полученная модель ИНС продемонстрировала обнадеживающие результаты при оценке модуля упругости земляного полотна M_r для глин J-CLAY/5/124, что дало полезную информацию для работ с приложениями для инженерной геологии.

Исследование, представленное в статье [20], было направлено на поиски возможностей объединения предыдущих достижений в области байе-

Таблица. Различные методы искусственного интеллекта и машинного обучения, используемые в геотехнике

Ссылка	Метод, алгоритм	Сфера применения	Основные показатели точности*				Результаты и преимущества
			СКО, кН	$(СКО)^2$, кН ²	САО, кН	R^2	
[17]	ИНС; НЛ; ЭАО; АННСВ; ДА**	Прогнозирование в геотехнических и экологических сферах	-	-	-	-	Улучшение прогнозирования в геотехнических вопросах, снижение глобальных воздействий на окружающую среду
[18]	ИНС	Осевая несущая способность буровых свай	12480	-	10586	0,87	Повышение точности прогнозирования для проектирования и строительства фундаментов
[19]	ИНС, оптимизированная методом поиска с запретами, или табу-поиска	Прогнозирование модуля упругости основания (земляного полотна)	-	1,404	0,965	0,875–0,892	Высокая точность прогнозирования модуля упругости основания (земляного полотна), улучшенная эффективность работы модели
[20]	Байесовский обратный анализ	Описание (характеризация) площадки	-	-	-	-	Эффективный подход к определению функций вероятности для параметров дисперсных и скальных грунтов
[21]	ИНС; Монте-Карло с отсеиванием; «случайный лес»	Выборочные геотехнические исследования (взятие образцов, испытания)	-	-	-	-	Снижение вычислительных затрат, эффективность выборочных геотехнических исследований (взятия образцов, испытаний)
[22]	«Случайный лес»; глубокое обучение	Оценка свойств грунтов (по данным статического зондирования методом СРТ)	-	-	-	0,65–0,75 для сопротивления под конусом; 0,14–0,75 для сопротивления по боковой поверхности	Очень высокая эффективность использования метода «случайный лес» для оценки свойств грунтов

* СКО – средняя квадратическая ошибка; САО – средняя абсолютная ошибка; R^2 – коэффициент детерминации.

** ИНС – искусственная нейронная сеть (ANN – artificial neural network); НЛ – нечеткая логика (FL – Fuzzy Logic); ЭАО – эволюционный алгоритм обучения (GEP – Gene Expression Programming); АННСВ – адаптивная нейро-нечеткая система вывода (ANFIS – adaptive neuro-fuzzy inference system), то есть гибридная система, которая сочетает принципы нейронных сетей и нечеткой логики; ДА – дисперсионный анализ (ANOVA – Analysis of Variance) (следует еще раз отметить, что это статистический метод, который не является интеллектуальным алгоритмом обучения, но используется в машинном обучении для анализа различий между средними значениями двух или более выборок и оценки их статистической значимости. – Ред.).

совских методов при характеристике площадок и на создание базовой системы байесовского обратного оценивания/анализа (Bayesian inverse evaluation/analysis) для непосредственной оценки фактической изменчивости. Эта система связывает распределение и степень природной изменчивости грунтов основания, статистическую непредсказуемость, погрешности измерений и неопределенность, присущую формулам/моделям преобразований, в процессе описания площадки на различных этапах инженерных изысканий. Такая работа с данными упрощает вывод функций распределения вероятностей для случайных величин характеристик дисперсных и скальных грунтов, что дает более эффективный метод, необходимый

для описания площадок с теми или иными инженерно-геологическими условиями.

В обзоре [21] описывается гибридный подход к работе с инженерно-геологическими данными, сочетающий метод аддитивной выборки и метод последовательной выборки (hybrid adaptive sequential sampling approach). Он включает использование ИНС, метод Монте-Карло с отсеиванием (Monte Carlo dropout) и алгоритм «случайный лес» (Random Forest). Искусственные нейронные сети хорошо подходят для решения задач с множественными выходными данными, тогда как метод Монте-Карло с отсеиванием позволяет эффективно прогнозировать неопределенности для неизученных участков. Алгоритм «случайный лес» позволяет оце-

нивать относительную значимость данных для их классификации и снижает риск переобучения (за счет использования ансамбля деревьев решений, построенных на различных подвыборках данных. – Ред.). Данный подход показал свою эффективность применения в инженерной геологии благодаря снижению вычислительных затрат и расширению возможностей выборочных инженерно-геологических исследований (взятия образцов, испытаний).

Одним из наиболее популярных методов исследований грунтов и оценки их физических свойств является статическое зондирование – испытания грунтов на внедрение конусного зонда/пенетрометра (Cone Penetration Tests, CPT). При исследовании, представленном в докладе [22], сравнивалась эффективность

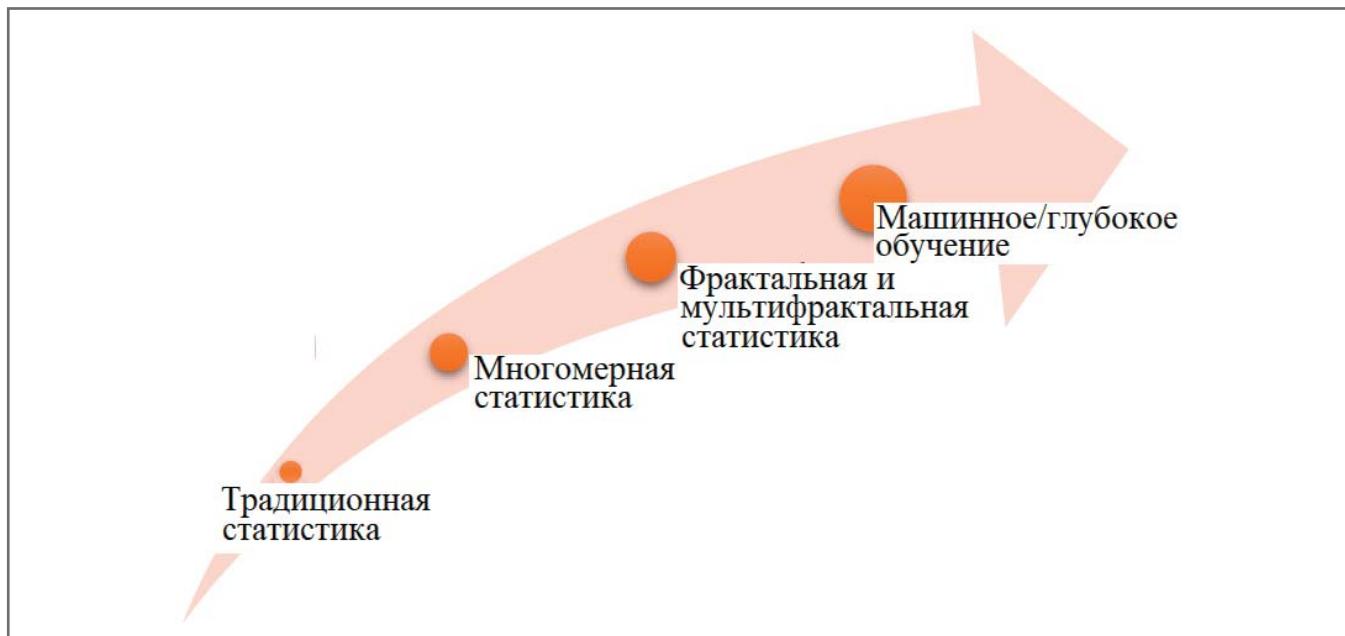


Рис. 2. Различные методы предварительной обработки инженерно-геологических данных

таких алгоритмов машинного обучения, как «случайный лес» и глубокое обучение, на основе данных СРТ для прогнозирования сопротивлений грунта под конусом и по боковой поверхности зонда. Метод использования алгоритма «случайный лес» для регрессионного анализа (random forest regression technique) превзошел глубокие нейронные сети по эффективности прогнозирования, дав коэффициенты детерминации R^2 в диапазонах 0,65–0,68 для сопротивления под конусом и 0,14–0,75 для сопротивления по боковой поверхности. На практике это дало такие преимущества, как сбор проектных параметров на основе более простых испытаний, снижение стоимости проекта, повышение качества и эффективности испытаний методом СРТ, а также помочь в выборе геотехнического проекта. В таблице со-поставлены различные методы искусственного интеллекта и машинного обучения, применяемые в геотехнике.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОПИСАНИЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИТИКИ ДАННЫХ ►

На сохранение водных ресурсов и устойчивость окружающей среды может повлиять ухудшение состояния почв в результате ведения сельского хозяйства в засушливых районах, где в основном используются химические удобрения [23]. С использованием геоинформационной системы, полевых и лабораторных изысканий были исследованы

почвы сельскохозяйственных угодий, чтобы определить степень их ухудшения. Было выделено три категории деградации почв: слабая, средняя и сильная. Кроме того, были определены состояния недеградированной и слабодеградированной почвы. Причинами слабой деградации являются изменения гранулометрического состава, общей пористости и водопроницаемости [24]. Для предотвращения ухудшения состояния почв использовались карты потенциала деградации для участков с высоким риском. В местах, где уже наблюдается ухудшение состояния почв, было рекомендовано применять меры по их охране и восстановлению. Деградированные почвы также могут быть улучшены за счет внесения в них органических веществ, что повысит их стабильность и водоудерживающую способность [25].

При исследовании, рассмотренном в работе [26], была разработана много-критериальная методика для управления доступностью ресурсов подземных вод в бассейне долины Арген (Argen) в Марокко. С помощью геоинформационной системы были созданы тематические карты, отображавшие гидродинамическое функционирование и геометрию водоносных горизонтов. Для картирования и классификации районов долины по потенциальным запасам подземных вод использовалось одиннадцать гидрологических, топографических и геологических переменных. Согласно статье [27] на 17% площади бассейна расположены зоны с высокими потенциальными запасами, на

64% – со средними, на 18% – с низкими. Для валидации карты потенциальных запасов подземных вод были использованы наборы данных для 159 буровых скважин [28].

Геологические риски представляют серьезные проблемы для экологии и человеческого общества, так как они вызваны геодинамической активностью или изменениями в окружающей среде. Технологии анализа геологических опасностей значительно продвинулись вперед благодаря расширению объемов данных дистанционного зондирования Земли и развитию методов глубокого обучения. Чтобы лучше понять применение глубокого обучения для оценки геологических опасностей, авторы работы [29] сосредоточились на таких типичных источниках данных, как системы мониторинга *in situ*, спутниковые платформы и беспилотные летательные аппараты.

На рисунке 2 в качестве примеров моделей глубокого обучения представлены сверточные (Convolutional Neural Networks, CNN) и рекуррентные (Recurrent Neural Networks, RNN) нейронные сети. Их применение для анализа геологических опасностей, потенциальные возможности и препятствия для дальнейших исследований в этом направлении рассмотрены в статье [30].

Для улучшения прогнозирования устойчивости склонов в работах [31–34] была предложена гибридная стратегия ансамблевого обучения методом стекинга (стекинг-ансамблирования). Среди 11 оптимизированных методов машинного

обучения при данном подходе использовался алгоритм искусственной пчелиной колонии (Artificial Bee Colony) для определения оптимальной комбинации базовых классификаторов и соответствующего мета-классификатора. Авторы работ [35–36] проводили обучение и тестирование с использованием конечнозадементного анализа. Благодаря указанной выше стратегии удалось значительно улучшить прогнозирование устойчивости склонов: показатель AUC (Area Under Curve – «площадь под кривой рабочих характеристик (ROC-кривой)») оказался на уровне 90,4%, что на 7% выше, чем у лучших из 11 оптимизированных методов машинного обучения [37]. Предложенный подход проде-

монстрировал заметно более хорошие результаты также и по сравнению с использованием стандартного ансамблевого классификатора. Еще для исследования значимости переменных, влияющих на устойчивость склонов, применялся метод линейной квантизации векторов признаков, или линейной векторной квантизации (Learning Vector Quantization, LVQ) [38–41].

ВЫВОДЫ ►

В данном обзоре хорошо продемонстрировано значительное влияние использования аналитики больших данных на инженерно-геологические изыскания. Эти исследования стали точными, эффективными и экологичными

благодаря переходу от старых эмпирических подходов к революционным методам, основанным на данных.

- Переход от традиционных эмпирических методов к технологиям, основанным на данных, повышает точность, эффективность и устойчивость.
- Искусственный интеллект и машинное обучение снижают неопределенности и повышают качество прогнозирования характеристик дисперсных и скальных грунтов.
- Интеграция аналитики больших данных в инженерно-геологические изыскания способствует внедрению устойчивых методов, согласующихся с международными усилиями по уменьшению воздействий на изменения климата. 

Источник для перевода ► (Source for the translation) ►

Vani V.D., Raj V.H., Dutt A., Raveendranath R., Tyagi L.K., Almusawi M., Yadav D.K. Digging deeper: the role of big data analytics in geotechnical investigations // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2024. Vol. 529 Proceedings of the 3rd International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering (ICS-MEE), 2024, Mangalam College of Engineering, Kottayam, Kerala, India. Article 04012. DOI:10.1051/e3sconf/202452904012.

Список литературы, использованной авторами переведенной статьи ► (References used by the authors of the translated paper) ►

1. Wang Y., Zhang W., Qi X., Ching J. Data analytics in geotechnical and geological engineering // Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards. 2022. Vol. 16. № 1. Article 1-1.
2. Jayahari L., Nagachary K., Saxena K.K., Seenippan K., Rana R.S. Mechanical characterisation and study of nickel based super alloy 718 at subzero temperatures // Advances in Materials and Processing Technologies. 2022. Vol. 8. № 2. P. 549–563.
3. Liu D., Liu H., Wu Y., Zhang W., Wang Y., Santosh M. Characterization of geo-material parameters: gene concept and big data approach in geotechnical engineering // Geosystems and Geoenvironment. 2022. Vol. 1. № 1. Article 100003.
4. Indira D. N. V. S. L. S., Ganiya R.K., Babu P.A., Xavier A.J., Kavisankar L., Hemalatha S., Senthilkumar V., Kavitha T., Rajaram A., Annam K., Yeshtila A. Improved artificial neural network with state order dataset estimation for brain cancer cell diagnosis. BioMed Research International. Hindawi, 2022. Vol. 2022. Article 7799812. <https://doi.org/10.1155/2022/7799812>.
5. You M., Hong Z., Tan F., Wen H., Zhang Z., Lv J. Stratigraphic identification using real-time drilling data // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2024. Vol. 16. № 9. P. 3452–3464.
6. Bhukya M.N., Kota V.R., Depuru S.R. A simple, efficient, and novel standalone photovoltaic inverter configuration with reduced harmonic distortion // IEEE access. 2019. Vol. 7. P. 43831–43845.
7. Salmi E.F., Phan T., Sellers E.J., Stacey T.R. A review on the geotechnical design and optimisation of ultra-long ore passes for deep mass mining // Environmental Earth Sciences. 2024. Vol. 83. № 10. P. 1–36.
8. Djogo M., Vasic M., Despotovic I., Mihajlovic S. Geological and geotechnical aspects of the most significant deep landslides in the Danube area on the territory of Vojvodina // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. № 9. Article 3622.
9. Naresh M., Munaswamy P. Smart agriculture system using IoT technology // International journal of recent technology and engineering. 2019. Vol. 7. № 5. P. 98–102.
10. Abbaszadeh Shahri A., Shan C., Larsson S., Johansson F. Normalizing large scale sensor-based MWD data: an automated method toward a unified database // Sensors. 2024. Vol. 24. № 4. Article 1209.
11. Gharieb A., Gabry M.A., Elsawy M., Edries T., Mahmoud W., Algarhy A., Darraj N. In-house integrated big data management platform for exploration and production operations digitalization: from data gathering to generative AI through machine learning implementation using cost-effective open-source technologies – experienced mature work // SPE Conference at Oman Petroleum & Energy Show, Muscat, Oman, April 2024. Paper SPE-218560-MS. <https://doi.org/10.2118/218560-MS>.

12. Ramprasad P., Basavapoornima C., Depuru S.R., Jayasankar C.K. Spectral investigations of Nd³⁺:Ba(PO₃)₂+La₂O₃ glasses for infrared laser gain media applications // Optical Materials. 2022. Vol. 129. Article 112482.
13. Dada M.A., Oliha J.S., Majemite M.T., Obaigbena A., Biu P.W. A review of predictive analytics in the exploration and management of US geological resources // Engineering Science & Technology Journal. 2024. Vol. 5. № 2. P. 313–337.
14. Goud J.S., Srilatha P., John K., Kumar R.V., Kumar K.T., Khan U., Raizah Z., Gill H.S., Galal A.M. Role of ternary hybrid nanofluid in the thermal distribution of a dovetail fin with the internal generation of heat // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. Vol. 35. Article 102113.
15. Li X., Zhao S., Shen Y., Xue Y., Li T., Zhu H. Big data-driven TBM tunnel intelligent construction system with automated-compliance-checking (ACC) optimization // Expert Systems with Applications. 2024. Vol. 244. Article 122972.
16. Yue L., Jayapal M., Cheng X., Zhang T., Chen J., Ma X., Dai X., Lu H., Guan R., Zhang W.-H. Highly dispersed ultra-small nano Sn-SnSb nanoparticles anchored on N-doped graphene sheets as high performance anode for sodium ion batteries // Applied Surface Science. 2020. Vol. 512. Article 145686.
17. IFCEE 2024: Drilled and Driven Foundations and Innovative and Emerging Approaches for Foundation Engineering / edited by D.M. Moug. American Society of Civil Engineers, 2024.
18. Girish K.M., Naik R., Prashantha S.C., Nagabhushana H., Nagaswarupa H.P., Raju K.S.A., Premkumar H.B., Sharma S.C., Nagabhushana B.M. Zn₂TiO₄:Eu³⁺ nanophosphor: self explosive route and its near UV excited photoluminescence properties for WLEDs // Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2015. Vol. 138. P. 857–865.
19. Goldstein D., Aldrich C., O'Connor L. A Review of Orebody Knowledge Enhancement using Machine Learning on Open Pit Mine Measure-While-Drilling Data // MAKE. MDPI, 2024. Vol. 6. № 2. P. 1343–1360.
20. Fernandez A., Segarra P., Sanchidrián J.A., Navarro R. Ore/waste identification in underground mining through geochemical calibration of drilling data using machine learning techniques // Ore Geology Reviews. 2024. Vol. 168. Article 106045.
21. Damodharan D., Rajesh Kumar B., Gopal K., De Poures M.V., Sethuramasamyraja, B. Utilization of waste plastic oil in diesel engines: a review // Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 2019. Vol. 18. № 4. P. 681–697.
22. Leung A.Y., Phoon K.K., Xiao T., Shuku T., Ching J. Report for ISSMGE TC309/TC304/TC222 and ASCE Geo-Institute Risk Assessment and Management Committee Fourth Machine Learning in Geotechnics Dialogue on “Machine Learning Supremacy Projects”, 5 December 2023, Okayama Convention Center, Okayama, Japan // Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards. 2024. Vol. 18. № 1. P. 304–313. <https://doi.org/10.1080/17499518.2024.2316879>.
23. He B., Armaghani D.J., Lai S.H., He X., Asteris P.G., Sheng D. A deep dive into tunnel blasting studies between 2000 and 2023 – a systematic review // Tunnelling and Underground Space Technology. 2024. Vol. 147. Article 105727.
24. Girish K.M., Prashantha S.C., Nagabhushana H., Ravikumar C.R., Nagaswarupa H.P., Naik R., Premakumar H.B., Umesh B. Multi-functional Zn₂TiO₄:Sm³⁺ nanopowders: excellent performance as an electrochemical sensor and an UV photocatalyst // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. 2018. Vol. 3. № 2. P. 151–160.
25. Kelly R. A view on the state of practice in transportation geotechnics in Australia // Transportation Geotechnics. 2024. Vol. 46. Article 101259.
26. Recent Research on Geotechnical Engineering, Remote Sensing, Geophysics and Earthquake Seismology // Proceedings of the 2nd MedGU, Marrakesh, 2022 (edited by A. Ciner et al.). Vol. 3.
27. Naik R., Chandra P.S., Bhushana N., Sharma Sh., Nagaswarupa H.P., Anantharaju K.S., Jnaneshwara D.M., Girish K.M. Tunable white light emissive Mg₂SiO₄:Dy³⁺ nanophosphor: its photoluminescence, Judd-Ofelt and photocatalytic studies // Dyes and Pigments. 2015. Vol. 127.
28. Maslakowski M., Lejzerowicz A., Pacanowski G., Kuszyk R.B. The use of non-invasive ERT method to diagnose karst in roadengineering in the Lublin Upland (Poland) // Archives of Civil Engineering. 2024. Vol. 70. № 1.
29. Sundaram R., Gupta S., Gupta S. Advances in the state-of-practice of geotechnical investigation in India // Indian Geotechnical Journal. 2024. Vol. 54. № 1. P. 109–133.
30. Rathod V.P., Tanveer S. Pulsatile flow of couple stress fluid through a porous medium with periodic body acceleration and magnetic field // The Bulletin of the Malaysian Mathematical Society. Series 2. 2009. Vol. 32. № 2. P. 245–259.
31. Alao J.O., Lawal K.M., Dewu B.B.M., Raimi J. The evolving roles of geophysical test sites in engineering, science and technology // Acta Geophysica. 2024. Vol. 72. № 1. P. 161–176.
32. Jisha P.K., Prashantha S.C., Nagabhushana H. Luminescent properties of Tb doped gadolinium aluminate nanophosphors for display and forensic applications // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. 2017. Vol. 2. № 4. P. 437–444.
33. Alrobei H., Prashanth M.K., Manjunatha C.R., Kumar C.P., Chitrabhanu C.P., Shivaramu P.D., Raghu M.S. Adsorption of anionic dye on eco-friendly synthesised reduced graphene oxide anchored with lanthanum aluminate: Isotherms, kinetics and statistical error analysis // Ceramics International. 2021. Vol. 47. № 7. P. 10322–10331.

34. Kulandaivel D., Rahamathullah I.G., Sathyagnanam A.P., Gopal K., Damodharan D. Effect of retarded injection timing and EGR on performance, combustion and emission characteristics of a CRDi diesel engine fueled with WHDPE oil/diesel blends // Fuel. 2020. Vol. 278. Article 118304.
35. Hora S.K., Poongodan R., De Prado R.P., Wozniak M., Divakarachari P.B. Long short-term memory network-based metaheuristic for effective electric energy consumption prediction // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. № 23. Article 11263.
36. Raj T.V., Hoskeri P.A., Muralidhara H.B., Manjunatha C.R., Kumar K.Y., Raghu M.S. Facile synthesis of perovskite lanthanum aluminate and its green reduced graphene oxide composite for high performance supercapacitors // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2020. Vol. 858. Article 113830.
37. Jaidass N., Moorthi C.K., Babu A.M., Babu M.R. Luminescence properties of Dy³⁺ doped lithium zinc borosilicate glasses for photonic applications // Heliyon. 2018. Vol. 4. № 3. Article e00555.
38. Lakshmi L., Reddy M.P., Santhaiah C., Reddy U.J. Smart phishing detection in web pages using supervised deep learning classification and optimization technique ADAM // Wireless Personal Communications. 2021. Vol. 118. № 4. P. 3549–3564.
39. Spandana K., Rao V.S. Internet of Things (Iot) based smart water quality monitoring system // International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7. № 3. P. 259–262.
40. Kumar K.U., Babu P., Basavapoornima C., Praveena R., Rani D.S., Jayasankar C.K. Spectroscopic properties of Nd³⁺-doped boro-bismuth glasses for laser applications // Physica B: Condensed Matter. 2022. Vol. 646. Article 414327.
41. Cong Y., Inazumi S. Integration of smart city technologies with advanced predictive analytics for geotechnical investigations // Smart Cities. 2024. Vol. 7. № 3. P. 1089–1108.

ГеоИнфо

Независимый электронный журнал

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



WWW.GEOINFO.RU



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

ОПЕРАТИВНАЯ КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПРОВОДНЫХ ДАТЧИКОВ И УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Принята к публикации 29.09.2025

Опубликована 25.11.2025

КШИРСАГАР П.Р.

Факультет искусственного интеллекта Инженерного колледжа имени Г.Х. Райсони, г. Нагпур, Индия
pravinrkr88@yahoo.com

МАНОХАРАН Х.

Факультет электроники и техники связи Технологического института «Панималар», адм. округ Пунамалли, г. Ченнаи, Индия

КАСИМ С.

Кафедра электротехники и вычислительной техники инженерного факультета Университета Короля Абдулазиза, г. Джидда, Саудовская Аравия

КХАН А.И.

Кафедра компьютерных наук факультета вычислительной техники и информационных технологий Университета короля Абдулазиза, г. Джидда, Саудовская Аравия

АЛАМ М.М.

Кафедра электротехники и вычислительной техники инженерного факультета Университета Короля Абдулазиза, г. Джидда, Саудовская Аравия

АБУШАРК Ю.Б.

Кафедра компьютерных наук факультета вычислительной техники и информационных технологий Университета короля Абдулазиза, г. Джидда, Саудовская Аравия

АБЕРА В.

Факультет пищевой инженерии Инженерно-технологического колледжа Университета Уольките, г. Уольките, Эфиопия
worku.abera@wku.edu.et

АННОТАЦИЯ

Предлагаем вниманию читателей немного сокращенный адаптированный перевод статьи исследователей из Индии и Саудовской Аравии «Оперативная количественная оценка показателей оползневой опасности с использованием беспроводных датчиков и управления данными на основе искусственного интеллекта». Эта работа была опубликована в рецензируемом журнале *Computational Intelligence and Neuroscience* («Вычислительный интеллект и нейронаука») издательством Hindawi по лицензии CC BY 4.0. Данная лицензия позволяет копировать и распространять статью на любом носителе и в любом формате, адаптировать, видоизменять и создавать новое, опираясь на нее, в любых целях, включая коммерческие, при указании ссылки на первоисточник. В данном случае полная ссылка на первоисточник приведена в конце перевода.

Возможности беспроводных сенсорных сетей позволили разработать крупномасштабные системы внутреннего мониторинга. Датчики могут играть большую роль в прогнозировании оползней: в составе беспроводной локальной сети они могут эффективно работать для картирования, выявления, анализа и прогнозирования оползневых процессов и явлений в удаленных районах и т.д. Беспроводная сенсорная сеть (БСС) состоит из автономных датчиков, распределенных в пространстве для мониторинга физических и других параметров окружающей среды, таких как температура, звук, давление и др. Соответствующий сервис дистанционного управления включает в себя систему мониторинга с получением расширенной информации и помогает пользователю понять проблему и сфокусироваться на ней, если работа БСС говорит о возможности катастрофического события и может в перспективе отследить его.

В данной публикации показана эффективность применения беспроводных сенсорных сетей и алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ), в частности логистической регрессии, для мониторинга оползней в реальном времени. БСС выполняет наблюдение за факторами, вызывающими оползни, такими как количество атмосферных осадков, влажность грунта, поровое давление воды и смещения, в режиме реального времени. В статье рассматриваются проблемы, связанные с отслеживанием поведения склонов, а также результаты анализа данных, позволяющие их решать. Использование БСС и ИИ дает возможность мониторинга развития быстрых оползней в режиме реального времени. Предложенная система продемонстрировала выполнение мониторинга оползней в реальном времени, необходимое для своевременного информирования людей об опасных ситуациях через систему оповещения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

оползни; оползневая опасность; оперативный мониторинг оползней; прогнозирование оползней; беспроводные датчики; беспроводная сенсорная сеть; искусственный интеллект; машинное обучение; логистическая регрессия; метод опорных векторов; стохастический градиентный спуск.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Кширсагар П.Р., Манохаран Х., Касим С., Кхан А.И., Аlam М.М., Абушарк Ю.Б., Абера В. Оперативная количественная оценка оползневой опасности с использованием беспроводных датчиков и управления данными на основе искусственного интеллекта (сокр. пер. с англ.) // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 3. С. 54–67. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-54-67.

EXPEDITE QUANTIFICATION OF LANDSLIDES USING WIRELESS SENSORS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR DATA CONTROLLING PRACTICES

Accepted for publication 29.09.2025

Published 25.11.2025

KSHIRSAGAR P.R.

Department of Artificial Intelligence, G.H Raisoni College of Engineering, Nagpur, India
pravinrk88@yahoo.com

MANOHARAN H.

Department of Electronics and Communication Engineering, Panimalar Institute of Technology, Poonamallee, Chennai, India

KASIM S.

Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

KHAN A.I.

Computer Science Department, Faculty of Computing and Information Technology, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

ALAM M.M.

Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

ABUSHARK Y.B.

Computer Science Department, Faculty of Computing and Information Technology, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

ABERA W.

Department of Food Process Engineering, College of Engineering and Technology, Wolkite University, Wolkite, Ethiopia
worku.abera@wku.edu.et

ABSTRACT

We present to the readers a slightly abridged and adapted translation of the article "Expedite quantification of landslides using wireless sensors and artificial intelligence for data controlling practices" by Indian and Saudi Arabian researchers. This work was published in the peer-reviewed journal "Computational Intelligence and Neuroscience" by the Hindawi Publishing Corporation under the CC BY 4.0 license. This license permits copying and distributing the article in any medium and format, adapting, modifying, and creating new works based on it for any purpose, including commercial use, provided that the original source is referenced. In our case, the full reference to the original source is provided at the end of the translation.

The power of wireless network sensor technologies has enabled the development of large-scale in-house monitoring systems. The sensor may play a big part in landslide forecasting where the sensor linked to the WLAN protocol can usefully map, detect, analyze, and predict landslide distant areas, etc. A wireless sensor network (WSN) comprises autonomous sensors geographically dispersed for monitoring physical or environmental variables, comprising temperature, sound, pressure, etc. This remote management service contains a monitoring system with more information and helps the user grasp the problem and work hard when WSN is a catastrophic event tracking prospect.

This paper illustrates the effectiveness of Wireless Sensor Networks and artificial intelligence (AI) algorithms (i.e., Logistic Regression) for landslide monitoring in real-time. The WSN system monitors landslide causative factors such as precipitation, Earth moisture, pore-water-pressure, and motion in real-time. The problems associated with land life surveillance and the context generated by data are given to address these issues. The WSN and AI give the option of monitoring fast landslides in real-time conditions. A proposed system in this paper shows real-time monitoring of landslides to preternaturally inform people through an alerting system to risky situations.

KEYWORDS:

landslides; landslide hazard; operational landslide monitoring; landslide prediction; wireless sensors; wireless sensor network; artificial intelligence; machine learning; logistic regression; support vector machine; stochastic gradient descent.

FOR CITATION:

Kshirsagar P.R., Manoharan H., Kasim S., Khan A.I., Alam M.M., Abushark Y.B., Abera W. Operativnaya kolichestvennaya osnenka pokazatelei opolznevoi opasnosti s ispol'zovaniem besprovodnykh datchikov i upravleniya dannymi na osnove iskusstvennogo intellekta (sokr. per. s angl.) [Expedite quantification of landslides using wireless sensors and artificial intelligence for data controlling practices (abridged translation from English into Russian)]// Geoinfo. 2025. T. 7. № 3. S. 54-67. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-54-67.

ВВЕДЕНИЕ ►

Каждый год почти в каждом регионе происходят сотни оползней. Они случаются все чаще под действием многочисленных факторов, таких как изменения климата, деятельность человека и особенности рельефа [1]. Такие события обычно случаются во время сильных дождей, когда изменяются уровни подземных вод. В редких случаях оползни сходят неожиданно, когда никто не предвидел этого. Для отслеживания изменений незначительных элементов с целью прогнозирования и своевременного выявления оползней необходим постоянный мониторинг.

Оползни со склонов могут представлять угрозу для расположенных поблизости зданий и сооружений [2]. Основная цель мониторинга оползней – защита людей и этих строительных объектов. При существующих технологиях модель может охватить огромную территорию, на которой возможны оползни. Но систему мониторинга невозможно развернуть во всех опасных местах, чтобы полностью защитить жителей и зоны движения транспорта [3]. В дополнение к получению информации для разработки мер по улучшению характеристик грунтовых массивов, слагающих склоны, еще одной целью мониторинга является своевременное и точное выявление оползней.

Одним из наиболее эффективных инструментов для оперативного оповещения о природных или техногенных бед-

стваиях является искусственный интеллект (ИИ). И здесь критически важно использование беспроводных сенсорных сетей (БСС), в том числе и для своевременного оказания медицинской помощи в условиях таких катастроф, как оползни. БСС могут работать крупномасштабно с обеспечением масштабируемости, гибкости, минимального технического обслуживания и т.д. [2, 3]. Несмотря на такие ограничения, как небольшой объем памяти, низкие мощность и пропускная способность, беспроводные сенсорные сети все равно являются одними из лучших систем мониторинга в режиме реального времени, поскольку могут работать в опасных условиях и характеризуются низкими требованиями к техническому обслуживанию.

За последние два десятилетия многие системы ИИ широко использовались в том числе для сейсмического анализа. Основные преимущества подходов на основе искусственного интеллекта заключаются в обеспечении точности количественных оценок и повторяемости результатов, в способности анализировать влияние различных факторов и возможности постоянного усовершенствования [4].

БСС можно рассматривать как систему для прогноза состояния грунтовой среды. Предлагаемая модель мониторинга оползней с использованием ИИ представлена на рисунке 1. На нем показана интеграция множества датчиков, беспроводных узлов, серверов, шлюзов и ин-

струментов прогнозирования с помощью искусственного интеллекта [5]. Эта система интегрирована в структуру склона, предрасположенного к оползням, для постоянного мониторинга параметров, влияющих на оползнеобразование, с помощью инклинометров, диэлектрических датчиков влажности, геофонов, тензометров и пьезометров [6]. Стrатегически продуманное размещение беспроводных узлов в грунтовом массиве позволяет создать единую беспроводную ячейстую сеть для передачи информации с датчиков на компьютер через промежуточные беспроводные узлы.

БЕСПРОВОДНАЯ СЕНСОРНАЯ СЕТЬ ►

Для мониторинга, проверки, хранения и отображения данных, полученных через беспроводные узлы, связанные с множеством датчиков, а также для отправки местным органам власти и населению аудиовизуальных оповещений, SMS-сообщений и предупреждений по электронной почте о возможном сходе оползней используются алгоритмы прогнозирования этих событий на основе искусственного интеллекта.

Источник питания беспроводных узлов пополняется с помощью солнечной панели, заложенной в конструкцию системы [7, 8].

Обзор литературы ►

Джорджетти и др. [1] использовали сети геологических датчиков и датчиков

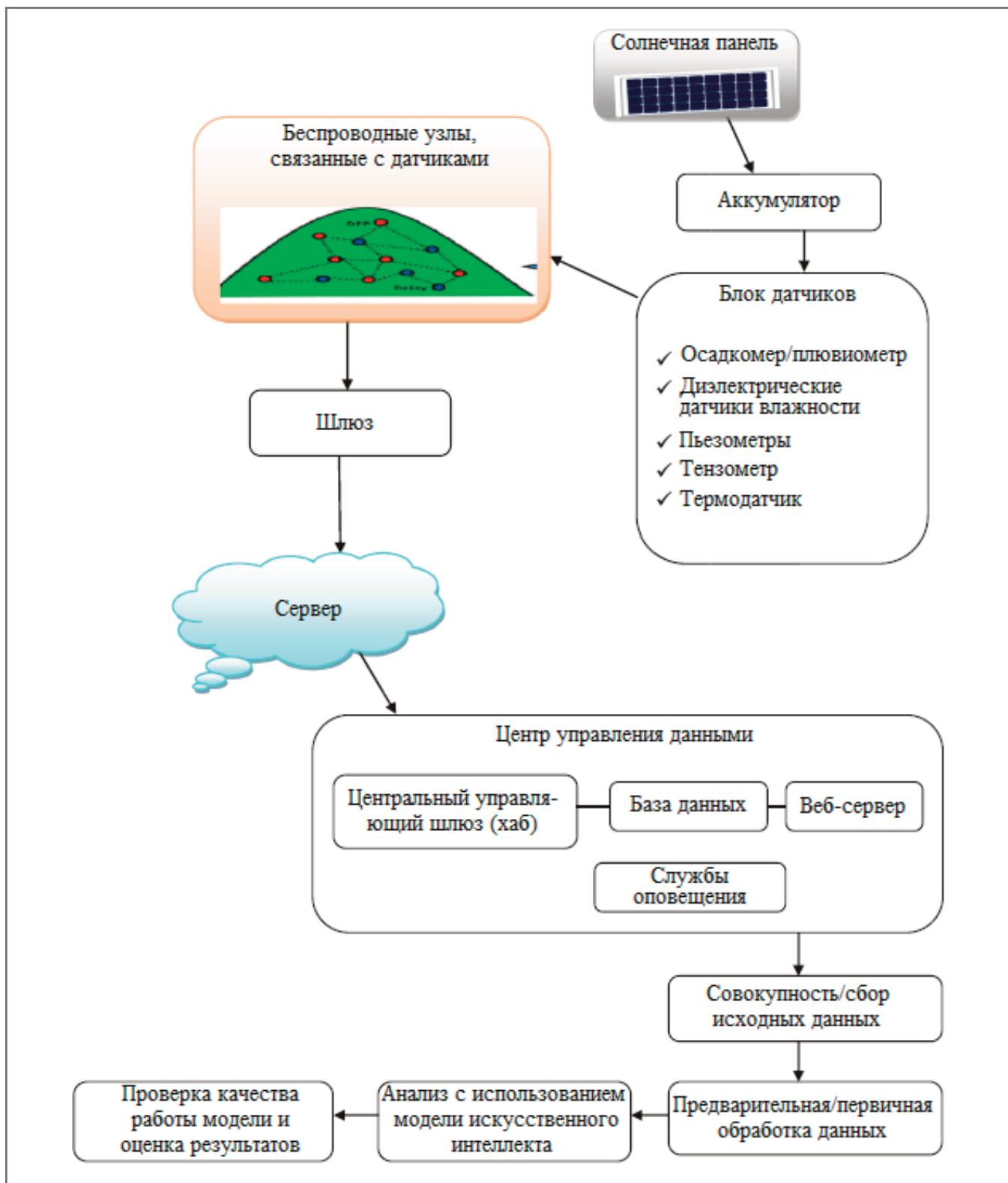


Рис. 1. Мониторинг оползней с использованием беспроводных датчиков и искусственного интеллекта

движения. Всякий раз, когда значение параметра, полученное узлом, превышало заданный порог, соответствующая информация передавалась в удаленный центр. Активировались датчики движения. Можно устанавливать колонны датчиков под землей – в специально пробуренных вертикальных скважинах глубиной, например, 30 м. Точность измерений

порового давления и смещений грунта на разной глубине можно повысить без использования камер благодаря большому количеству интеллектуальных устройств.

Канунго и др. [3] обсудили установку специального телескопа для мониторинга оползня Пакхи в Гархвальских/Западных Гималаях в Индии в режиме реального времени. Цель заключалась в вы-

явлении механики движения этого опасного оползня. Такой метод является дорогостоящим и нецелесообразным. Однако можно установить пороговое количество атмосферных осадков и при его превышении отправлять соответствующую информацию через систему оповещения (на основе данных, полученных от автоматических метеостанций).

Сурьяванши и Дешпанде [4] использовали различные виды датчиков. В том числе они рассмотрели подходы к созданию беспроводных сенсорных сетей для непрерывного мониторинга оползневых рисков в опасных местах. Их исследование включало применение множества сетевых интерфейсов для передачи данных с помощью технологий беспроводной связи ZigBee, WI-FI в удаленные аналитические центры. В некоторые системы также был встроен модуль GSM для передачи тревожных оповещений по мобильной связи жителям близлежащих районов.

Вэй Чэнь и др. [5] рассказали о последних оползневых событиях, последствия которых становились все более серьезными, а различные исследования по борьбе с ними и защите от них стали привлекать все больше внимания. Одной из основных тем исследований стала возможность прогнозирования предрасположенности территории к оползням в зависимости от уровней грунтовых вод, что может быть использовано для планирования и проектирования в сферах землеустройства и градостроительства в холмистых районах.

Сюйдун [7] исследовал возможность использования такого ансамблевого метода машинного обучения, как стекинг. При этом в качестве базовых методов обучения были выбраны: метод опорных векторов, искусственная нейронная сеть, логистическая регрессия и наивный байесовский классификатор. Для оценки уровней их значимости совместно применялись метод повторной выборки и корреляционный анализ по Пирсону.

Ван Хоа и Такаяма [8] описали беспроводную сенсорную сеть для обнаружения катастроф в удаленных районах. Конструкция этой системы включала три компонента: локальную систему узлов, облачную систему и центральную систему (систему управления). Была разработана подходящая программа управления, в которой центральная система распределяла несколько типов данных (данные узлов, локальной системы узлов и др.) по группам для мониторинга состояния поля (текущего состояния территории) и состояния удаленных узлов. Центральная система и облачная система могли управляться с использованием аналогичных наборов данных.

В работе [9] рассматриваются следующие из наиболее распространенных типов оползней. *Ротационные/вращательные оползни* имеют поверхность скольжения выпуклой формы, то есть

в виде обратной стороны ложки, и движутся более или менее вращательно (вокруг горизонтальной оси. – Ред.). *Трансляционные/поступательные оползни* характеризуются перемещением основной массы дисперсных и скальных грунтов вперед/наружу или вниз и вперед/наружу (часто по плоской или слегка наклонной поверхности скольжения. – Ред.) с минимальным присутствием вращения или обратного наклона. В последних двух случаях может происходить опрокидывание (topple) – когда отдельный фрагмент скального грунта отделяется, отклоняется или движется вперед, вращаясь, падая, отскакивая или катясь вниз по склону. При мониторинге территории беспроводной сенсорный узел преобразует аналоговые данные, поступившие от датчика, в количественную информацию, необходимую для того, чтобы машина могла их воспринимать. Кроме того, эти данные передаются на шлюз. Микропроцессор беспроводной сенсорной сети, основанной на поправке IEEE 802.15.4e к стандарту IEEE 802.15.4, включает беспроводной приемопередатчик, источник питания, модуль энергосбережения и микроконтроллер, осуществляющий сбор аналоговых сигналов, поступающих от датчиков [10]. Программное обеспечение, встроенное в микросхему, обеспечивает возможность подключения сенсорных узлов к любому узлу, расположенному вблизи территории мониторинга, с использованием функций самоорганизации. Подключенное устройство анализирует полученную информацию и передает ее с использованием метода пошаговой/прыжковой передачи (hopping technique) на сенсорный узел и дальше [11]. Посредством многоступенчатой/многопрыжковой маршрутизации данные наблюдений передаются через ряд сетевых узлов и достигают шлюза.

Оползни – это очень сложные процессы и явления, на которые влияют несколько факторов, включая количество дождевых осадков, сейсмические события, погодные условия, динамику влажности, поровое давление, дренаж, подвижки склонов и др. В настоящее время для мониторинга оползней имеется множество технологий дистанционного зондирования с использованием спутниковых наблюдений [12]. Основным преимуществом таких подходов является то, что они позволяют обследовать огромные территории с высоким пространственным разрешением и возможностью трехмерного анализа. Методы дистанционного зондирования хорошо подхо-

дят для картирования уязвимостей, рисков и последствий катастроф. Но они имеют такое ограничение, как отсутствие возможностей для полноценного мониторинга в режиме реального времени, поскольку это требует долгосрочных повторных наблюдений со спутников [1, 13]. Для отслеживания огромных объемов подповерхностной среды применяются неинвазивные геофизические исследования с использованием сейсмических, электромагнитных, георадиолокационных/георадарных, электротомографических и многих других методов. Однако эти методы являются косвенными и приводят к неоднозначным выводам, что ограничивает их использование для достоверных оповещений [14].

Проведение мониторинга оползней основано на использовании геотехнического оборудования – экстензометров, инклинометров, пьезометров и др., позволяющих проводить точные измерения. Но такие измерения ограничиваются небольшими участками, на которых установлено то или иное устройство. Системы, основанные на применении подобных инструментов, все же могут использоваться для наблюдений за оползнями, угрожающими важным линейным объектам инфраструктуры, но они имеют ограничение по охвату территории при региональном мониторинге. Применение этих методов является чрезвычайно сложным и дорогостоящим, требующим мощного и трудноуправляемого оборудования для работы в тяжелых условиях с максимальной эффективностью и только при специализированной эксплуатации. Поэтому в действительности их можно использовать в основном для дополнительных исследований в целях уточнения, детализации [15].

Обзор недавних публикаций ►

Авторы одной из недавних статей [16] разработали модель мониторинга путем поиска всех возможных способов обнаружения оползней с использованием различных подходов, таких как анализ изображений и оценка предрасположенности к оползням, преимущественно с прогнозированием потенциальных оползней дистанционно. Но выделение на изображениях нужной информации является сложной задачей, которую нельзя решить с помощью очечных процедур. Поэтому, следуя модели дистанционной съемки, авторы работы [17] интегрировали программное обеспечение для поиска и интерпретации всех неявных особенностей. Одна-

ко при таком типе выявления оползней получается больше ошибок, поэтому для повышения точности применяются программы, позволяющие обрабатывать описания на естественном языке и интегрированные с предварительно полученными знаниями о выявлении оползневых зон на основе наблюдавшихся данных. При расширении этой программной модели было проведено моделирование с помощью программы на языке Python [18] в целях выполнения анализа всех неглубоких оползней на конкретной территории, на которой в случае обильных дождей может произойти инициирование или активизация оползней. В качестве новой технологии также был предложен метод картирования, учитывающий определенные аспекты окружающей среды [19], что является достаточно приемлемой моделью с комплексной параметрической оценкой.

Недостаточно изученные вопросы и обоснование необходимости исследований ►

С другой стороны, экономически эффективной и широко применяемой моделью своевременного предупреждения об оползневой опасности на основе пороговых количеств дождевых осадков является система раннего оповещения. Однако такие предупреждения подвержены большому количеству ложных срабатываний и не дают хорошего решения либо из-за недостатка необходимой информации, либо из-за отсутствия детализированных данных о количестве дождевых осадков в пространстве и во времени. Оповещения об опасности на большой территории являются весьма общими и могут быть уточнены для применения в конкретном месте. Кроме того, необходимы данные наблюдений за осадками за много лет, чтобы их можно было сопоставить с реальными оползневыми событиями [16–21]. Пороговые количества осадков имеют широкий диапазон значений. Кроме того, мониторинг лишь одного важного параметра, связанного с оползнеобразованием, недостаточен для уверенного решения проблемы раннего предупреждения об оползнях.

Цели исследований ►

Главная цель заключается в разработке высокоточных методов измерений и беспроводной мультисенсорной сети для сбора значений различных параметров, включая поровое давление воды, влажность грунта, характеристики сейсмических колебаний и количество дож-

девых осадков, для формирования точных ранних предупреждений, привязанных к конкретным участкам. Для обеспечения достаточной достоверности, надежности и своевременности ранних оповещений был использован метод, основанный на данных. На основе много-параметрических данных применяются алгоритмы искусственного интеллекта с учетом следующих ограничений:

- 1) на основе измерений количества осадков и порового давления можно получить прогноз устойчивости склона только на ближайшие 24 часа;
- 2) чтобы спрогнозировать состояние склона на ближайшее время, нужны статистические данные на основе анализа прошлых событий.

Прогнозирование значений параметров склоновых процессов в режиме реального времени стало возможным благодаря алгоритмам искусственного интеллекта, которые позволяют создавать надежно функционирующие системы для работы в условиях чрезвычайных ситуаций, когда недоступны точные данные. Еще одним использованием ИИ для работы с данными, получаемыми от мультисенсорной системы, является то, что информация о состоянии склона, накопленная и проанализированная за несколько лет, может применяться в качестве виртуального датчика, тогда как реальные датчики могут быть перенесены в другие места в целях ведения там измерений для расширения базы данных.

По сравнению с данными реальной БСС, все ранние предупреждения за 24 часа до потери устойчивости склона, а также прогнозы в режиме реального времени, полученные с помощью ИИ, проходят валидацию.

ЦЕНТР УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ►

Рассматриваемый метод обеспечивает непрерывную передачу данных наблюдений от сенсорных узлов в центр управления данными (ЦУД). В состав ЦУД входят сервер базы данных и аналитический модуль, который анализирует информацию о состоянии грунта и выполняет моделирование для оценки вероятности возникновения оползня. Информация по сети передается в режиме реального времени вместе с результатами анализа данных. Для оповещения специалистов о риске схода оползней, состоянии сети и контроле компонентов системы добавляются службы оповещения, такие как электронная почта, служба коротких со-

общений (SMS) и служба мультимедийных сообщений (MMS) [12]. Использование широкополосной мобильной связи с пакетной передачей данных обеспечивает возможность загрузки информации в режиме реального времени непосредственно на веб-страницу. В системе в том числе ведется постоянный мониторинг оставшегося заряда аккумуляторов и скорости их зарядки от солнечных панелей. Также анализируются данные всех беспроводных и геологических датчиков для выявления неисправных узлов и сенсорных систем [13]. С помощью механизма обратной связи непрерывно изменяется частота опроса геофизических датчиков в зависимости от изменений погодных условий в режиме реального времени.

Данные беспроводной сенсорной сети обрабатываются в режиме реального времени Центром управления данными, расположенным на территории этой сети. При этом:

- 1) есть ограничения по интенсивности и длительности непрерывного выпадения осадков;
- 2) важным фактором является коэффициент устойчивости склона (factor of safety, F_{os});
- 3) регистрируются шумы и вибрации, вызванные работой датчиков движения.

Если объединить значения угла на склоне, показателей свойств грунта и порового давления в заданном месте увлажненного склона, то полученная функция будет отражать условия устойчивости склона и ее можно будет вычислить. Эту статистику (функцию результатов наблюдений) можно представить в виде безразмерной сетки [12, 13]. Коэффициент устойчивости, или коэффициент запаса устойчивости (F_{os}), в модели Айверсона (Iverson) определяется по следующей формуле:

$$F_{os} = F_g + F_j + F_d = 1, \quad (1)$$

где F_g – фактор уклона, F_j – гидрогеологический фактор, F_d – фактор сцепления грунта, определяемые по формулам:

$$F_g = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \beta}, \quad (2)$$

$$F_j = \frac{-PWP(S, t)\rho_j \operatorname{tg} \theta}{\rho_r S \sin \beta \cos \beta}, \quad (3)$$

$$F_d = \frac{d}{\rho_r S \sin \beta \cos \beta}, \quad (4)$$

где θ – угол внутреннего трения грунта;

β – угол наклона поверхности грунта; d – удельное сцепление грунта; ρ_r – удельный вес грунта, средневзвешенный по глубине; ρ_j – удельный вес грунтовых вод; $PWP(S, t)$ – функция порового давления воды, изменяющаяся во времени и пространстве и связанная с гидростатическим напором, которая является быстро корректирующим коэффициентом в уравнении (3).

Значения θ , d и ρ_r определяются с помощью полевых испытаний грунта, тогда как β и ρ_j являются константами. При увеличении порового давления (PWP) снижается эффективное напряжение и уменьшается прочность грунта [1].

Коэффициент устойчивости (F_{os}) определяет вероятность разрушения склона и представляет собой отношение суммарных сдвигающих вниз по склону сил (включая силу тяжести) к суммарным удерживающим силам (включая сопротивление поровому давлению). В идеальном случае, если это отношение равно единице, то указанные силы находятся в равновесии.

Ограничения ►

Если коэффициент устойчивости превышает единицу ($F_{os} > 1$), то суммарное сопротивление грунта превышает сдвигающие силы, включая силу тяжести. Следовательно, склон на соответствующей глубине устойчив. При увеличении порового давления (PWP) уменьшается эффективное напряжение и, как следствие, сопротивление грунта сдвигу.

Если коэффициент устойчивости меньше единицы ($F_{os} < 1$), то склон на соответствующей глубине более подвержен разрушению.

При расчете глубины возможного сдвига на каждом склонном к разрушению участке в использовавшейся в представленном исследовании системе раннего предупреждения об оползнях применялись значения порового давления по показаниям пьезометров, установленных в этих конкретных местах, для расчета коэффициентов устойчивости в соответствующих точках на разной глубине. Система может непрерывно вести сбор таких данных в режиме реального времени и в этом же режиме анализировать изменения величин F_{os} в различных поровых зонах [14]. Коэффициент устойчивости отражает вероятность скорого схода оползня. Для оценки общей устойчивости всего склона часто используются кумулятивные значения F_{os} , полученные для нескольких его участков.

Датчики для выявления оползней. Параметрическая модель ►

Основная цель данной работы заключалась в определении типов датчиков, необходимых для мониторинга и выявления оползней. Правильный выбор геотехнических датчиков требует глубокого понимания природы и характеристик оползневых процессов и явлений, а также гидрологических и гидро-геологических условий их распределения. В оползнеопасных регионах индуцированные оползни часто случаются после очень интенсивных дождей или продолжительных дождей средней интенсивности. При обильных осадках инфильтрация воды в грунт, слагающий склон, приводит к снижению коэффициента запаса устойчивости, к изменениям поровых (в том числе капиллярных) давлений и уровней подземных вод, уменьшению удельного сцепления грунта, увеличению веса грунта и снижению угла естественного откоса (угла устойчивого равновесия) [10–12]. Эти процессы активизируются, когда интенсивность осадков превышает способность уже водонасыщенного грунта пропускать воду. Наиболее важными характеристиками, подлежащими мониторингу для своевременного раннего предупреждения об оползнях, являются: изменения влажности грунта и порового давления в нем; количество, интенсивность и длительность осадков; смещения и вибрации грунта. После длительного анализа для изучения этих явлений были выбраны и применены геофизические датчики следующих типов [1].

1. *Диэлектрические датчики влажности.* Были выбраны датчики влажности грунта ёмкостного типа, определяющие диэлектрические свойства или проницаемость грунта, в котором они установлены.

2. *Пьезометры для измерения порового давления.* С увеличением количества осадков дождевая вода скапливается в порах грунта и создает дополнительное напряжение, которое ослабляет прочность грунта [2, 3]. Поэтому нужны измерения с помощью пьезометров магнитного или тензометрического (сострунным тензометром) типов.

3. *Тензометры.* Для контроля движений слоев грунта нужен датчик давления, подключенный к глубинной зондовой системе датчиков (deep earth probe, DEP). Точность этого глубинного зонда должна давать возможность выявления нарушений (отклонений) размером 0,5 мм на метр [5]. При установке авто-

ры настоящей статьи использовали измерения деформаций с различным усилением выходного сигнала (100 \times , 350 \times , 1000 \times).

4. *Инклинометры.* Инклинометры применяются для измерения движений слоев грунта, таких как очень медленные ползучие либо резкие смещения. В таких случаях необходимы высокоточные инклинометры.

5. *Геофоны.* Геофоны используются для выявления вибраций, связанных с оползневыми процессами и явлениями. Для изучения характеристик, имеющих отношение к оползню, требуется оценка частот вплоть до 250 Гц. Точность измерений не должна превышать 0,1 Гц. Наблюдения необходимо проводить в режиме реального времени [8].

6. *Плювиометры (дождемеры, датчики осадков).* Влияние атмосферных осадков на состояние склона (в том числе на основные уровни подземных вод, увеличение массы слоев грунта, снижение устойчивости дисперсных или скальных грунтов) способно изменить всасывающее давление грунта и положительные градиенты давления, что может привести к возникновению оползня [4, 5]. Авторы представленной статьи использовали дождемер с опрокидывающейся ёмкостью, переворот которой фиксировался датчиком с шагом 0,001 мм осадков. Годовое количество осадков достигало 5000 мм.

7. *Датчики температуры.* Что касается температуры, то ее изменения вызывают изменения физических свойств грунта и подземных вод. При измерениях каждые 15 минут подходит точность измерений 0,1 °C.

Приведем формулы использованных статистических показателей:

$$\text{MSE} = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^G (x_i - \hat{x}_i)^2, \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{G} \sum_{j=1}^G (x_i - \hat{x}_i)^2},$$

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \times 100\%,$$

$$\text{Sensitivity} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \times 100\%, \quad (6)$$

$$\text{Specificity} = \frac{\text{TN}}{\text{TN} + \text{FP}} \times 100\%,$$

где RMSE (Root Mean Squared Error) – корень из среднеквадратической ошибки (в русской версии: СКО –

среднеквадратическое отклонение); MSE (Mean Squared Error) – среднеквадратическая ошибка (в русской версии: (СКО)² – квадрат среднеквадратического отклонения, или дисперсия); x_i – спрогнозированные значения, – соответствующие фактические значения по данным наблюдений; G – общее количество переменных; Accurasy – точность, то есть общая доля правильных прогнозов (как положительных, так и отрицательных) от всех наблюдений; TP (true positive) – количество истинно положительных ответов, которые в действительности положительные и которые модель правильно определила как положительные; TN (true negative) – количество истинно отрицательных ответов, которые в действительности отрицательные и которые модель правильно определила как отрицательные; FP (false positive) – количество ложноположительных ответов, которые в действительности отрицательные, но модель ошибочно определила их как положительные; FN (false negative) – количество ложноотрицательных ответов, которые в действительности положительные, но модель ошибочно определила их как отрицательные; Sensitivity – чувствительность, которая показывает долю реальных положительных случаев, которые модель правильно определила как положительные; Specificity – специфичность, которая показывает долю реальных отрицательных случаев, которые модель правильно определила как отрицательные.

Все перечисленные ранее геофизические датчики были оснащены беспроводными сенсорами, которые могут в режиме реального времени с минимальным вмешательством оператора определять значения необходимых параметров, используя указанные выше статистические показатели.

Модули сбора данных ►

Модули сбора данных предназначены для сбора данных с геофизических датчиков (как аналоговых, так и цифровых) в интеграции с глубинными зондовыми системами датчиков (deep earth probes, DEP). На данном уровне обеспечивается прием цифровой информации от множества датчиков с использованием соответствующих драйверов [13]. Для обработки данных, поступающих от цепей датчиков и возбуждающих/стимулирующих цепей, используются аналоговые драйверы. Для выявления древних событий на террито-

рии мониторинга были собраны различные источники данных – исторические сведения, полученные от Управления гражданской обороны, а также информация из государственных отчетов и на основе опросов местных жителей [22]. Для прогнозирования оползневых событий и управления кэшами каждого узла (во избежание потерь данных) требуются крупные и сложные системы мониторинга. Ключевым элементом, в котором могут обрабатываться все входные и выходные сигналы беспроводных сенсорных узлов, является блок анализа данных [15].

Основные функции этих модулей заключаются в планировании событий и управлении кэшами в распределенной системе.

В маршрутизацию были добавлены четыре следующих важнейших функциональных компонента.

1. Блок сбора данных с датчиков. Этот блок предназначен для обеспечения надежной связи между геофизическими датчиками и подключенным беспроводным сенсорным узлом через специализированные сопрягающие цепи. Он может получать и собирать данные измерений с частотой опроса датчиков, установленной пользователем. Затем эти данные передаются в модуль управления буферной памятью [19].

2. Блок мониторинга состояния системы. Этот компонент отслеживает состояние удаленной системы и ее узлов. Функция мониторинга состояния узла позволяет отображать уровень его питания, время работы аккумулятора и другие необходимые параметры. Функция мониторинга состояния сети используется для регулярного обновления адресации соседних узлов с целью обнаружения в сети неактивных узлов. Эти сетевые адреса соседних узлов применяются для эффективной маршрутизации данных к шлюзу зонда [10, 11].

3. Блок энергосбережения. Этот блок обеспечивает беспроводные сенсорные узлы энергосберегающими технологиями. В него интегрирована функция удаленных изменений состояния того или иного узла системы, то есть переключений между такими режимами, как: «спящий», «только мониторинг (частично активный)», «полностью рабочий/активный» и «отключеный» (sleep, monitor, active, off соответственно). Дополнительно повысить энергоэффективность может интеграция функции переключений режимов работы геофизических датчиков [20].

Точность и оценка качества классификации могут быть рассчитаны с использованием следующих уравнений.

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \times 100\%, \quad (7)$$

$$F = \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Sensitivity}}{\text{Precision} + \text{Sensitivity}} \times 100\%,$$

где Precision – точность положительного класса, то есть доля правильно предсказанных положительных результатов среди всех случаев, которые модель определила как положительные; TP (true positive) – количество истинно положительных ответов, которые в действительности положительные и которые модель правильно определила как положительные; FP (false positive) – количество ложноположительных ответов, которые в действительности отрицательные, но модель ошибочно определила их как положительные; F – F-мера, служащая для оценки качества классификации (в данном случае того, насколько правильно модель или система интерпретирует данные датчиков, то есть каков общий уровень корректности и полноты оценки данных сенсорной системы); Sensitivity – чувствительность (см. формулу (6)).

ОПТИМИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ►

Для оценки целесообразности использования искусственного интеллекта в целях анализа и отслеживания оползневых процессов и явлений были выбраны три разных типа алгоритмов ИИ [15]. Использование технологий ИИ имеет ряд преимуществ, поскольку они могут адаптировать свою внутреннюю структуру к текущим данным. Кроме того, искусственный интеллект может автоматически извлекать информацию из больших наборов данных. Для включения точного метода анализа данных по оползням модели ИИ являются экономически эффективными и более быстрыми в работе, чем традиционные модели, и могут быть расширены для охвата больших территорий. Они способны к контролируемому обучению (по прогнозированию динамики изменений факторов). Их применение экономически эффективнее, чем у стандартных моделей [16].

В этой работе мониторинг оползней проводился с использованием трех передовых подходов на основе ИИ, которые различаются по сложности. Для оценки их эффективности были использованы

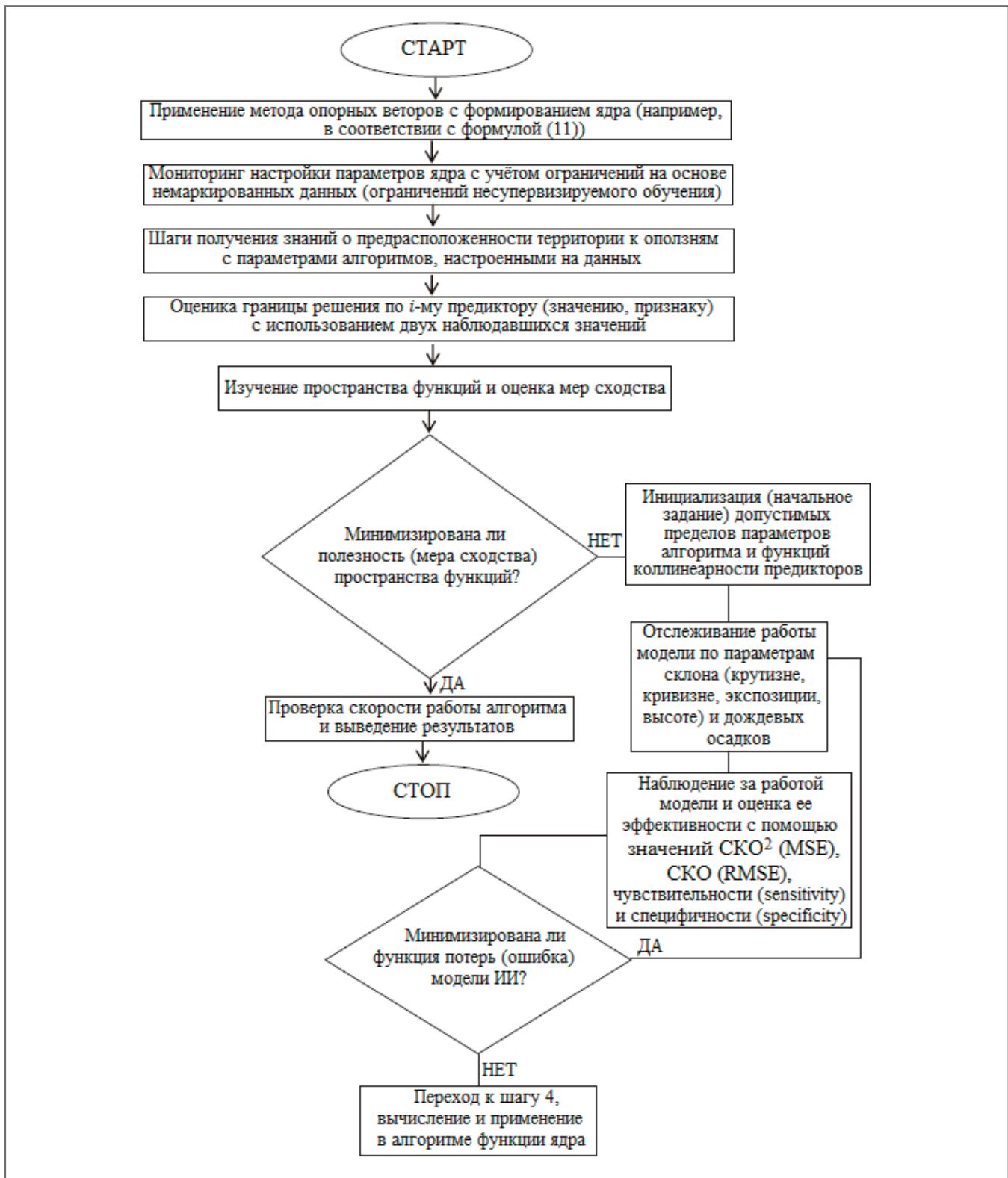


Рис. 2. Предлагаемая блок-схема применения метода опорных векторов для обнаружения оползней с использованием функций ядра. Расшифровка аббревиатур: ИИ – искусственный интеллект; СКО – среднеквадратическое отклонение (в английской версии – RMSE, Root Mean Squared Error – корень из среднеквадратической ошибки); $(\text{СКО})^2$ – квадрат среднеквадратического отклонения, или дисперсия (в английской версии – MSE, Mean Squared Error – среднеквадратическая ошибка)

следующие методы: алгоритм стохастического градиентного спуска (Stochastic Gradient Descent Algorithm, SGDA), логистическая регрессия (Logistic Regression, LR) и машина/метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM). Эти методы будут рассмотрены ниже.

Алгоритм стохастического градиентного спуска ►

Стохастический градиентный спуск представляет собой значительно упрощенный метод по сравнению с традиционным градиентным спуском, поскольку по этому алгоритму для вычис-

ления градиента функции потерь при решении задачи оптимизации этой функции используется только одна небольшая случайная обучающая выборка, а не весь набор данных при каждом обновлении параметров (это итерационный алгоритм оптимизации в ма-

Таблица 1. Результаты диагностики мультиколлинеарности факторов, влияющих на возникновение оползней

Фактор/признак	Статистические показатели коллинеарности	
	Толерантность (tolerance=1/VIF)	Фактор/коэффициент инфляции дисперсии (Variance Inflation Factor, VIF)
Крутизна склона	0,799	1,176
Экспозиция/ориентация склона	0,689	1,780
Высота склона	0,456	2,768
Плановая кривизна склона	0,675	1,499
Количество дождевых осадков	0,411	2,458

шинном обучении, который корректирует внутренние параметры моделей для минимизации функции потерь. Он выполнит аппроксимацию градиента функции потерь для всего набора данных на основе градиента потерь, вычисленного только для одной случайно выбранной обучающей выборки, в отличие от обычного градиентного спуска, при котором каждый раз обрабатывается весь набор данных. – Ред.). Размер используемой мини-выборки (батча, пакета данных) из общего набора данных определяется количеством обучающих данных для классификатора, которые одновременно обрабатываются моделью/классификатором за один шаг обучения [17]. Из-за небольшого размера батча сходимость при рассматриваемом методе может обновляться чаще, чем при обычном градиентном спуске. В предельных случаях при размере батча, равном единице, достигается наибольшая частота обновлений весов и используется более простой метод, напоминающий обучение перцептрона (простейшего вида нейронной сети, который обычно обучаются методом онлайн-обновлений, то есть по одному примеру за шаг. – Ред.). При работе алгоритма стохастического градиентного спуска веса классификатора/модели обновляются по следующей формуле:

$$R^{y+1} = R^y + \beta_y \frac{\delta}{\delta R} (L(i, R)) - \frac{P}{Q} \sum_g |R_g|, \quad (8)$$

где Q – размер батча; P – метапараметр, регулирующий уровень защиты модели от переобучения (определяющий степень регуляризации модели); R – счетчик итераций; β_y – скорость обучения; R_g – весовой коэффициент (вес) параметра; $L(i, R)$ – условная логарифмическая правдоподобность для i -го обучающего наблюдения (примера, объекта выборки).

Логистическая регрессия ►

Одним из распространенных численных методов для измерения предрасположенности территории к оползням является логистическая регрессия (которая позволяет предсказать вероятность наступления события на основе исторической информации путем подгонки данных к логистической кривой. – Ред.). Этот метод определяет многомерную зависимость между набором независимых переменных (предикторов) и зависимой переменной. Могут использоваться циклические, периодические переменные или оба их типа [15, 16].

Алгоритм логистической регрессии рассчитывает вероятность возникновения конкретного оползня по наибольшему прогнозируемому значению. При решении задачи предсказания схода оползня объектом выборки (наблюдением) является один случай с зависимой переменной (есть оползень или нет оползня). Этот алгоритм можно выразить следующим образом:

$$A = \frac{1}{1 + e^{-h}}, \quad (9)$$

где A – вероятность произошедшего в прошлом оползневого события; h – величина, определяемая по следующей формуле:

$$h = b_0 + b_1 z_1 + b_2 z_2 + \dots + b_n z_n, \quad (10)$$

где n – общее число факторов; b_0 – интерсепт модели (то есть свободный член – значение зависимой переменной, которое наблюдается при нулевых значениях всех независимых переменных. – Ред.); b_i , где $i = 1, 2, \dots, n$, – регрессионные коэффициенты; z_i , где $i = 1, 2, \dots, n$, – значения/признаки факторов.

Метод/машина опорных векторов ►

Один из известных методов категоризации, предложенных в 1990-х го-

дах, – машина опорных векторов. Он считается одним из наиболее гибких методов во многих отношениях и дает превосходные результаты [18]. В методе опорных векторов при машинном обучении используются функции ядра, или просто ядра, для расширения пространства функций и определения уровня сходства между двумя наблюдениями, являющимися объектами обучающей выборки, в пространстве признаков (то есть сходства между векторами признаков), чтобы смоделировать нелинейную границу при решении задачи классификации под контролем обучающей выборки (контролируемой классификации). Например, следующая формула определяет популярное ядро, называемое радиальным (то есть ядром на основе радиальной функции):

$$U(d_{ji}, d_{ji}) = \exp\left(-\theta \sum_{i=1}^p (d_{ji} - d_{ji})^2\right) = e^{-\theta \sum_{i=1}^p (d_{ji} - d_{ji})^2}, \quad (11)$$

где d_{ji} , d_{ji} – j -я пара наблюдений для i -го предиктора (значения, признака); p – число предикторов (значений, признаков); θ – параметр настройки, учитывающий гладкость/плавность границы решения; U – функция ядра.

РЕЗУЛЬТАТЫ ►

В ходе мониторинга оползней большое значение имеет проверка работы модели. Для ее выполнения использовались различные статистические методы, однако традиционные стандарты проверки до сих пор вызывают споры [19]. Для оценки точности прогнозов применялись: чувствительность (sensitivity), специфичность (specificity), точность (Accuracy, ACC), F-мера (F), СКО – среднеквадратическое отклонение (в английской версии – RMSE, Root Mean Squared Error – корень из среднеквадратической ошибки); $(\text{СКО})^2$ – квадрат среднеквадратического отклонения, или дисперсия (в английской

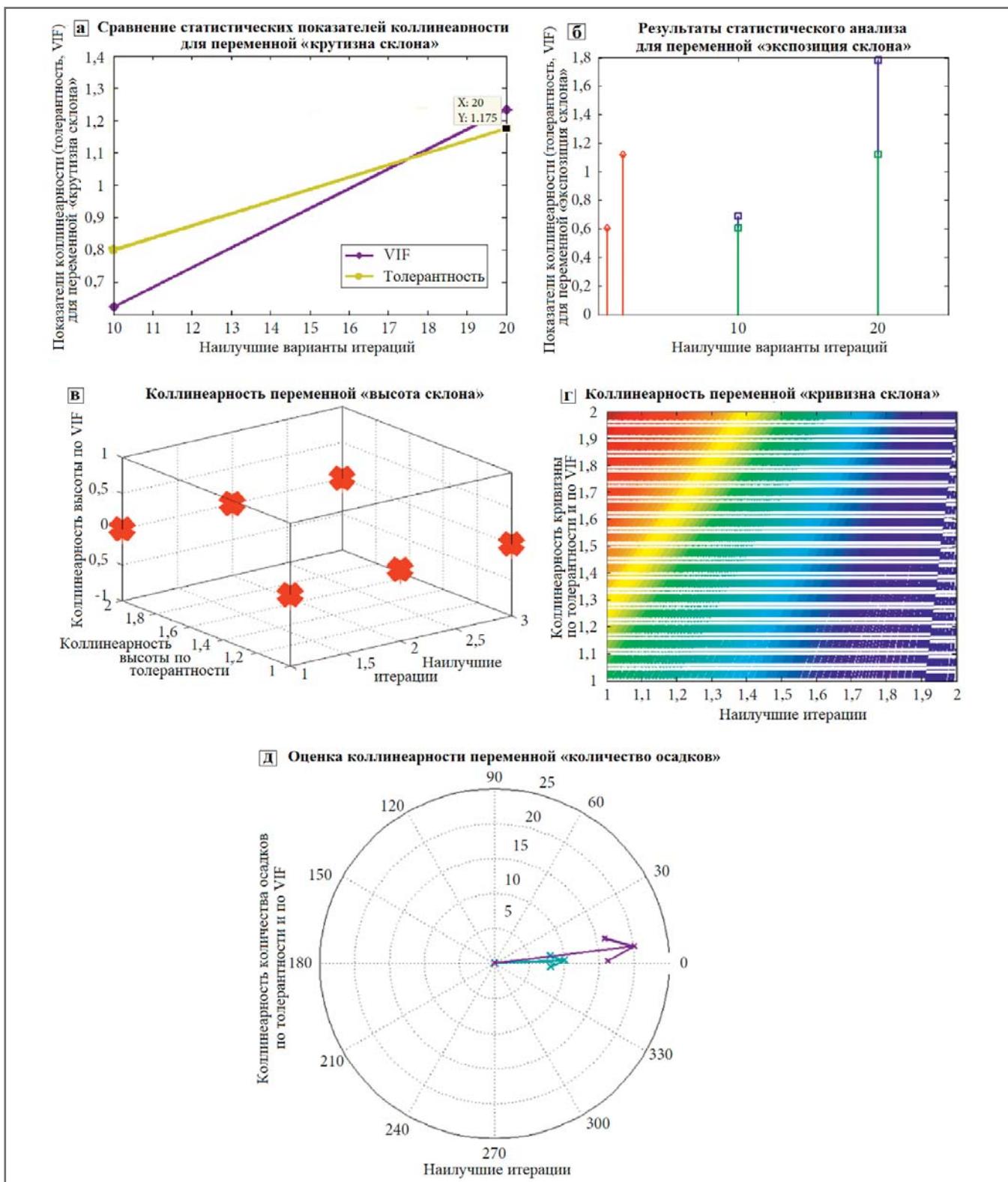


Рис. 3. Иллюстрация отсутствия мультиколлинеарности среди пяти параметров, влияющих на возникновение оползней: крутизы (а), экспозиции (б), высоты (в), плановой кривизны (г) склона, а также количества дождевых осадков (д). VIF (Variance Inflation Factor) – фактор/коэффициент инфляции дисперсии, то есть мера мультиколлинеарности между предикторами. (Следует отметить, что авторы исходной статьи (Kshirsagar et al., 2022) не расшифровали цветовые обозначения для рисунков «б»–«д». – Ред.)

версии – MSE, Mean Squared Error – среднеквадратическая ошибка). В таблице 1 представлены значения так называемого фактора/коэффициента инфляции дисперсии (VIF, Variance Inflation Factor), то есть меры мультиколлинеарности между предикторами в мо-

дели регрессии или машины опорных векторов, а также значения толерантности ($\text{tolerance} = 1/\text{VIF}$) для пяти рассмотренных в данной работе факторов, которые обуславливают возникновение оползней. Анализ показал, что максимальное значение VIF равно 2,768,

а максимальная величина толерантности составляет 0,456. Это соответствует критическим значениям (толерантности более 0,1 или VIF менее 10) и демонстрирует отсутствие мультиколлинеарности среди пяти параметров, влияющих на возникновение

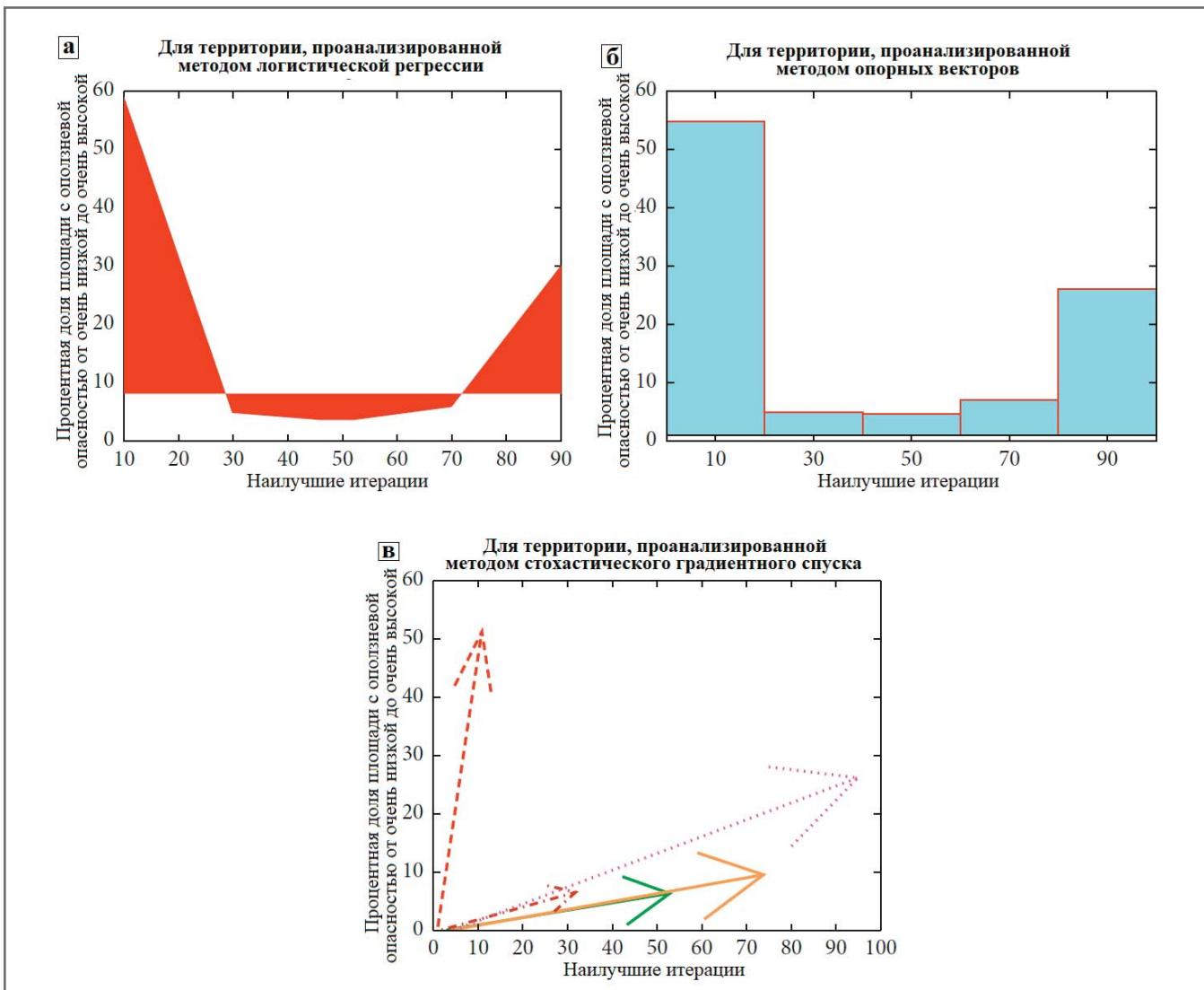


Рис. 4. Процентные доли территорий с оползневой опасностью разных классов, проанализированных методами логистической регрессии (а), опорных векторов (б) и стохастического градиентного спуска (в) (следует отметить, что авторы исходной статьи (Kshirsagar et al., 2022) не расшифровали обозначения цветов и типов линий для рисунка «в». – Ред.)

Таблица 2. Процентные доли территорий с оползневой опасностью разных классов

Метод анализа (модель ИИ)	Оползневая опасность (предрасположенность к оползням)				
	очень низкая	низкая	средняя	высокая	очень высокая
Логистическая регрессия	58,90	4,78	3,45	5,89	29,90
Машине опорных векторов	54,78	4,89	4,78	6,90	29,78
Стохастический градиентный спуск	51,34	6,45	6,23	9,43	26,01

оползней, что проиллюстрировано на рисунке 3.

Этот анализ показал, что мониторинг оползней возможен с использованием искусственного интеллекта (методов логистической регрессии, опорных векторов, стохастического градиентного спуска).

Из рисунка 4 видно, что для территории, проанализированной с использованием метода логистической регрессии, 58,90% площади относено к зонам

с очень низкой оползневой опасностью, 29,90% – с очень высокой, 5,89% – с высокой, 4,78% – с низкой, 3,45% – со средней (таблица 2).

Что касается метода опорных векторов, то для 54,78% территории, оцененной с его помощью, показана очень низкая оползневая опасность, для 29,78% – очень высокая, для 6,90% – высокая, для 4,89% – низкая, для 4,78% – средняя (см. рис. 4, таблицу 2).

Если говорить о территории, проанализированной с применением алгоритма стохастического градиентного спуска, то 51,34% ее площади отнесено к зонам с очень низкой оползневой опасностью, 26,01% – с очень высокой, 9,43% – с высокой, 6,45% – с низкой, 6,23% – со средней (см. рис. 4, таблицу 2).

В таблице 3 представлены результаты оценки эффективности трех рассмотренных выше методов. В случае аппрок-

Таблица 3. Эффективность трех моделей ИИ

Метод (модель ИИ)	Статистические показатели эффективности модели					
	СКО ² (MSE), мин. в данном наборе	СКО (RMSE), макс. в данном наборе	Точность (accuracy, ACC), %	Чувствительность (sensitivity), %	Специфичность (specificity), %	F-мера (F-measure), д.ед.
Логистическая регрессия	0,045	0,126	93,78	92,76	99,78	0,95
Машина опорных векторов	0,167	0,345	84,89	77,67	96,87	0,84
Стохастический градиентный спуск	0,234	0,378	86,78	84,78	93,12	0,83

симации функции оползневой опасности самую высокую эффективность продемонстрировал метод логистической регрессии. Его чувствительность составила 92,76%, а у алгоритма стохастического градиентного спуска она была 84,78%, у машины опорных векторов – 77,67%. Метод логистической регрессии показал также наибольшие специфичность (99,78%), точность (93,78%) и F-меру (0,95) и при этом наименьшие СКО=RMSE (0,126) и СКО²=MSE (0,045) (см. таблицу 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Оползни относятся к числу самых масштабных и опасных природных явлений на Земле. Используя данные беспроводных датчиков, авторы представленной статьи создали системы на основе искусственного интеллекта, спо-

собные точно предсказывать сдвиговые смещения грунтов. С помощью беспроводной сенсорной сети можно вести непрерывное наблюдение в режиме реального времени за ключевыми факторами, влияющими на оползнеобразование (атмосферными осадками, вертикальными и горизонтальными составляющими наклона массивов пород, смещениями грунтов, движением подземных вод), в целях прогнозирования оползней.

Основными целями данной работы были анализ и оценка эффективности использования трех передовых технологий наблюдения за оползнями на основе искусственного интеллекта, то есть таких методов, как логистическая регрессия, машина опорных векторов и алгоритм стохастического градиентного спуска (SGDA). Полученные результаты пока-

зали высокую конкурентоспособность моделей логистической регрессии. В дальнейшем планируется использование методов глубокого обучения. 

Наборы данных, использованные и/или проанализированные в ходе этого исследования, могут быть предоставлены по обоснованному запросу, направленному авторам по указанным адресам электронной почты.

Проект, по которому проводилась данная работа, финансировался Управлением научных исследований (Deanship of Scientific Research, DSR) Университета Короля Абдулазиза в г. Джидде в рамках гранта D-994-135-1443. В связи с этим авторы выражают благодарность DSR за техническую и финансовую поддержку.

Источник для перевода ► (Source for the translation) ►

Kshirsagar P.R., Manoharan H., Kasim S., Khan A.I., Alam M.M., Abushark Y.B., Abera W. Expedite quantification of landslides using wireless sensors and artificial intelligence for data controlling practices // Computational Intelligence and Neuroscience. Hindawi Publishing Corporation, 2022. Vol. 2022. Article ID 3211512. 11 p. <https://doi.org/10.1155/2022/3211512>.

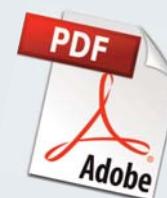
Список литературы, использованной авторами переведенной статьи ► (References used by the authors of the translated paper) ►

1. Giorgetti A., Lucchi M., Tavelli E. et al. A robust wireless sensor network for landslide risk analysis: system design, deployment, and field testing // IEEE Sensors Journal. 2016. Vol. 16. № 16. P. 6374–6386.
2. Muhamad W., Hakim A. WSN and IoT Based Landslide Monitoring System // Test Engineering and Management. 2020. Vol. 83. P. 10926–10932.
3. Kanungo D.P., Maletha A.K., Singh M., Sharma N. Ground based wireless instrumentation and real time monitoring of Pakhi landslide, Garhwal Himalayas, Uttarakhand (India) // Advancing Culture of Living with Landslides. Proceedings of the 4th World Landslide Forum (WLF4), 2017, Ljubljana, Slovenia, Europe (edited by M. Mikos et al.). Springer International Publishing, 2017. Vol. 3. Advances in Landslide Technology. DOI:10.1007/978-3-319-53487-9_33.

4. Suryawanshi S.R., Deshpande U.L. Review of risk management for landslide forecasting, monitoring and prediction using wireless sensors network // Proceedings of the 2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS). Coimbatore, India, 2017. Vol. 3. P. 1006–1011.
5. Chen W., Chen X., Peng J., Panahi M., Lee S. Landslide susceptibility modeling based on an6s with teaching-learningbased optimization and satin bowerbird optimizer // Geoscience Frontiers. 2021. Vol. 12. № 1. P. 93–107.
6. Chawla A., Pasupuleti S., Chawla S., Rao A.C.S., Sarkar K., Dwivedi R. Landslide susceptibility zonation mapping: a case study from darjeeling district, eastern Himalayas, India // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2019. Vol. 47. № 3. P. 497–511.
7. Xudong H. Landslide susceptibility mapping using the stacking ensemble machine learning method in lushui, southwest China // Applied Science. 2020. Vol. 10. P. 2–22.
8. Van Khoa V., Takayama S. Wireless sensor network in landslide monitoring system with remote data management // Measurement. 2017. Vol. 118.
9. Pitambar P. IoT based landslide detection and monitoring // International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR). 2019. P. 25–32.
10. Romdhane R.F., Lami Y., Genon-Catalot D., et al. Wireless sensors network for landslides prevention // Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA), IEEE, Annecy, France. 2017. P. 222–227.
11. Chavan S., Pangotra S., Nair S., More V., Nair V. Effective and efficient landslide detection system to monitor Konkan railway tracks // Proceedings of the 2015 International Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD), IEEE, Mumbai, India. 2015. P. 1–6.
12. Kim J., Kim Y., Jeong S., Hong M. Rainfall-induced landslides by deficit field matric suction in unsaturated soil slopes // Environmental Earth Sciences. 2017. Vol. 76. № 23. Article 808.
13. Zhang Z., Glaser S.D., Bales R.C., Conklin M., Rice R., Marks D.G. Technical report: the design and evaluation of a basin-scale wireless sensor network for mountain hydrology // Water Resources Research. 2017. Vol. 53. № 5. P. 4487–4498.
14. Nasseri M., Kim J., Green R., Alam M. Identification of the optimum relocalization time in the mobile wireless sensor network using time-bounded relocalization methodology // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66. № 1. P. 344–357.
15. Pham B.T., Pradhan B., Tien Bui D., Prakash I., Dholakia M.B. A comparative study of different machine learning methods for landslide susceptibility assessment: a case study of Uttarakhand area (India) // Environmental Modelling & Software. 2016. Vol. 84. P. 240–250.
16. Azarafza M., Azarafza M., Akgun H., Atkinson P.M., Derakhshani R. Deep learning-based landslide susceptibility mapping // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Article 24112.
17. Qi T., Zhao Y., Meng X., Chen G., Dijkstra T. AI-based susceptibility analysis of shallow landslides induced by heavy rainfall in Tianshui, China // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. № 9. Article 1819.
18. Sufi F.K. AI-Landslide: software for acquiring hidden insights from global landslide data using Artificial Intelligence // Software Impacts. 2021. Vol. 10. № 1. Article 100177.
19. Kshirsagar P., More V., Hendre V., Chippalkatti P., Paliwal K. IOT based baby incubator for clinic // Lecture Notes in Electrical Engineering. Proceedings of the ICCCE-2019 (ed. by A. Kumar, S. Mozar). Singapore: Springer, 2020. Vol. 570. P. 349–355.
20. Fanos A.M., Pradhan B., Mansor S., Yusoff Z.M., Abdullah A.F.B. A hybrid model using machine learning methods and GIS for potential rockfall source identification from airborne laser scanning datafication from airborne laser scanning data // Landslides. 2018. Vol. 15. Vol. 9. P. 1833–1850.
21. Xi C. GIS-based landslide susceptibility assessment using optimized hybrid machine learning methods // CATENA. Elsevier BV, 2021. Vol. 196. Article 104833.
22. Oza S. IoT: the future for quality of services // Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer, 2020. Vol. 570. Proceedings of the ICCCE-2019 (ed. by A. Kumar, S. Mozar). P. 291–301.

ГеоИнфо
Независимый электронный журнал

WWW.GEOINFO.RU



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



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

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ

Принята к публикации 13.10.2025

Опубликована 25.11.2025

МЭЙ Х.

Компания «Институт транспортного проектирования и планирования провинции Шэньси», г. Сиань, провинция Шэньси, Китай
meihafeng@163.com

ЧЖАН В.

Институт искусственного интеллекта Сианьского университета электронных технологий, г. Сиань, провинция Шэньси, Китай
zhanghuohuo121@163.com

ГУ Цз.

Институт искусственного интеллекта Сианьского университета электронных технологий, г. Сиань, провинция Шэньси, Китай
jgu6126@163.com

АННОТАЦИЯ

Предлагаем вниманию читателей адаптированный перевод статьи китайских исследователей «Применение искусственного интеллекта при геотехнических изысканиях». Эта работа была опубликована в электронном виде в сборнике *Advances in Artificial Intelligence, Big Data and Algorithms* («Достижения в области искусственного интеллекта, больших данных и алгоритмов») международным издательством IOS Press. Статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY NC 4.0, которая позволяет копировать и распространять ее, адаптировать, видоизменять и создавать новое, опираясь на нее, но не в коммерческих целях, при указании вида лицензии, типов изменений и ссылки на первоисточник. В данном случае полная ссылка на источник для перевода приведена в конце.

При геотехнических изысканиях широко используются методы динамического зондирования грунтов пробоотборником (SPT) или сплошным наконечником без отбора проб (DPT). Однако в этих случаях при сборе данных могут возникать ошибки, часто связанные с человеческим фактором. Для решения данной проблемы в статье предложено использовать такую разновидность технологии искусственного интеллекта, как усовершенствованный алгоритм YOLOv5 для автоматического подсчета количества ударов молота. Архитектура исходной нейросети YOLOv5 была улучшена следующим образом. Во-первых, была введена функция потерь с фокусировкой для устранения дисбаланса выборки, что обеспечивало более эффективную обработку ударов молотов разных типов. Кроме того, использовалась технология отбора сложных примеров в процессе обучения в режиме онлайн для повышения точности модели (за счет концентрации внимания модели на сложных примерах, наиболее информативных для обучения). Затем улучшенная модель YOLOv5 применялась для выявления ударов молота при испытаниях методами SPT и DPT. Для упрощения обучения модели и ее

работы был создан набор данных (изображений) для детекции молотов разных типов, адаптированный к требованиям конкретных методов геотехнических испытаний. Результаты экспериментов показали высокую эффективность усовершенствованной модели YOLOv5 для выявления и автоматического подсчета ударов молота (на тестовом наборе изображений) на основе использованного набора обучающих данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

геотехнические изыскания; полевые динамические испытания грунтов; метод SPT; метод DPT; искусственный интеллект; нейросеть; алгоритм YOLOv5; детекция молота; детекция ударов молота; обучение модели; отбор сложных примеров в режиме онлайн; количество ударов молота; автоматизированный подсчет.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мэй Х., Чжан В., Гу Цз. Применение искусственного интеллекта при геотехнических изысканиях (адапт. пер. с англ.) // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 3. С. 68–78. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-68-78.

THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN GEOTECHNICAL INVESTIGATION

Accepted for publication 13.10.2025

Published 25.11.2025

MEI H.

Shaanxi Transportation Planning and Design Institute Co. Ltd., Xian, Shaanxi, China
meihafeng@163.com

ZHANG W.

School of Artificial Intelligence, Xidian University, Xian, Shaanxi, China
zhanghuohuo121@163.com

GU J.

School of Artificial Intelligence, Xidian University, Xian, Shaanxi, China
jgu6126@163.com

ABSTRACT

We present to the readers an adapted translation of the article “The application of artificial intelligence in geotechnical investigation” by Chinese researchers. This work was published electronically in the collection of scientific papers “Advances in Artificial Intelligence, Big Data and Algorithms” by the international publisher “IOS Press”. It is available in open access under the CC BY-NC 4.0 license, which allows copying and redistribution of the article, adaptation, modification, and creation of new works based on it, but not for commercial purposes, 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.

The standard penetration test (SPT) and dynamic probing test (DPT) are commonly used exploration methods in geotechnical investigation. However, errors can occur during data collection, often attributed to factors such as human error. To mitigate this issue, this paper proposes the utilization of an improved YOLOv5 object detection algorithm, a form of artificial intelligence technology, to automatically count the number of hammer strikes during geotechnical investigations. The proposed approach incorporates several enhancements to the YOLOv5 network architecture. Firstly, a focal loss function is introduced to address sample imbalance, ensuring better handling of different classes of hammer strikes. Additionally, online hard example mining technology is employed to improve model accuracy by focusing on challenging samples that are most informative for training. The improved YOLOv5 model is then applied to detect hammer strikes in SPT and DPT tests. To facilitate training and evaluation, a hammer detection dataset is created, tailored to the specific requirements of geotechnical investigation. Experimental results demonstrate the superior performance of the proposed improved YOLOv5 object detection model on the hammer detection dataset.

KEYWORDS:

geotechnical investigation; field dynamic tests of soils; SPT method; DPT method; artificial intelligence; neural network; YOLOv5 algorithm; hammer detection; hammer strikes detection; model training; online hard example mining; number of hammer strikes; automated counting

FOR CITATION:

Mei H., Zhang W., Gu J. Применение искусственного интеллекта при геотехнических изысканиях (адапт. пер. с англ.) [The application of artificial intelligence in geotechnical investigation (adapted translation from English into Russian)] // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 3. С. 68–78. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-3-68-78 (in Rus.).

ДЛЯ СПРАВКИ ►

YOLO (You Only Look Once) – это алгоритм на основе глубокого обучения, используемый в области компьютерного зрения для распознавания объектов на изображениях или в видеопотоках. Он был впервые предложен в 2015 году Джозефом Редмоном с соавторами (<https://arxiv.org/abs/1506.02640>) и стал известен своей способностью объединять детекцию и классификацию объектов в один проход нейросети, что значительно ускоряло распознавание по сравнению с предыдущими методами, например R-CNN.

К сегодняшнему дню существует уже 13 официальных версий YOLO. Но их последовательность не всегда означает прямое эволюционное усовершенствование.

В ряду YOLOv1–v5 каждая из версий действительно строилась путем добавления к предыдущему варианту улучшений в архитектуре, точности детекции и скорости работы. Однако YOLOv5 официально не является продолжением серии от создателей оригинального YOLO (Джозефа Редмона с коллегами), поскольку был выпущен компанией Ultralytics (в 2020 году) и сильно отличается от YOLOv1–v4 по структуре и кодовой базе.

В ряду YOLOv6–v13 некоторые версии разрабатывались разными командами и не являются прямым продолжением YOLOv1–v5. То есть они используют концепцию YOLO и общие принципы детекции объектов, но могут сильно различаться по архитектуре и возможностям.

В представленной здесь статье рассматривается улучшенный алгоритм глубокого обучения YOLOv5, который совершенно нельзя рассматривать как устаревший для решения задач геотехнических изысканий. Наоборот, он имеет большой потенциал для использования в этой сфере. YOLOv5 активно применяют в разных странах при полевых динамических испытаниях грунтов, но пока только в процессе научных исследований, для экспериментальных проектов. Эта версия еще не стала массово применяемым инструментом при геотехнических изысканиях для строительства.

В России сейчас тоже активно развиваются технологии искусственного интеллекта и их применение в разных областях, но конкретно для полевых динамических испытаний грунтов методами SPT и DPT таких решений в открытых отечественных источниках пока не было найдено. Эти испытания продолжают проводить с «ручной» фиксацией ударов молота, использованием стандартных датчиков и традиционных статистических методов обработки данных.

Чтобы внедрить в стандартную повседневную практику геотехнических изысканий использование YOLOv5 и других подобных технологий, нужны дополнительные усилия: создание специализированных наборов данных, адаптация моделей к специфике испытаний, интеграция искусственного интеллекта с существующим оборудованием, стандартами испытаний, методами анализа данных, а также налаживание процессов сертификации результатов для инженерных расчетов и др.

ВВЕДЕНИЕ ►

Геотехнические изыскания включают несколько этапов: постановка задачи, планирование проекта, полевые изыскания, лабораторные испытания, обработка данных, проверка и утверждение результатов исследований, подготовка отчетных документов по проекту. Целью является сбор исчерпывающей информации о площадке будущего строительства, поэтому геотехнические изыскания играют ключевую роль в процессе развития проекта.

При этом одной из основных проблем геотехнических исследований является обеспечение точности данных. В частности, для изыскателей критически важен

точный подсчет числа ударов молота при полевых динамических испытаниях грунтов такими методами, как:

- **SPT** (Standard Penetration Testing) – стандартные пенетрационные испытания (пробоотборником при диаметре зонда 50 мм, забиваемого молотом массой 63,5 кг с высоты 760 мм);
- **DPT** (Dynamic Probing Testing) – динамическое зондирование сплошным наконечником без отбора проб (параметры которого зависят от конкретного типа испытания).

Для «ручного» сбора информации при таких испытаниях присуща неопределенность, что может приводить к ошибкам в статистически обработан-

ных данных и, как следствие, влиять на результаты геотехнических изысканий.

Благодаря развитию технологий искусственного интеллекта (ИИ) различные методы ИИ уже успешно применяются в разных отраслях. В данной статье предлагается использовать передовые методы ИИ для автоматического подсчета числа ударов молота в ходе полевых динамических испытаний грунтов при геотехнических изысканиях, чтобы исключить неточности, вызванные человеческим фактором. Целью работы является решение соответствующих проблем, влияющих на качество и успешность строительства, путем использования более надежной и эффективной альтернативы ручным подсчетам.

Алгоритмы ИИ для детекции объектов нашли широкое применение в разных сферах, включая интеллектуальные системы видеонаблюдения, автономное вождение и аэрофотосъемку с беспилотных летательных аппаратов. Их цели заключаются в автоматической идентификации конкретных объектов на изображениях или в видеопотоках.

Существующие алгоритмы распознавания объектов можно разделить на два основных класса:

1) *двуствадийные методы детекции объектов с предварительным извлечением областей/зон, представляющих интерес*, например:

- R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network) – метод детекции объектов, основанный на сверточных нейронных сетях с предварительным выделением зон интереса [1];

- Fast R-CNN – модификация RCNN с более высокой скоростью работы [2];

- Faster R-CNN – модификация Fast R-CNN с еще более высокой скоростью работы по сравнению с Fast R-CNN [3];

2) *одноствадийные/сквозные методы детекции объектов*, например:

- YOLO (You Only Look Once – «вы смотрите только один раз») – алгоритм, обрабатывающий все изображение или каждый кадр видеопотока за один проход нейронной сети и работающий в режиме онлайн [4];

- SSD (Single Shot MultiBox Detector – «одноствадийный многоблочный детектор объектов») – в отличие от YOLO использует несколько уровней признаков для детекции объектов различных размеров [5].

Применение алгоритмов детекции объектов при геотехнических изысканиях может обеспечить инженеров ценными инструментами для эффективного и точного сбора необходимой информации.

мации, оценки качества строительства и выявления потенциальных опасностей. Поэтому исследование возможностей их использования при изысканиях имеет большое практическое значение.

Алгоритмы детекции объектов за последние годы достигли значительного прогресса, что привело к их широкому применению в различных сферах. Поскольку разные сценарии и типы объектов обусловливают разные уникальные задачи, для их эффективного решения был разработан ряд детекторов.

Одним из первых инструментов для детекции объектов был алгоритм R-CNN, в котором используется селективный (выборочный) поиск в целях извлечения из изображений областей (зон), представляющих интерес, после чего для каждой из них выполнялись классификация и регрессия ограничивающих рамок.

На основе R-CNN были созданы алгоритмы Fast R-CNN и Faster R-CNN, направленные на дальнейшее повышение эффективности и расширение возможностей детекции объектов. В детекторе Fast R-CNN был внедрен слой объединения признаков областей интереса, что повысило точность и скорость детекции за счет эффективной обработки этих зон. В архитектуру детектора Faster R-CNN была встроена нейронная сеть RPN (Region Proposal Network – «сеть предложений областей интереса»), что автоматизировало процесс генерации зон-кандидатов и значительно повысило скорость и общую эффективность работы алгоритма.

Рассмотренная серия алгоритмов R-CNN показала хорошую точность распознавания объектов. Однако они имели такие недостатки, как низкая скорость детекции, сложность в использовании и ограничения при необходимости работы в режиме онлайн, то есть в обработке данных по мере их поступления, например по мере поступления кадров видеопотока, для чего нужна высокая скорость.

Эти проблемы были решены в серии алгоритмов YOLO, которые получили значительно увеличенную скорость работы в режиме онлайн и улучшенную точность детекции объектов.

В алгоритме YOLOv1 [4], предложенном в 2016 году, используются:

- полно связная сеть, то есть полностью связанные слои, где каждый элемент (узел, нейрон, ячейка) предыдущего слоя соединен с каждым элементом следующего;
- метод детекции объектов на всем изображении (или на каждом кадре ви-

деопотока) за один проход сети, что позволяет быстро обнаруживать множество объектов в режиме онлайн.

Однако относительно неглубокая архитектура сети YOLOv1 (с малым числом слоев) ограничивает общую точность детекции объектов (то есть долю правильных предсказаний от общего количества предсказаний, accuracy), делая эту версию менее подходящей для решения задач с высокой точностью положительных предсказаний (то есть долей верных положительных предсказаний от общего числа положительных предсказаний, precision).

В последующих версиях, таких как YOLOv2 [6], интегрированы слои нормализации выходных сигналов по пакетам (батчам) и базовые (анкерные, якорные, опорные) рамки для выделения объектов разных размеров, с различными соотношениями сторон и расположением на изображении.

В YOLOv3 [7] улучшены скорость и стабильность работы модели за счет реконструкции архитектуры базовой сети DarkNet.

Хотя в серии алгоритмов YOLO постепенно повышалась точность детекции объектов, было замечено постепенное уменьшение скорости их работы. Версии YOLOv4 [8] и YOLOv5 [9] в 2020 году расширили границы как точности, так и скорости, став передовыми алгоритмами в области детекции объектов. На тот момент эти алгоритмы продемонстрировали наивысшую среднюю точность положительных предсказаний (Average Precision, AP) на наборе данных для задач компьютерного зрения COCO (Common Objects in Context – «общие объекты в контексте» [10]), превзойдя в этом другие алгоритмы, такие как Faster R-CNN и Mask R-CNN [11].

В целом важно находить баланс между точностью и скоростью в зависимости от конкретных требований каждой задачи. Среди множества доступных алгоритмов детекции объектов одним из сильнейших стал YOLOv5 благодаря его очень высокой эффективности. Работа этого алгоритма сочетает высокие скорость и точность, а также возможности точной локализации, что обеспечило ему высокие оценки и широкое применение в последние годы.

В данной работе предлагается расширение возможностей архитектуры YOLOv5 за счет дополнительных улучшений. В частности, авторами были включены функция потерю с фокусировкой и метод отбора сложных примеров в процессе обучения в режиме он-

лайн. Они были применены к задаче детекции ударов молота при полевых динамических испытаниях грунтов методами SPT и DPT, проводимых в рамках геотехнических изысканий. Предлагаемый подход оптимизирует процесс сбора данных благодаря автоматическому подсчету ударов молота во время этих испытаний.

Результаты представленного здесь исследования имеют большое значение для развития технологий применения искусственного интеллекта в инженерных изысканиях, поскольку содержат ценную информацию, на основе которой можно получить рекомендации для будущих исследований и разработок в этой отрасли. Соответствующий вклад данной работы состоит в следующем:

- 1) впервые успешно использован алгоритм детекции объектов в области искусственного интеллекта для распознавания молота при геотехнических изысканиях и предложен метод автоматизированного подсчета числа ударов;
- 2) представлена улучшенная версия YOLOv5, в которой компонент потерь классификации дополнен функцией потерь с фокусировкой, что позволяет модели уделять больше внимания труднообнаруживаемым и менее многочисленным положительным примерам;
- 3) применен метод отбора сложных примеров в режиме онлайн (Online Hard Example Mining, OHEM) для динамической настройки модели, повышения ее точности и улучшения эффективности распознавания труднодетектируемых объектов.

В данной статье рассматривается эволюция серии алгоритмов YOLO, приводится подробное описание предложенного улучшенного метода работы с YOLOv5, представлены и проанализированы результаты экспериментов, подводятся итоги исследований, обсуждаются перспективы их дальнейшего развития.

ЭВОЛЮЦИЯ YOLO ►

В алгоритме YOLOv1, предложенном Джозефом Редмоном с соавторами, используется единая нейронная сеть для прямого прогнозирования ограничивающих рамок и вероятностей присутствия классов объектов на изображении. Такой одностадийный/сквозной подход позволяет эффективно обрабатывать большое количество данных, обеспечивая высокую скорость и масштабируемость работы алгоритма [12]. Однако YOLOv1 имеет ограничения в точности локализации и может допускать ошибки

в классификации перекрывающихся объектов.

В YOLOv2 применены методы, повышающие общую точность детекции объектов (долю правильных предсказаний от общего количества предсказаний, accuracy) и точность положительных предсказаний (долю верных положительных предсказаний от общего числа положительных предсказаний, precision). Для улучшения стабильности работы модели использован слой пакетной нормализации (нормализации по батчам), а также применены базовые/анкерные рамки, заданные заранее. Кроме того, YOLOv2 может выполнять детекцию мелких объектов за счет объединения низкоуровневых детализированных признаков с высокоуровневыми сверточными семантическими признаками посредством слияния каналов. Но, несмотря на то что YOLOv2 демонстрирует улучшенную общую точность (accuracy) по сравнению с предшествующим YOLOv1, проблемы с локализацией и ошибками классификации объектов в нем остаются.

Алгоритм YOLOv3 еще больше усовершенствован по сравнению с YOLOv2. Благодаря новой базовой сети DarkNet-53, сочетающей элементы архитектур Darknet-19 и ResNet [13], обеспечена совместимость с входными данными разных масштабов и повышена гибкость модели. Также введен метод кластеризации K-means (К-средних) для генерации базовых рамок разных размеров, что улучшает способность обнаруживать мелкие и плотно расположенные объекты.

Алексей Бочковский с соавторами внесли дальнейшие улучшения в YOLOv3 и в 2020 году представили YOLOv4. В этой версии реализована архитектура частичных межстадийных связей (Cross-Stage-Partial, CSP), обеспечивающая эффективную передачу информации между предыдущими и последующими слоями, что дает повышение общей точности и скорости детекции объектов. Для уточнения карт признаков и, соответственно, увеличения точности детекции и улучшения способности распознавать мелкие объекты внедрены такие механизмы внимания, как модуль пространственного внимания (Spatial Attention Module, SAM) и модуль внимания сверточных блоков (Convolutional Block Attention Module, CBAM). Благодаря введению сети агрегации путей/маршрутов (Path Aggregation Network, PANet [14]) еще больше улучшены возможности извлечения признаков, что позволяет модели лучше

распознавать мелкие и множественные объекты. Кроме того, значительно повышена эффективность работы за счет использования таких алгоритмов и модулей, как блоки пирамидального, то есть многоуровневого, пространственного объединения признаков (SPP-blocks, Spatial Pyramid Pooling blocks) и паноптические пирамидальные сети признаков (panoptic feature pyramid networks).

Алгоритм YOLOv5, предложенный в июне 2020 года, отличается от предыдущих компактной архитектурой сети и введением передовых технологий, таких как плавная сигмоидоподобная функция активации (функция типа Swish) и регуляризация с блоковым дропаутом, при которой случайные блоки нейронной карты признаков временно обнуляются для предотвращения переобучения (метод DropBlock), что дополнительно повышает эффективность детектора. Также введена новая стратегия искусственного расширения обучающей выборки, специально разработанная для повышения точности обнаружения мелких объектов.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МОДЕЛЬ YOLOv5 ►

Структура сети YOLOv5 ►

Для YOLOv5 существует четыре версии, различающиеся по глубине и ширине нейронной сети: YOLOv5s, YOLOv5m, YOLOv5l и YOLOv5x [15–17].

Для данной работы была выбрана версия YOLOv5l, которая лучше соответствует специфическим требованиям задач, решаемых при геотехнических изысканиях. Она имеет больший размер модели по сравнению с YOLOv5s и YOLOv5m и при этом сохраняет высокую скорость вывода по сравнению с YOLOv5x, что делает ее подходящей для обнаружения объектов в режиме онлайн.

Ключевыми компонентами YOLOv5 являются (рис. 1):

- входной модуль (input end);
- базовая сеть (backbone), отвечающая за извлечение признаков с разных уровней;
- связующий модуль (neck), или шейка, или модуль агрегации признаков;
- выходной модуль предсказаний (head).

Во входном модуле применяется метод Mosaic («Мозаика»), который заключается в том, что четыре изображения случайным образом обрезаются и объединяются в одно с последующими случайным масштабированием и горизонтальным отражением. Эта техника увеличения объема данных значительно обогащает обучающую выборку и повышает устойчивость и обобщающую способность модели.

В качестве основной архитектуры базовой сети в YOLOv5 используется CSPDarknet-53, куда входят модули:

- CSP (Cross Stage Partial – «частичное соединение между стадиями», «модуль частичного перекрестного соединения»);
- CBS (Cross-Stage-Partial + Batch-Norm + SiLU – «свертка + нормализация пакета + активация с помощью сигмоидно-линейной функции (SiLU)»), который состоит из сверточных слоев, слоев нормализации батча/пакета данных и слоев активации с помощью сигмоидно-линейной функции, что эффективно снижает потерю информации и вычислительные затраты при передаче признаков/данных по сети.

Модуль CSP был изначально представлен в базовой сети YOLOv4 и улучшал возможности извлечения признаков за счет установления связей между различными остаточными блоками (блоками с остаточными связями) и ветвями (потоками) признаков, что повышало точность и скорость детекции объектов. В YOLOv5 используются модули CSP двух типов – CSP1 и CSP2.

CSP1 имеет два маршрута/пути передачи признаков, один из которых включает модуль CBS и блок с остаточными связями, а другой – только один модуль CBS для согласования (настройки) количества каналов в базовой сети.

CSP2, используемый в связующем модуле, заменяет исходный остаточный блок модулем CBS.

Такая архитектура обеспечивает высокую эффективность при снижении вычислительной сложности, улучшает способность модели представлять признаки и повышает эффективность детекции объектов.

В связующий модуль (модуль агрегации признаков) в YOLOv5 входят: модуль SPPF; модуль CSP; комбинация модулей FPN и PAN.

Модуль SPP (Spatial Pyramid Pooling – «пирамидальное/многоуровневое пространственное объединение признаков») повышает способность сети обрабатывать изображения различных размеров за счет использования операции «объединение по максимуму» (max pooling), то есть операции формирования подвыборок признаков, благодаря которой на выходе сохраняется максимальное значение для каждой области входного тензора. Это позволяет сети работать с изображениями произвольных масштабов. А модуль

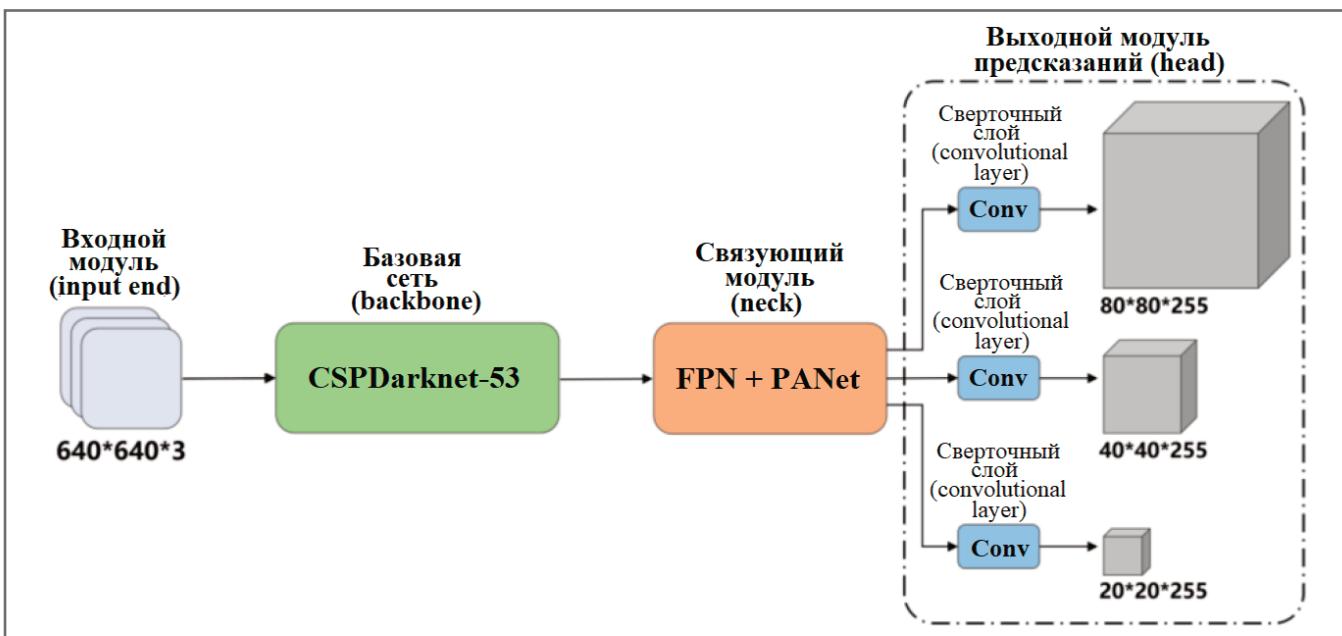


Рис. 1. Общая архитектура YOLOv5. Названия модулей: CSPDarknet-53 (Cross Stage Partial Darknet-53) – улучшенная архитектура базового модуля/сети по сравнению с Darknet-53, используемая в YOLO начиная с четвертой версии; FPN (Feature Pyramid Network – «сеть пирамид признаков») в комбинации с PANet (Path Aggregation Network – «сеть агрегации путей/маршрутов», «сеть объединения информационных потоков»). Под схемой входного модуля *числами* указан размер входного тензора изображения: ширина изображения в пикселях*высота изображения в пикселях*количество каналов (обычно RGB, то есть красный, зеленый и синий). В схеме выходного модуля признаков *числами* для каждого из трех уровней указан размер выходного тензора, то есть ширина карты признаков*высота карты признаков*количество каналов, где ширина и высота измеряются в ячейках карты признаков, а число каналов соответствует предсказаниям для всех базовых рамок на данном уровне

SPPF (Spatial Pyramid Pooling Fast – «ускоренное пирамидальное/многоуровневое пространственное объединение признаков») является облегченной версией SPP, которая обеспечивает более высокую скорость работы при сохранении эффективности обработки признаков.

Модуль CSP (Cross Stage Partial – «частичное соединение между стадиями», «модуль частичного перекрестного соединения») был подробнее рассмотрен ранее.

Модуль FPN (Feature Pyramid Network – «сеть пирамид признаков») объединяет признаки разных уровней, применяя операцию увеличения разрешения (upsampling – «масштабирование вверх»), то есть пространственное разрешение карты признаков увеличивается на каждом уровне, чтобы выполнить объединение с признаками более низкого уровня и в итоге создать богатую и согласованную карту признаков. В свою очередь, модуль PAN (Path Aggregation Network – «сеть агрегации путей/маршрутов», «сеть объединения информационных потоков») обеспечивает передачу информации о расположении признаков/объектов снизу вверх по пирамиде признаков (начиная с нижних уровней). Такое сочетание позволяет одновременно задействовать детальную информацию (низкоуровневые призна-

ки) и семантическую (смысловую) информацию высокого уровня, способствуя распознаванию разнообразных объектов. Это усиливает способность сети обучаться и извлекать более широкий спектр признаков.

В *выходном модуле прогнозирования* для вычисления потерь при локализации ограничивающих рамок используется функция потерь *GIoU* (Generalized Intersection over Union – «обобщенное пересечение по объединению», то есть доля площади пересечения областей по отношению к площади их объединения). Эта функция является модифицированной метрикой *IoU*. В ней учитывается не только доля площади пересечения предсказанной и базовой рамок, как в *IoU*, но и расстояние между их центрами и соотношение сторон. Благодаря учету этих дополнительных факторов функция потерь *GIoU* обеспечивает более точный расчет потерь (ошибку) ограничивающих рамок, что повышает точность детекции объектов моделью.

Обучение сети с выбором сложных примеров в режиме онлайн ►

Набор данных (изображений) по мотивам был создан специально для этого исследования. Он на 90% состоял из простых примеров. Однако преобладание такого рода примеров при обучении

модели ограничивает ее способность эффективно выявлять более сложные случаи. Для решения данной проблемы применяется метод обучения сети с отбором сложных примеров в режиме онлайн (Online Hard Example Mining, OHEM [19]). Этот метод динамически регулирует процесс обучения, выбирая трудные примеры на основе величины потерь и включая их в последующие итерации (шаги обновления весов модели с обработкой одного пакета/батча данных, то есть одной мини-выборки). Активное использование сложных примеров позволяет модели лучше учиться и повышает эффективность детекции труднораспознаваемых объектов.

Как показано на рисунке 2, применение метода OHEM на основе YOLOv5 включало следующие шаги:

- 1) для каждой мини-выборки входные данные подавались в сеть, которая генерировала предсказанные координаты ограничивающих рамок и вероятности принадлежности каждого объекта к каждому классу;
- 2) рассчитывалась функция потерь как мера различий между предсказанными и базовыми ограничивающими рамками с учетом координат рамок и вероятностей принадлежности объектов к классам;
- 3) сортировались значения потерь и выбиралась подвыборка рамок с наиболь-

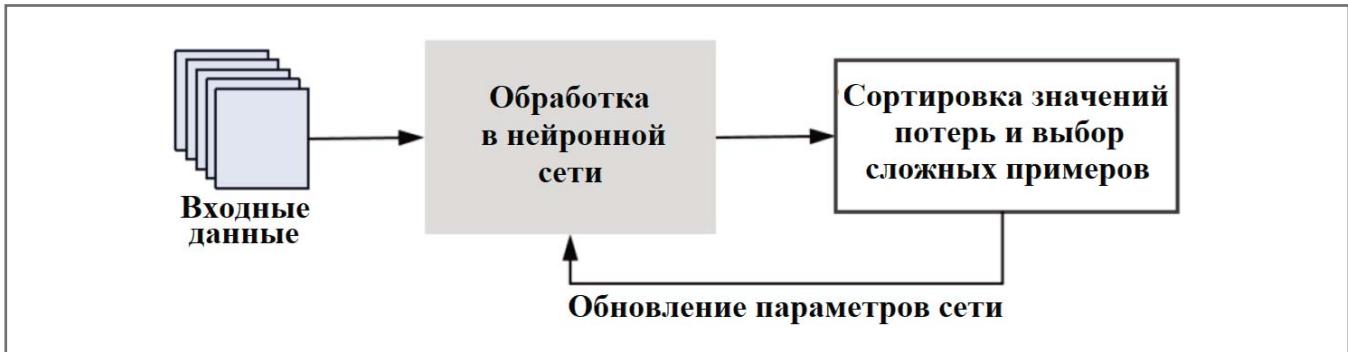


Рис. 2. Схема процесса обучения модели с использованием метода ОНEM

шими потерями в качестве трудных примеров для дальнейшего обучения; 4) эти трудные примеры использовались для обновления параметров сети с помощью алгоритма обратного распространения ошибки [20].

Применение метода ОНEM в процессе обучения позволяет модели сосредоточиться на сложных примерах, благодаря чему она лучше усваивает их отличительные черты, что приводит к повышению точности и надежности детекции ею объектов.

Функция потерь с фокусировкой ►

Функция потерь в YOLOv5 может быть выражена следующим образом:

$$L = \lambda_{coord} L_{coord} + \lambda_{obj} L_{obj} + \lambda_{cls} L_{cls} + \lambda_{giou} L_{giou}, \quad (1)$$

где L_{coord} – потеря точности локализации объекта; L_{obj} – потеря уверенности в обнаружении объекта; L_{cls} – потеря точности классификации; L_{giou} – потеря точности локализации с учетом площади пересечения и охвата рамок (*GIoU*-потеря). Всё это гиперпараметры, используемые для балансировки вклада каждой составляющей функции потерь.

Из-за значительного дисбаланса между положительными (есть удар молота) и отрицательными (нет удара молота) примерами в собственном наборе данных использование стандартной функции потерь, вычисляемой на основе кросс-энтропии (метрики расхождения между истинными и предсказанными вероятностями) привело бы к тому, что модель сосредотачивалась бы на многочисленных отрицательных примерах. А это могло бы негативно сказаться на эффективности детекции положительных примеров. Поэтому была введена функция потерь с фокусировкой, то есть функция, ориентированная на трудные примеры (Focal Loss Function [21]), которая решает проблему несбалансиро-

ванных выборок, динамически регулируя веса отрицательных примеров с помощью настраиваемого параметра и тем самым стимулируя модель фокусировать внимание на положительных примерах. Когда указанный настраиваемый параметр равен нулю, функция потерь с фокусировкой сводится к функции потерь, рассчитываемой на основе бинарной кросс-энтропии (при предсказаниях для двух классов). Однако с увеличением значения данного параметра эта функция эффективно снижает веса легко классифицируемых примеров, тем самым направляя внимание модели на сложные положительные примеры, которых относительно мало [22]. Формула функции потерь с фокусировкой (Focal Loss, *FL*) записывается следующим образом:

$$FL(p_i) = -\alpha_i (1 - p_i)^\gamma \lg(p_i),$$

$$\text{где } p_i = \begin{cases} p, & \text{если } y=1 \\ (1-p), & \text{иначе} \end{cases}, \quad (2)$$

где p_i – вероятность, предсказанная моделью для положительных примеров в наборе данных (для истинных ударов молота); p – вероятность принадлежности к положительному классу, которую модель присваивает конкретному примеру; значение $y=1$ соответствует положительному классу, $y=-1$ – отрицательному классу (фону); α – весовой коэффициент, равный α для положительных примеров и $(1-\alpha)$ для отрицательных; $(1-p)^\gamma$ – модулирующий множитель/коэффициент, нужный для того, чтобы подавить вклад легких примеров, в которых модель уже уверена, и оставить значимым или даже подчеркнуть вклад трудных для классификации примеров, в которых модель мало уверена или не уверена; γ – настраиваемый (задаваемый) параметр фокусировки, который управляет силой этой модуляции.

Функция потерь с фокусировкой предназначена для компенсации дисба-

ланса между положительными и отрицательными примерами из набора данных. В улучшенной модели YOLOv5, представленной в данной работе, эта функция применяется для вычисления потерь классификации L_{cls} по следующей формуле:

$$L_{cls} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^C [y_i = c] (1 - p_{i,c})^\gamma \lg(p_{i,c}), \quad (3)$$

где N – количество обучающих примеров; C – функция локализационных потерь; y_i – истинный класс i -го примера, $p_{i,c}$ – предсказанная моделью вероятность того, что i -й пример принадлежит классу c .

Использование функции потерь с фокусировкой делает обучение модели детекции объектов более эффективным, тем самым улучшая точность обнаружения сложных положительных примеров. Кроме того, эта функция дополнительно повышает способность модели к обобщениям в процессе обучения, поскольку позволяет динамически корректировать веса примеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ ►

Формирование набора данных ►

Авторами представленной работы был сформирован специализированный набор данных, предназначенный для обнаружения молотов при динамических испытаниях грунтов методами SPT и DPT в процессе геотехнических изысканий, с целью предоставления исходных данных для дальнейших исследований. Он включал изображения молотов двух разных типов с учетом ряда влияющих факторов, таких как различные условия освещения и ракурсы съемок, что позволяло имитировать сложности, характерные для реальных условий. На рисунке 3 приведены примеры использованных типов молотов (типов 1 и 2).

Для формирования указанного набора данных на площадке проведения динамических испытаний грунтов методами SPT и DPT применялась съемка высокоразрешающими видеокамерами. Затем полученные видеозаписи обрабатывались путем извлечения отдельных кадров, которые впоследствии отбирались для получения множества изображений. Для обеспечения точной разметки применялся специальный инструмент под названием LabelImg, с помощью которого аннотировалось наличие молота на каждом изображении. Всего набор данных включал 2400 обучающих и 800 тестовых (для проверки работы модели) изображений, при этом на каждом из них присутствовал только один детектируемый молот.

Состав экспериментальной системы ►

В состав экспериментальной системы входили следующие компоненты:

1) *аппаратная часть*: использовалась видеокарта NVIDIA GeForce RTX 1060s с 6 ГБ видеопамяти;

2) *программная среда*: эксперименты проводились в операционной системе Windows 11 с применением такой интегрированной среды разработки на языке программирования Python, как PyCharm 2022.1, и такой платформы с набором инструментов для параллельных вычислений на видеокартах (GPU) компании NVIDIA, как CUDA 11.8;

3) *среда (фреймворк) глубокого обучения*: использовалась библиотека для глубокого обучения PyTorch 2.0.0 (которая предоставляет инструменты для построения, обучения и оценки нейросетей).

Во время обучения модели использовался адаптивный алгоритм оптимизации Adam (Adaptive Moment Estimation – «Адаптивная оценка моментов»), который использует скользящие оценки среднего и дисперсии градиента. Размер пакета данных (батча) составлял 32 примера/изображения, и обучение модели проводилось в ходе 100 итераций. Параметр фокусировки γ в функции FL (см. формулу (2)) был задан равным 1,5.

Показатели оценки ►

В данной работе для оценки качества и эффективности модели использовалась средняя точность положительных предсказаний, усредненная по всем классам детектируемых объектов (mean Average Precision, mAP , в отличие от Average Precision, AP – средней точно-



Рис. 3. Примеры типов молотов (1 и 2)

сти положительных предсказаний для одного конкретного класса). Для определения этой метрики нужны следующие показатели.

- *TP* (True Positive) – истинно положительные предсказания, то есть количество истинно положительных примеров, которые модель правильно отнесла к положительным (распознала удары молота там, где они действительно были). *TP* соответствует числу ограничивающих рамок, определенных моделью как положительные, которые достаточно точно совпадают с базовыми/истинными рамками (то есть с долей площади пересечения предсказанной и базовой рамок IoU не меньше заранее заданного порога).

- *FP* (False Positive) – ложноположительные предсказания, то есть количество отрицательных примеров, которые модель ошибочно классифицировала как положительные («увидела» удары молота там, где их в действительности не было).

- *FN* (False Negative) – ложноотрицательные предсказания, то есть число положительных примеров, которые модель ошибочно определила как отрицательные (не распознала реальные удары молота).

- *TN* (True Negative) – истинно отрицательные предсказания, то есть количество отрицательных примеров, которые модель правильно определила как отрицательные («не увидела» ударов молота там, где их действительно не было).

На основе этих показателей можно вычислить такие метрики, как точность положительных предсказаний *P* (precision) и полнота *R* (recall) детекции молота для каждого класса.

Точность положительных предсказаний *P* определяется как отношение количества истинно положительных сра-

батываний (*TP*) к сумме истинно положительных и ложноположительных оценок (*TP+FP*).

Полнота *R* определяется как отношение количества истинно положительных предсказаний (*TP*) к сумме истинно положительных и ложноотрицательных срабатываний (*TP+FN*).

Если речь идет о точности *P* и полноте *R* для распознавания моделью конкретного класса детектируемых объектов *k*, то используют соответствующие обозначения с нижним индексом *k*:

$$P_k = \frac{TP_k}{TP_k + FP_k}, \quad (4)$$

$$R_k = \frac{TP_k}{TP_k + FN_k}, \quad (5)$$

Могут быть вычислены разные значения точности P_k и полноты R_k для разных порогов уверенности модели. Кривая «точность P_k – полнота R_k » (по горизонтальной оси – R_k , по вертикальной – P_k) может наглядно представить взаимосвязь между этими двумя показателями при разных порогах. Площадь под этой кривой соответствует средней точности положительных предсказаний P_k для конкретного класса *k* детектируемых объектов (AP , Average Precision).

Набор данных, самостоятельно собранный авторами, включал два типа/класса молотов. Средняя точность положительных предсказаний, усредненная по обоим этим классам объектов (mAP), дает обобщенную оценку качества работы модели при распознавании рассматриваемых молотов:

$$mAP = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 AP_k, \quad (6)$$

где AP_k – средняя точность положительных предсказаний при детекции конкретного класса *k*, то есть молота типа 1 или молота типа 2 (см. рис. 3).



Рис. 4. Примеры результатов детекции молотов. Полученные значения средней точности положительных предсказаний, усредненной по обоим классам молотов (mAP), указаны над соответствующими фотографиями, сделанными на площадке испытаний

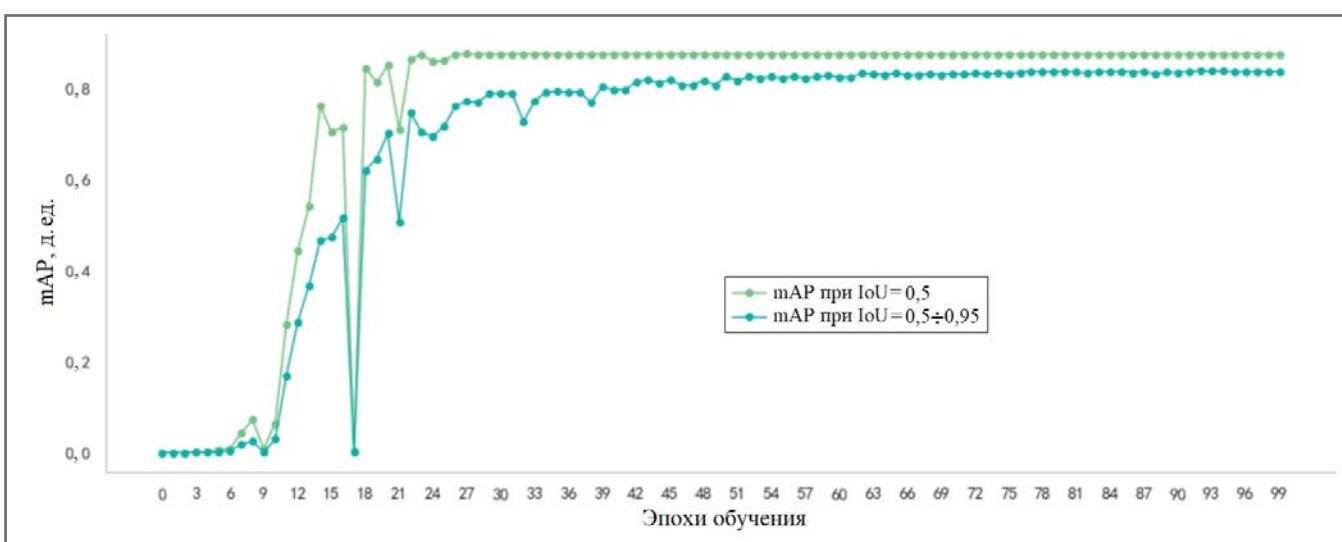


Рис. 5. Динамика качества работы модели на тестовом наборе данных

Результаты экспериментов ►

В данном исследовании для обучения модели распознаванию молотов использовалась описанная выше модифицированная версия алгоритма YOLOv5. Оценка работы модели проводилась на тестовом наборе данных с использованием различных порогов коэффициентов пересечения предсказанной и базовой рамок (IoU), а именно: 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80; 0,85; 0,90; 0,95. Для комплексной оценки качества (надежности и стабильности) модели на

различных уровнях перекрытия спрогнозированных и базовых ограничивающих рамок применялась метрика mAP . На рисунке 4 представлены примеры результатов детекции на тестовом наборе данных.

После 25 эпох обучения (полных проходов модели по всему обучающему набору данных с пересчетом потерь, mAP и других метрик) качество работы модели на тестовом наборе данных вышло на стабильный уровень, как показано на рисунке 5. Следует отметить,

что итоговая модель дала высокое значение mAP , составившее 0,8753 при пороге IoU , равном 0,5. А величина mAP , усредненная для диапазона порога IoU от 0,5 до 0,95, составила 0,8383. Эти результаты говорят о высокой точности распознавания моделью ударов молота.

После детекции положения молота определение того, совершился ли удар (было ли это движением вниз), выполнялось на основе изменения координаты центра молота. Критерий был сле-

дующим: если смещение центра молота вниз превышало 10 единиц по сравнению с предыдущим кадром и это происходило не менее 4 раз за 8 последовательных кадров, то фиксировался один удар (одно нисходящее движение). Чтобы исключить повторный подсчет одного и того же удара, после каждого зарегистрированного удара вводилась пауза длиной в 15 кадров, в течение которой подсчет не выполнялся. Процесс считался завершенным, если в течение 10 минут не было зафиксировано ни одного движения вниз.

Экспериментальные испытания подтвердили эффективность предложенного метода: он может обеспечить точный автоматический подсчет числа ударов молота во время динамических испытаний грунтов методами SPT и DPT при геотехнических изысканиях, позволяя

избежать ошибок в регистрации данных, возникающих при ручном подсчете.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЛАНЫ НА БУДУЩЕЕ ►

В представленном исследовании был усовершенствован алгоритм YOLOv5. В него были введены функция потерь с фокусировкой и метод обучения на сложных примерах в режиме онлайн для использования в процессе обучения нейросети. Этот модифицированный алгоритм был обучен и протестирован на собранном авторами наборе данных по динамическим испытаниям грунтов методами SPT и DPT, в который входили изображения молотов (кадры видеопотоков), что позволило создать надежную модель для детекции этих объектов при подсчетке количества ударов.

Полученные экспериментальные результаты продемонстрировали высокую эффективность улучшенного алгоритма YOLOv5. Средняя точность положительных предсказаний, усредненная по двум исследованным классам молотов (mean Average Precision, mAP), достигла величины 0,838.

Поскольку благодаря постоянно проводимым геотехническим изысканиям продолжают поступать новые видеоданные с площадок испытаний, существующий набор данных по молотам постоянно пополняется и уточняется. Это позволит проводить дальнейшие исследования по оптимизации модели детекции молотов при полевых динамических испытаниях грунтов, а также увеличить охват и эффективность применения методов распознавания разных объектов при геотехнических изысканиях. **И**

Источник для перевода ► (Source for the translation) ►

Mei H., Zhang W., Gu J. The application of artificial intelligence in geotechnical investigation // Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. Vol. 373. Advances in Artificial Intelligence, Big Data and Algorithms. Amsterdam, Netherlands: IOS Press, 2023. P. 263–273. DOI:10.3233/FAIA230818.

Список литературы, использованной авторами переведенной статьи ► (References used by the authors of the translated paper) ►

1. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation // Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2014). 2014. P. 580–587.
2. Girshick R. Fast R-CNN // Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2015. P. 1440–1448.
3. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks // Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2015). 2015. P. 91–99.
4. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection // Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2016). 2016. P. 779–788.
5. Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Fu C.Y., Berg A.C. SSD: Single shot multibox detector // Proceedings of the 2016 European Conference on Computer Vision (ECCV 2016), 2016. P. 21–37.
6. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, faster, stronger // Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2017), 2017. P. 6517–6525.
7. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An incremental improvement // Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2018). 2018. P. 6517–6525.
8. Bochkovskiy A., Wang C.Y., Liao H.Y.M. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection // Proceedings of the 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2020). 2020. P. 10934–10944.
9. Wong B., AbdSalam R., Wong S.H. YOLOv5: A better, faster, stronger object detector // Proceedings of the 2020 International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2020). 2020. P. 1078–1090.
10. Lin T.Y., Maire M., Belongie S., Hays J., Perona P., Ramanan D., Dollar P., Zitnick C.L. Microsoft COCO: Common objects in context. Lecture Notes in Computer Science // Proceedings of the 2014 European Conference on Computer Vision (ECCV 2014). Part V. Lecture Notes in Computer Science. Switzerland: Springer International Publishing, 2014. Vol. 8693. P. 740–755.
11. He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R. Mask R-CNN // Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2017). 2017. P. 2980–2988.
12. Liu X., Wang Z., He Y., Liu Q. Research on small target detection based on deep learning // Tactical Missile Technology. 2019. Vol. 1. P. 100–107.

13. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition // Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2016). 2016. P. 770–778.
14. Liu S., Qi L., Qin H., Shi J., Jia J. Path aggregation network for instance segmentation // Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2018). 2018. P. 8759–8768.
15. Lisi W., Yu Z. Glass bottle mouth defect detection based on YOLOv5 // Yangtze River Information Communication. 2023. Vol. 36. № 1. P. 9–11 (in Chinese).
16. Jiang L., Cui Y. Small object detection based on YOLOv5 // Computer Knowledge and Technology. 2021. Vol. 17. № 26. P. 131–133.
17. Song Y.X., Zhao Y., Zhang J.Y., Zhu W.P., Yang Z.H., Zhang Q. Design of sitting posture monitoring system based on YOLOv5 // FEMT (Frontiers of Electronic Materials). 2023. Vol. 19. № 8. P. 22–25.
18. Lin T.Y., Dollar P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Feature pyramid networks for object detection // Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2017). 2017. P. 936–944.
19. Shrivastava A., Gupta A., Girshick R. Training region-based object detectors with Online Hard Example Mining // Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2016). 2016. P. 761–769.
20. Shi F., Qiu Z., Han Q., Li J., Qian H., Xiang W. Improved faster R-CNN algorithm based on variable weight loss function and hard example mining module // Computer and Modernization, 2020. Vol. 8. P. 56–62 (in Chinese).
21. Lin T.Y., Goyal P., Girshick R., He K., Dollar P. Focal loss for dense object detection // Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2018). 2018. P. 2980–2988.
22. Huang J., Zhang G. A Review of object detection algorithms based on deep convolutional neural networks // Computer Engineering and Applications. 2020. Vol. 56. № 17. P. 12–23.

Независимый электронный журнал

ГеоИнфо

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



WWW.GEOINFO.RU

Организаторы:

ГеоИнфо

— независимый электронный журнал

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



Фото из архива авторов

ОБРАТНАЯ СТОРОНА НЕРАЗУМНОЙ ЭКОНОМИИ НА ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ

ЗАГОРСКИЙ СЕРГЕЙ

Специальный корреспондент журнала «ГеоИнфо», автор телеграм-канала «В грунте по колено» (https://t.me/geotech_crew)

ЩЕРБИНИН СВЯТОСЛАВ

Специальный корреспондент журнала «ГеоИнфо»

АННОТАЦИЯ

Статья наших специальных корреспондентов, которые также являются сотрудниками одной из крупных девелоперских компаний, посвящена давно наболевшей проблеме: попытки сэкономить на инженерных изысканиях и низкий уровень их контроля со стороны инвестора всегда приводят к значительному удорожанию реализации проекта. На основе анализа случаев из практики в разных регионах показано, что разумное повышение стоимости изысканий многократно окупается за счет точного расчета объемов работ и предотвращенных рисков. Ключ к качеству – не высокая цена сама по себе, а грамотно составленное техническое задание, выбор проверенных исполнителей и жесткий контроль качества результатов изысканий, критериями чего являются их обоснованность, требуемая детальность и соответствие потребностям проекта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

инженерные изыскания; инженерно-геологические изыскания; подрядчик; затраты; стоимость; цена; качество.

THE FLIP SIDE OF UNREASONABLE COST-CUTTING ON ENGINEERING SURVEYS

ZAGORSKIY SERGEY

Special correspondent of the "Geoinfo" journal, author of the "Knee-Deep in Soil" telegram channel (https://t.me/geotech_crew)

SHCHERBININ SVYATOSLAV

Special correspondent of the "Geoinfo" journal

ABSTRACT

This paper by our special correspondents, who are also employees of a major development company, addresses a long-standing problem: attempts to save money on engineering surveys and the lack of proper quality control by investors inevitably lead to significant project cost increases. Based on the analysis of case studies from various regions, the authors demonstrate that a reasonable increase in survey costs can pay off many times over through accurate work volume estimation and the prevention of potential risks. The key to quality is not a high price by itself, but a well-prepared technical assignment, the selection of reliable contractors, and strict quality control of survey results, the main criteria for which are their validity, required level of detail, and alignment with project needs.

KEYWORDS:

site investigation; engineering survey, engineering-geological survey; contractor; expenses; cost; price; quality.

ВМЕСТО ВВЕДЕНИЯ ►

Вместо общепринятого типа введения начнем с двух тезисов, которые в то же время можно было бы привести в конце статьи в качестве выводов:

- 1) неразумная экономия на инженерных изысканиях всегда ведет к удорожанию проекта;
- 2) излишняя экономия на инженерных изысканиях может быть оправданной только в том случае, если реальное строительство не планируется.

Далее мы постараемся разъяснить, почему и как мы пришли к таким выводам. Но сначала немного расскажем о себе. Мы – специалисты в области геотехники в структуре крупной девелоперской компании. Суть нашей работы заключается в поиске технических решений, которые попадают под определение «необходимо и достаточно», то есть максимально эффективных решений при выделяемых средствах. Это невозможно реализовать без качественных исходных данных, в первую очередь результатов инженерных изысканий. Когда-то, еще будучи студентами Тюменского государственного архитектурно-строительного университета (который теперь называется Тюменским индустриальным университетом), мы часто слышали такое утверждение: «В Тюмени очень слабые грунты, выше шестнадцати этажей строить технически сложно и дорого». Из-за отсутствия опыта мы принимали это как данность,

но сейчас с уверенностью можем парировать это суждение: «Все зависит от того, кто и как делает инженерные изыскания». Ведь сегодня Тюмень активно развивается – и многие здания, возводимые подавляющим большинством застройщиков, уже достигают высоты 75 м (до 25 этажей). Есть и рекордсмены – жилые дома высотой более 100 м (33 этажа).

Мы рассмотрим несколько интересных примеров работы с изыскательскими организациями из разных регионов нашей страны. Конкретные города, площадки и подрядчиков называть не будем по понятным причинам. Однако приведенной информации будет достаточно, чтобы получить представление о том, как благодаря качественным изысканиям инвестору удается сэкономить значительные суммы, кратно превышающие увеличение затрат при основанном выборе более «дорогого» подрядчика по сравнению с «дешевым». Однако следует пояснить, что качественные инженерные изыскания не обязательно будут стоить выше среднего, поэтому обязательно надо решать проблемы постановки конкретных требований, выбора проверенных подрядчиков и контроля качества их работы. Под качественными (результатами) изысканий мы имеем в виду следующее. Они должны быть: обоснованными, то есть корректно определенными и верифицированными (досто-

верными); подробными, то есть достаточными для проектирования, без «серых» зон; соответствующими требованиям проекта, то есть должно быть определено именно то, что нужно, и в том объеме, который требуется для проектирования конкретного объекта.

Теперь перейдем к рассмотрению случаев из практики.

О ПРИЧИНАХ СМЕНЫ ПОДРЯДЧИКА ПО ИЗЫСКАНИЯМ ►

Было запланировано строительство высотного жилого комплекса с большим количеством секций высотой до 120 м, которые характеризовались глубокой подземной частью, наличием стилобата и сложными конструктивными решениями надфундаментной части. Мы понимали: чтобы сделать проектные решения эффективными, на этой площадке не обойтись без параметров нелинейной модели упрочняющегося грунта Hardening Soil и учета истории нагружения.

Подрядчик, который выполнил инженерно-геологические изыскания за сравнительно небольшие деньги (будем его условно называть «дешевым»), выдал отчет, вызвавший сомнения в достоверности представленных в нем результатов. Подлог был замечен на этапе проверки параметров грунтов для модели упрочняющегося грунта: часть данных отсутствовала, а паспорта испы-

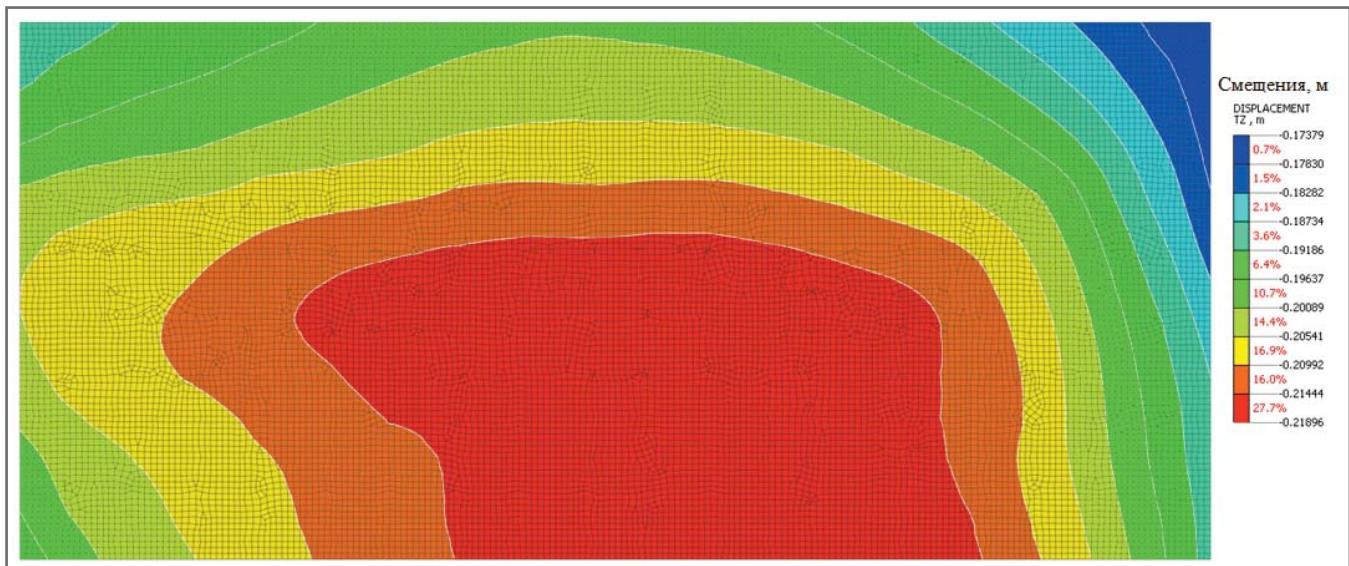


Рис. 1. Из материалов изысканий «дешевого» подрядчика: картина деформирования фундаментной плиты одной из высотных секций жилого комплекса по результатам расчетов на модели Мора – Кулона. Среднее значение осадок под ее фундаментом – 17,38 см

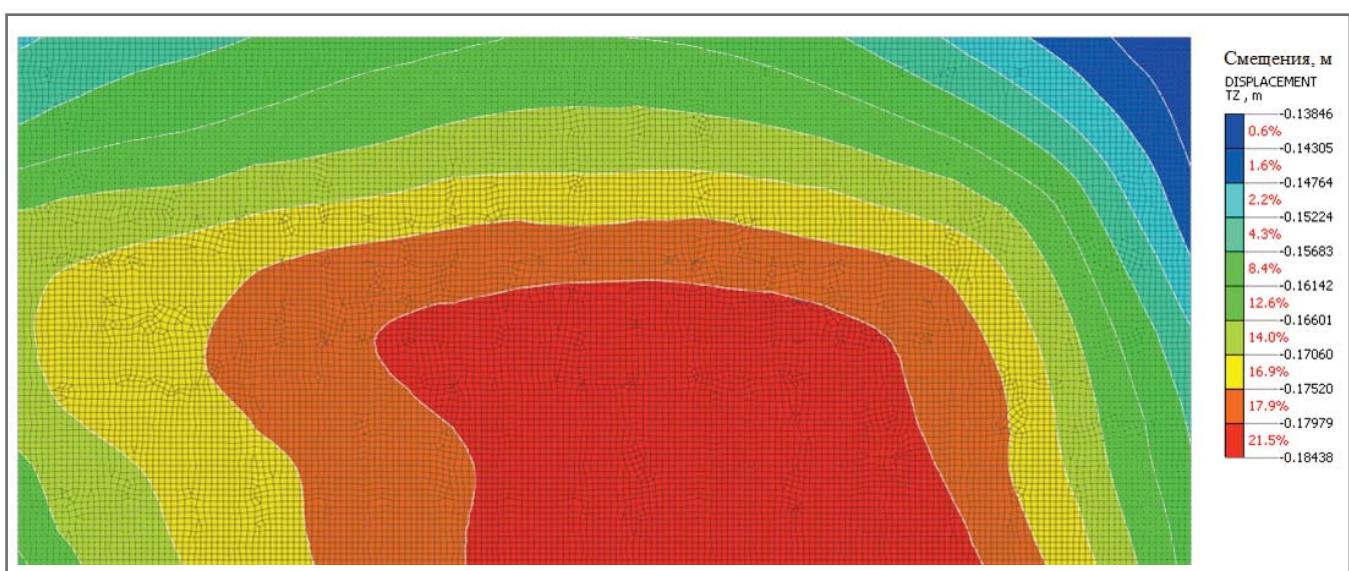


Рис. 2. Из материалов изысканий «дорогого» подрядчика: картина деформирования фундаментной плиты высотной секции по результатам расчетов на модели Мора – Кулона. Среднее значение осадок под ее фундаментом – 13,84 см

таний образцов были «нарисованы». После этого был привлечен другой подрядчик за более высокую цену (будем его условно называть «дорогим»), к результатам работ которого замечаний не возникло.

На рисунках 1–3 для примера приведены картины распределения осадок грунтового основания одной и той же высотной секции, полученные обоими подрядчиками. В результате требуемый объем армирования фундаментной плиты под этой секцией на основе данных «дешевого» подрядчика при использовании модели Мора – Кулона оказался на 25% больше, чем на основе данных «дорогого» подрядчика в случае применения той же модели, и на 49% больше при использовании модели упрочняю-

щегося грунта. Еще более впечатляюще выглядит разница в массе: перерасход арматуры на основе результатов изысканий «дешевого» подрядчика составил более 5 т для фундаментной плиты только одной высотной секции!

Отметим, что в отчетах обоих подрядчиков инженерно-геологические разрезы имели высокую сходимость в верхней половине и явные различия в нижней. Это может свидетельствовать о том, что «дешевый» подрядчик выполнил полевые работы на всю необходимую глубину не во всех указанных в отчете точках или же проводил бурение ускоренными методами, которые не позволили качественно отобрать образцы грунта и на этой основе корректно выделить слои.

В таблице 1 сопоставлены затраты на технические решения по фундаменту только одной высотной секции на основе результатов изысканий, полученных двумя рассматриваемыми подрядчиками. При этом следует не забывать, что в проект входило еще с полдюжины секций разной этажности. Если все это суммировать, то получится весьма впечатляющая разница в стоимости технических решений на основе данных «дешевого» и «дорогого» исполнителей.

Почему так случилось? Во-первых, «дешевый» подрядчик решил сэкономить на изысканиях и, вероятно, поэтому часть дорогостоящих испытаний, необходимых для определения параметров нелинейной модели упрочняющегося грунта, выполнил «карандашом». Во-

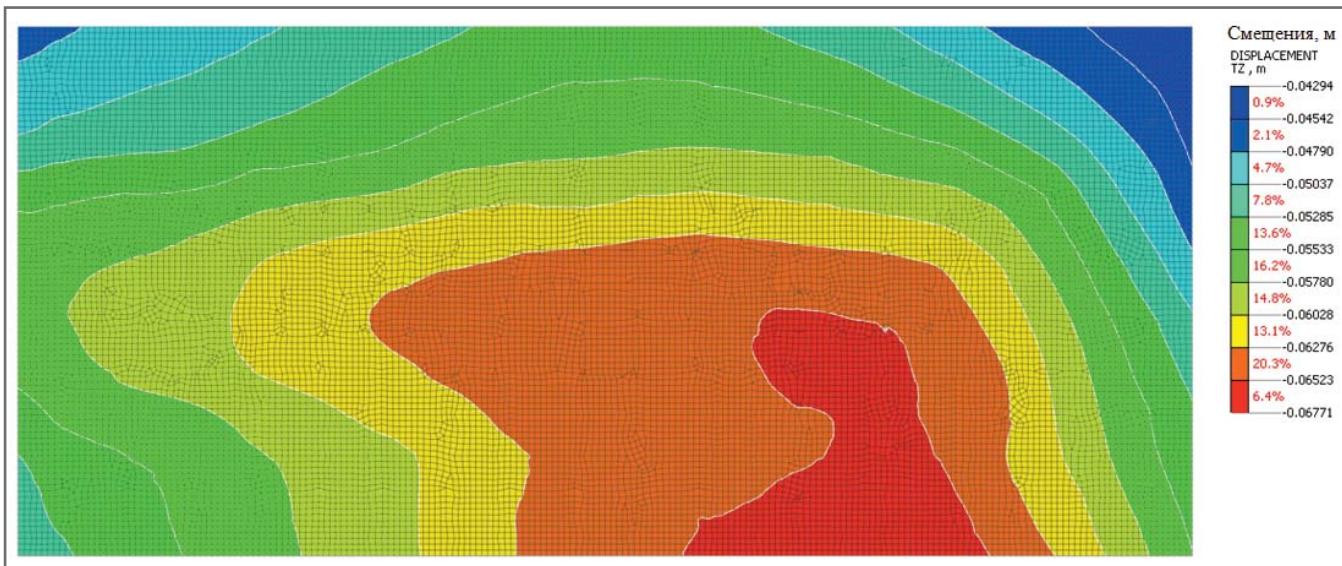


Рис. 3. Из материалов изысканий «дорогого» подрядчика: картина деформирования фундаментной плиты высотной секции по результатам расчетов на модели упрочняющегося грунта (Hardening soil). Среднее значение осадок под ее фундаментом – 4,29 см

Таблица 1. Приблизительные затраты на технические решения по фундаменту одной высотной секции на основе результатов изысканий двух подрядчиков

Подрядчик	Стоимость изысканий, тыс. руб.	Стоимость технических решений, тыс. руб.	Общая стоимость, тыс. руб.	Дополнительный неучтенный эффект
«Дешевый»	9 600	64 284,0	73 884,0	Увеличение армирования каркаса
«Дорогой»	16 900	25 338,5	42 238,5	–

вторых, проведенные им испытания для определения прочностных и деформационных характеристик грунтов не соответствовали требованиям СП и ГОСТ, а образцы с глубин более 15 м были отобраны с нарушениями.

О НЕОБХОДИМОСТИ ПРИВЛЕЧЕНИЯ ОСОБО ОПЫТНОГО И ДОБРОСОВЕСТНОГО ПОДРЯДЧИКА ПО ИЗЫСКАНИЯМ ►

Когда мы приступили к работе на площадке строительства высотных (до 100 м) жилых домов на свайных фундаментах, мы уже имели опыт работы на ней и знали о сомнительных результатах инженерно-геологических изысканий подрядчика, выполненных сравнительно недорого (будем его также называть «дешевым»). Поэтому мы понимали, что к проведению изысканий для строительства указанных объектов там надо привлечь другого исполнителя. Был выбран опытный и имеющий хорошую репутацию подрядчик, хотя и за более высокую цену (будем называть его «дорогим»).

На характерных инженерно-геологических разрезах, приведенных на ри-

сунке 4, можно заметить, насколько более подробным является напластование на разрезе «дорогого» подрядчика (см. рис. 4, б) по сравнению с результатом работы более «дешевого» (см. рис. 4, а).

Не будем вдаваться в подробности в отношении различий в физико-механических характеристиках грунтов, представленных в отчетах этих подрядчиков. Отметим лишь, что «дешевый» провел изыскания халатно: полученные им прочностные и деформационные характеристики грунтов с глубиной не увеличивались, хотя в действительности это оказалось не так, что подтвердил «дорогой» подрядчик. То есть работы «дешевого» исполнителя были выполнены лишь в том минимальном объеме, при котором уже была бы возможность пройти не самую требовательную экспертизу. Из-за такого подхода увеличение длины свай при проектировании не помогло бы уменьшить расчетные осадки – и сваи получились бы «до центра Земли».

В таблице 2 сопоставлены затраты на технические решения по фундаменту одного из жилых домов, строительство которых планировалось на рассматриваемой площадке, на основе результатов

изысканий, полученных этими двумя подрядчиками. Разница только для одного дома составила более 150 млн руб. при разнице в стоимости изысканий менее 8 млн руб.! Более того, в представленных в таблице числах не были учтены прочие факторы, повышающие стоимость строительства фундамента и усложняющие последующую эксплуатацию здания. Не представлена и разница в затратах на возведение надфундаментной части. Но очевидно, что общая разница в стоимости строительства всех планированных домов целиком была бы огромной.

Почему так произошло в данном случае? Дело в том, что «дешевый» подрядчик позволил себе реже отбирать образцы грунта для последующих испытаний и в результате получил минимальное разделение грунтового основания на слои. Более того, он дополнительно уменьшил объем полевых работ за счет объединения слоев грунта в верхней и нижней частях разреза, несмотря на их разный генезис. К тому же не провел часть необходимых работ по бурению за счет выполнения более дешевых полевых исследований методом статического зондирования. Отбор об-

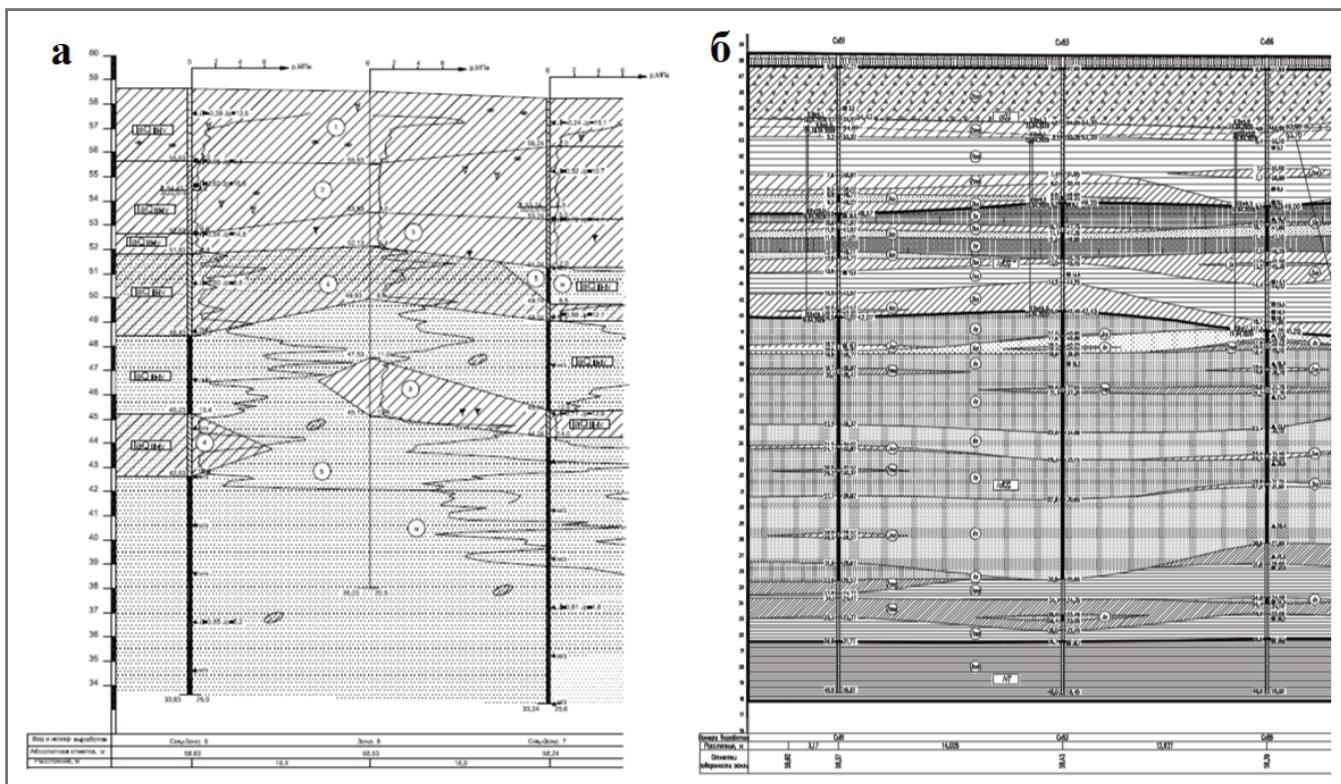


Рис. 4. Примеры характерных инженерно-геологических разрезов площадки, построенных «дешевым» (а) и «дорогим» (б) подрядчиками

Таблица 2. Приблизительные затраты на технические решения по фундаменту одного из жилых домов на основе результатов изысканий двух подрядчиков

Подрядчик	Стоимость изысканий, тыс. руб.	Стоимость технических решений, тыс. руб.	Общая стоимость, тыс. руб.	Дополнительные неучтенные эффекты
«Дешевый»	2 000	343 290	345 290	Увеличение армирования каркаса, увеличение габаритов фундаментов из-за большого количества свай, что приводит к уменьшению числа машиномест в паркинге на 150, переносу существующих инженерных сетей и проездов
«Дорогой»	10 500	181 962	192 462	–

разцов грунта выполнялся с нарушениями, что привело к занижению их прочностных и деформационных характеристик. И наконец, этот подрядчик привел в отчете заниженные прочностные и деформационные характеристики грунтов ввиду некорректной интерпретации требований ГОСТ и СП в части проведения испытаний и обработки результатов из-за отсутствия требуемого оборудования и компетенций.

О ПРИЧИНАХ ПЕРЕРАСХОДОВ ИЗ-ЗА НЕВОЗМОЖНОСТИ ЗАМЕНИТЬ НЕДОБРОСОВЕСТНОГО ПОДРЯДЧИКА ПО ИЗЫСКАНИЯМ ►

Интересен также пример работы на площадке будущего строительства вы-

сотного комплекса с секциями высотой до 75 м на свайном фундаменте при сложном рельефе и присутствии в разрезе слоев и дисперсных грунтов, и скальных пород. Это был новый для нас регион с незнакомыми инженерно-геологическими условиями. Подрядчиков этого региона мы также не знали – и приходилось выбирать исполнителей изысканий по рекомендациям непрофильных специалистов.

На этом объекте возникла масса проблем с отчетом по инженерно-геологическим изысканиям, но ввиду сжатых сроков повторные исследования не были выполнены. И мы продолжали работать с тем же подрядчиком, но в итоге результаты его работ привели к удорожанию проекта и потере потенциальной прибыли.

Начнем с первых замеченных признаков будущих осложнений, которые дали понять, что подрядчик не выполняет весь объем работ честно. Во-первых, бурение было проведено в точках, не соответствовавших схеме их расположения, координаты и высотные отметки устьев скважин отсутствовали, что было критично для той площадки со сложными условиями. В результате границы между слоями грунтов и уровни подземных вод на инженерно-геологических разрезах получились волнообразными, следовавшими за рельефом (рис. 5). Во-вторых, после бурения дополнительных скважин была получена отличающаяся картина напластования слоев, причем даже для скважин, расположенных вблизи пробуренных ранее. В-третьих, часть прочностных и деформационных

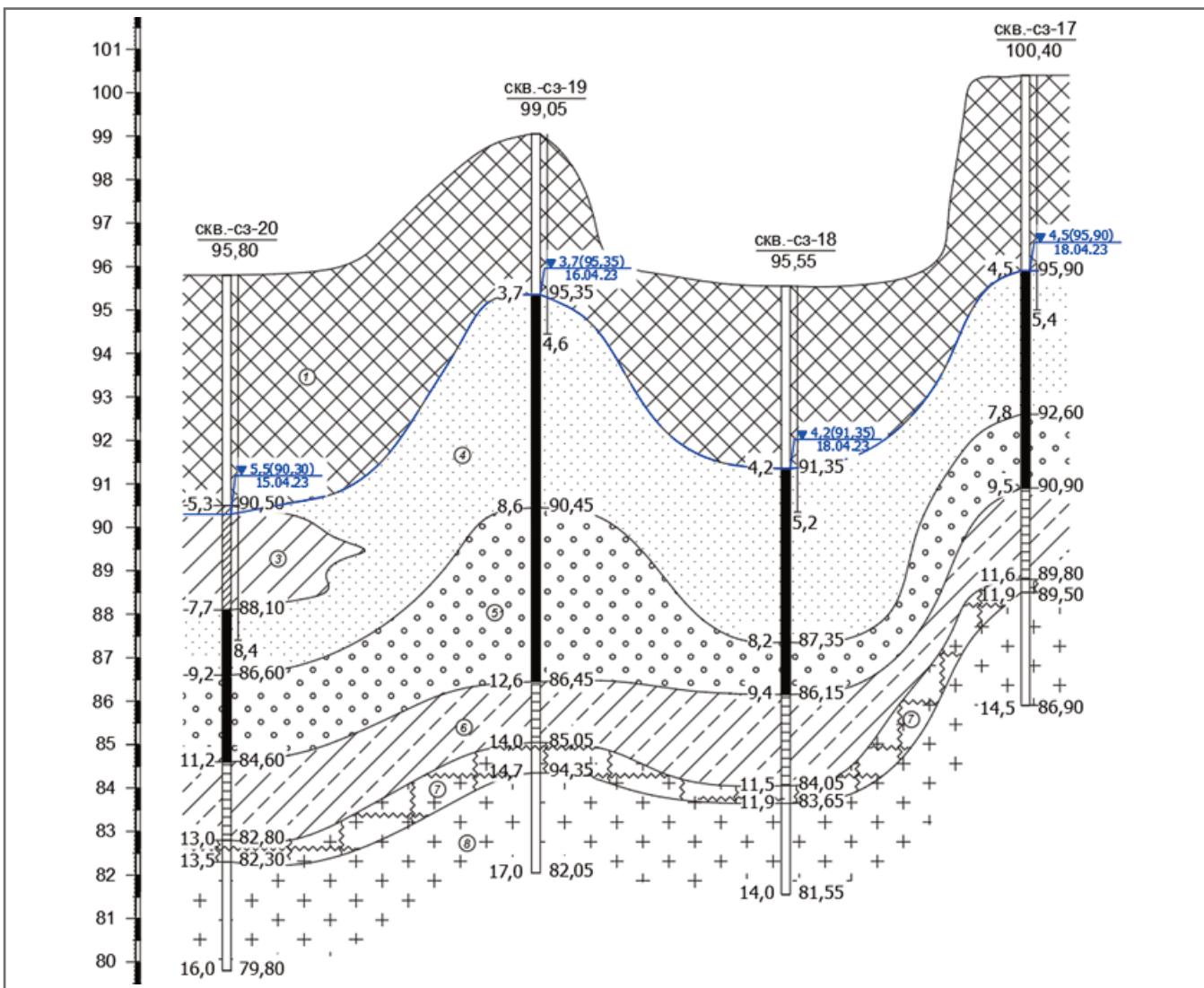


Рис. 5. Слои грунтов и уровни подземных вод, следующие за рельефом

характеристик грунтов в представленных поначалу результатах изысканий отсутствовала, а когда эти характеристики по нашему требованию включили в отчет, они, как оказалось впоследствии, были сильно заниженными.

В конечном счете мы столкнулись с тем, что пришлось уменьшить количество машиномест в подземном паркинге ввиду невозможности запроектировать адекватные решения по ограждению котлована с изначальным контуром здания. Кроме того, буронабивные сваи были по-всеместно выполнены с недопогружениями на 1–5 м. Это свидетельствует о некорректном определении подрядчиком расположения кровли скальных грунтов.

У нас также возникло недоверие к прочностным и деформационным характеристикам инженерно-геологических элементов, представленным в отчете. И действительно, соотношение несущей способности свай по материалу самих этих конструкций и по грунту оказалось иным в ходе реализации про-

екта и проведения необходимых дополнительных испытаний.

Вызвали недоумение и результаты гидрогеологических исследований подрядчика, на основе которых планировались работы по созданию закрытого контура из грунтоцементных колонн и по откачке подземных вод. Поэтому при реализации проекта решили рискнуть и не предпринимать никаких мер по водонаполнению до откопки котлована – и не прогадали, поскольку водонаполнение действительно не потребовалось.

Благодаря анализу регионального опыта и выполнению опытных работ мы смогли добиться значительного снижения стоимости строительства фундамента за счет следующих мер: мы исключили работы по устройству противовфильтрационной завесы (что дало экономию в 300 млн руб.); оптимизировали устройство свайного поля (с экономией 25 млн руб.); оптимизировали ограждение котлована (с экономией около 51 млн руб.).

При этом следует отметить, что были и негативные последствия недобросовестных изысканий, которые не удалось предупредить: как уже отмечалось, пришлось уменьшать количество машиномест в подземном паркинге, а также были понесены затраты на повторное проектирование.

КАК ПОВТОРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ ВЫЯВИЛИ НЕОБХОДИМОСТЬ ПЕРЕПРОЕКТИРОВАНИЯ ►

В рассматривавшемся выше регионе со сложным рельефом и присутствием в разрезе слоев дисперсных и скальных пород была куплена площадка для строительства здания на свайном фундаменте с почти законченными инженерными изысканиями и начатым проектированием. Однако указанные изыскания проводились тем же подрядчиком, о котором шла речь в предыдущем примере (будем называть его «дешевым»). Когда на руках еще не было результатов его работ, было ини-

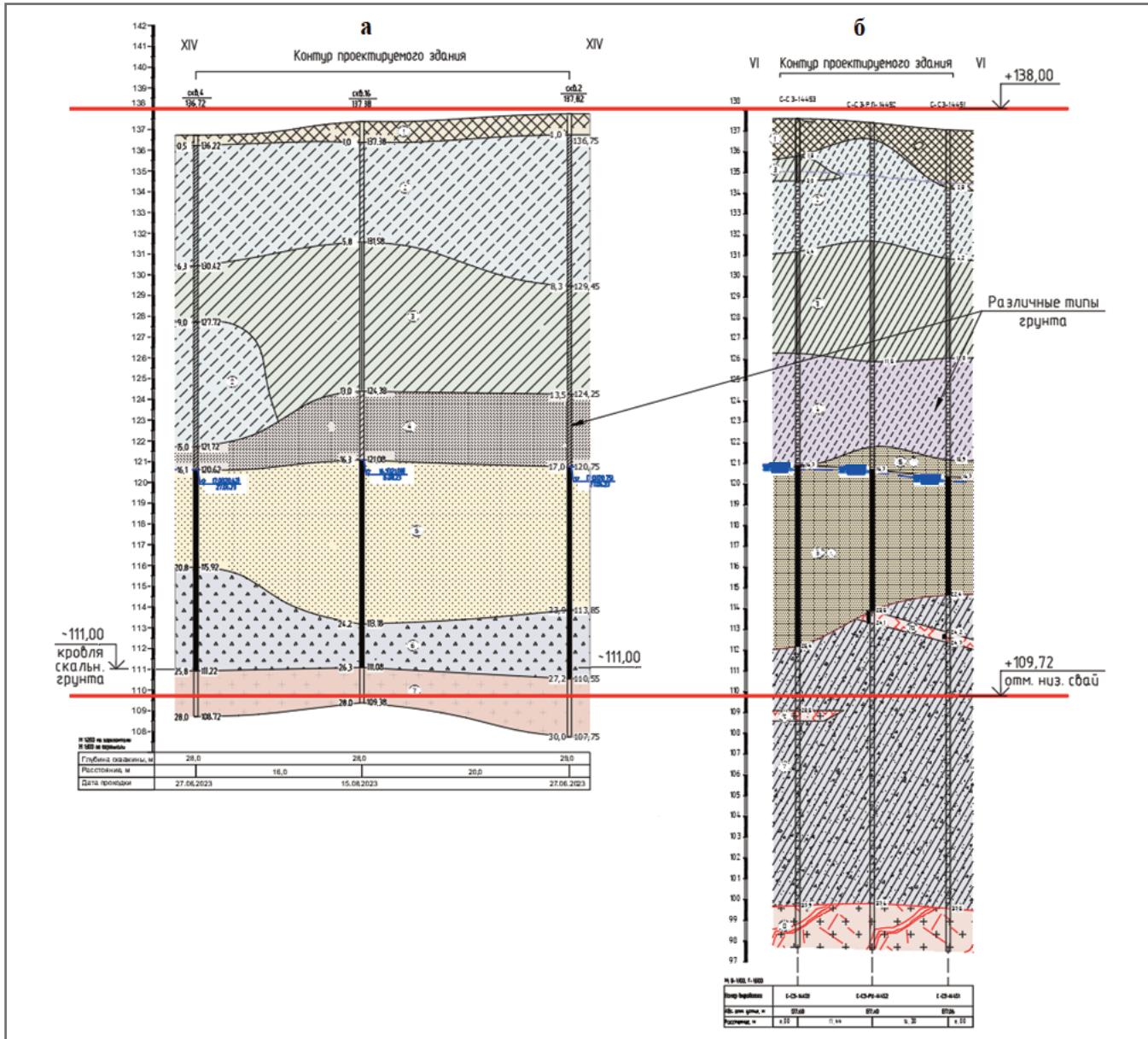


Рис. 6. Сопоставление инженерно-геологических разрезов по данным «дешевого» (а) и «дорогого» (б) подрядчиков

цировано перепроектирование запустили дополнительные работы по изысканиям.

При получении отчета «дешевого» подрядчика стало понятно, что представленные в нем результаты непригодны для дальнейшего проектирования. И мы настояли на повторных изысканиях силами другого подрядчика за более высокую цену (будем называть его «дорогим»).

Различий в отчетах этих двух исполнителей было много. Но наиболее важным было следующее: «дорогой» подрядчик определил, что кровля скального грунта находится примерно на 10 м ниже, чем по данным «дешевого» (рис. 6). Отметим, что у нас не было сомнений в том, что «дорогой» подрядчик выполнил свои работы корректно, поскольку на тот момент мы усовершен-

ствовали свои подходы в части верификации результатов изысканий и этим кратко усложнили возможность «рисовать» данные в отчетах. Таким образом, нижние концы запроектированных по данным «дешевого» подрядчика свай в реальности оказались бы уже не в скальных, а в элювиальных суглинистых грунтах, модуль деформации которых в сотни раз меньше.

Поскольку на основе отчета «дешевого» исполнителя не было полностью выполнено проектирование с всеобъемлющими расчетами и последующими испытаниями, сейчас было бы слишком трудоемко оценивать в денежном эквиваленте, насколько дешевле или дороже стали бы решения из-за недобросовестных изысканий. Но можно точно сказать, что технические решения не соответствовали бы инженерно-

геологическим условиям площадки: изменилась бы рассчитанная несущая способность свай (возможно даже, что запроектированного количества свай оказалось бы недостаточно); осадки здания приблизились бы к расчетным значениям или превысили бы их, что напрямую сказалось бы на армировании и могло бы привести к образованию трещин и необходимости в усилении каркаса; впоследствии понадобилось бы дорогостоящее усиление фундаментов здания; пришлось бы проводить обследование и перепроектирование. Оценочно можно сказать, что если бы проект был разработан на основе данных «дешевого» подрядчика, то на дальнейшее усиление и приведение здания в состояние, соответствующее нормативным документам, потребовалось бы не менее 150 млн руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Рассмотренные в статье примеры ясно говорят о нескольких взаимосвязанных причинах некачественно выполненных изысканий.

1. Нежелание заказчиков платить за качественные исходные данные для проектирования. Следует отметить, что это относится не только к инженерным изысканиям для строительства, это повсеместная история, где требуются какие угодно компетенции. Приведем простой пример из жизни. Вы хотите сделать ремонт у себя в квартире и выбираете для этого бригаду. Дилетанты обещают выполнить работы гораздо дешевле, чем профессионалы со своим оборудованием и гарантиями. Если ремонт сделают первые, то есть риск, что у вас потом сгорят розетки и будут затоплены соседи. Если профессионалы, то вы будете уверены, что все инженерные коммуникации будут работать штатно. Так какой следует сделать выбор?

2. Нежелание подрядчика или отсутствие возможности выполнить изыскания качественно. Исторически сложилось так, что изыскательские организации стремятся сделать работы по минимуму, предусмотренному нормативно-техническими документами. Такая ситуация во многом является следствием существующей системы «эффективного менеджмента» и проведения тендеров. В то же время вполне естественно, что все участники процесса хотят получить экономическую выгоду. И это само по себе не является негативным фактором, а, напротив, свидетельствует о наличии спроса на рынке. Однако заказчик должен объяснить потенциальному подрядчику, что выполнить работу лишь «для галочки» недопустимо и что современная конкуренция в отрасли определяется не ценой, а уровнем профессионализма.

3. Отсутствие контроля и должной приемки работ. Штат «эффективных менеджеров» есть уже почти в каждой организации, однако практически по-

всеместно наблюдается нехватка квалифицированных профильных специалистов. Это приводит в том числе к тому, что у заказчиков нет возможности составить или проверить техническое задание, выполнить проверку готового отчета по изысканиям. Между тем контроль качества изыскательских работ – это право заказчика, которым необходимо пользоваться.

4. Подрядчик не несет ответственности за ваши проблемы. Инженерно-геологические изыскания представляют собой область, в которой неизбежно присутствует элемент субъективной интерпретации полученных данных. Поэтому получить полностью идентичные отчеты от двух разных подрядных организаций практически невозможно. В то же время большинство заказчиков, как правило, не стремится к судебным разбирательствам с подрядчиками, некачественно выполнившими работы, поскольку это требует значительных ресурсов и сопровождается нежелательным публичным резонансом. Дополнительным фактором риска служит возможность внезапного банкротства исполнителя.

Конечно, на перечисленное выше можно возразить, что число подрядных изыскательских организаций относительно невелико, к тому же определить реальный уровень их компетентности и надежности на стадии заключения договора зачастую бывает непросто. Но все же важно понимать, что на рынке есть не только надежные крупные изыскательские организации с хорошей репутацией и значительным портфелем заказов, услуги которых стоят дорого, но и небольшие компании, среди которых также нередко встречаются квалифицированные и ответственные исполнители, готовые выполнять работы качественно и в установленные сроки, причем за меньшие деньги. И для правильного выбора прежде всего необходимо выстроить эффективную систему работы с договорной документа-

цией – техническим заданием, условиями контракта и оценкой потенциальной подрядной организации по ее техническому оснащению и квалификации персонала. В качестве альтернативы можно привлечь независимого опытного инженера-геолога или геотехника либо соответствующую специализированную организацию для научно-технического сопровождения проекта.

Некоторые могут возразить, что выполнение данных рекомендаций приведет к тому, что проектирование будет обходиться для заказчика дороже. Отчасти это действительно так, но мы хотим подчеркнуть необходимость целенаправленного инвестирования именно в НИОКР (научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, англ. – Research & Development, R&D), куда входят в том числе инженерные изыскания, проектирование и повышение компетенций. При этом речь не идет о привлечении подрядчиков исключительно «верхнего ценового сегмента»: по нашему опыту, разница в ценах на выполнение изысканий «хорошими» и «плохими» подрядчиками часто оказывается незначительной.

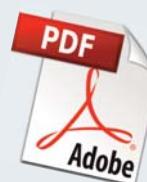
Важно не забывать, что изыскания, проектирование и строительство – это звенья одной цепи. Чем качественнее будут результаты изысканий, тем более прогнозируемым и экономным будет строительство. Это особенно актуально в нынешнее время, когда строительство обходится чрезвычайно дорого и получить положительный коэффициент возврата инвестиций (ROI, Return on Investment) становится непростой задачей.

Теперь еще раз повторим то, с чего начали:

- 1) неразумная экономия на инженерных изысканиях всегда ведет к удорожанию проекта;
- 2) излишняя экономия на инженерных изысканиях может быть оправданной только в том случае, если реальное строительство не планируется. **И**

ГеоИнфо

WWW.GEOINFO.RU



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



Источник фото: ГеоИнфо

МАЛЫМ РЕКАМ ЮГА РОССИИ НЕ ХВАТАЕТ СИЛЫ ПОЛОВОДЬЯ

ДЬЯЧЕНКО ЛЮДМИЛА

Специальный корреспондент

АННОТАЦИЯ

17 сентября 2025 года в Ростове-на-Дону прошел круглый стол «О сохранении и использовании малых рек в условиях маловодья», организованный Южным федеральным университетом (ЮФУ) и Министерством природных ресурсов и экологии Ростовской области. В нем приняли участие ученые из ЮФУ, Южного научного центра Российской Академии наук (ЮНЦ РАН), другие специалисты в области гидрологии, экологии и климатологии, представители власти Ростовской области, ЛНР и ДНР, а также представители соответствующих профильных служб.

Ученые ЮНЦ РАН и Института наук о Земле ЮФУ рассказали об исследованиях водоемов Ростовской области и Приазовья, которыми сейчас занимаются.

Как сообщил директор Института наук о Земле и модератор круглого стола Андрей Кузнецов, периоды маловодья цикличны. Раньше они были короче и продолжались 10–15 лет. Нынешний такой период длится уже 20 лет. Сказываются изменения климата и хозяйственная деятельность человека.

За пересыхающими малыми реками, мелеющими большими реками Дон и Кубань, Таганрогским заливом и всем Азовским морем постоянно ведутся научные наблюдения. Специалисты ищут объяснения причин маловодья и генерируют идеи. Для реализации их предложений необходимо участие представителей власти, распоряжающихся финансовыми ресурсами. С этой целью и был организован вышеназванный круглый стол.

«Нам необходимы рекомендации научного сообщества, связанные с водными ресурсами, чтобы выполнить краткосрочное и долгосрочное планирование. Мы ограничены рамками бюджета, не можем расходовать больше и обязаны тратить рационально деньги, которые выделяются», – прокомментировал ситуацию министр природных ресурсов и экологии Ростовской области Михаил Фишкин.

Из данной статьи вы узнаете: какие исследования проводили ученые в Ростовской области, Краснодарском крае и других регионах Приазовья; каковы прогнозы по изменениям климата и водности рек до 2054 года; чем похожи и чем различаются три климатических сценария; почему нельзя чистить все малые реки, даже если этого усиленно требуют экологические активисты; почему идеи, высказанные чиновниками регионального и федерального уровней, могут быть сомнительными.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

юг России; Приазовье; Ростовская область; малые реки; изменения климата; аридизация; маловодье; загрязнение рек.

SMALL RIVERS IN SOUTHERN RUSSIA LACK THE SPRING FLOOD STRENGTH

D'YACHENKO LYUDMILA

Special correspondent

ABSTRACT

On September 17, 2025, a round table titled "On the Preservation and Use of Small Rivers under Low-Water Conditions" was held in Rostov-on-Don. The event was organized by the Southern Federal University (SFedU) and the Ministry of Natural Resources and Environment of the Rostov Region. Participants included scientists from SFedU and the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (SSC RAS), other experts in hydrology, ecology, and climatology, as well as representatives of the authorities of the Rostov Region, the Luhansk and Donetsk People's Republics, and relevant specialized agencies. Researchers from the SSC RAS and the Institute of Earth Sciences of SFedU presented their ongoing studies of water bodies in the Rostov Region and the Azov area.

According to Andrey Kuznetsov, director of the Institute of Earth Sciences and moderator of the round table, low-water periods are cyclical. Previously, they lasted 10–15 years, but the current low-water period has already continued for 20 years. This situation is influenced by climate change and human economic activity.

Small rivers that are drying up, the shallowing of major rivers such as the Don and Kuban, and the conditions of the Taganrog Bay and the entire Sea of Azov are being constantly monitored by scientists. Experts are seeking explanations for the causes of low-water conditions and are generating ideas for possible solutions. To implement their proposals, the involvement of government representatives, who are responsible for financial resources, is essential. It was for this purpose that the above-mentioned round table was organized.

"We need recommendations from the scientific community concerning water resources in order to ensure both short-term and long-term planning. We are constrained by budget limits and must spend the allocated funds rationally," commented Mikhail Fishkin, Minister of Natural Resources and Environment of the Rostov Region.

This article covers: the research conducted by scientists in the Rostov Region, the Krasnodar Territory, and other parts of the Azov area; forecasts of climate and river flow changes up to 2054; similarities and differences between three climate scenarios; why it is not always appropriate to clean all small rivers despite environmental activists' demands; and why some proposals voiced by regional and federal officials may be questionable.

KEYWORDS:

southern Russia; Azov region; Rostov Region; small rivers; climate change; aridification; low-water conditions; river pollution.

ПОЧЕМУ РЕКАМ БАССЕЙНА АЗОВСКОГО МОРЯ НА ЮГЕ РОССИИ СТАЛО НЕ ХВАТАТЬ ВОДЫ ►

В Ростовской области насчитывается порядка 4600 разных водоемов. Они в том числе питаются подземными водами, атмосферными осадками, но главным источником их силы всегда было весенне-половодье. Это особенно касается малых рек и ручьев, чья площадь водосбора является ограниченной. По-

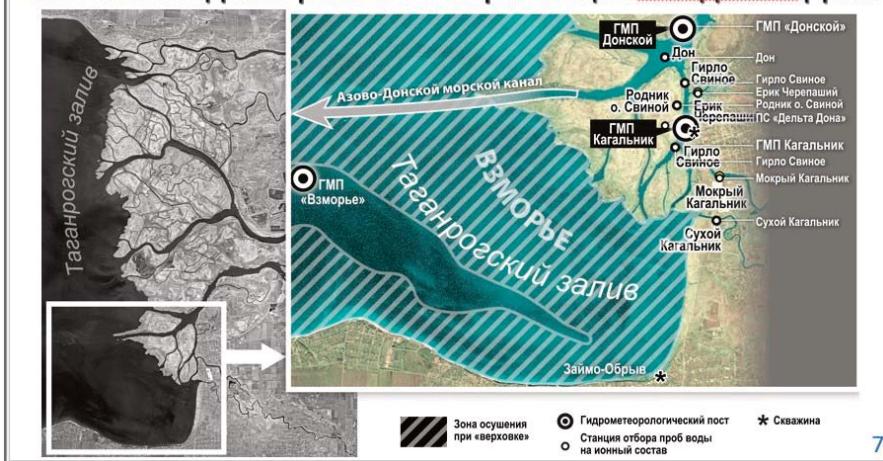
ловодье давало им до 50–70% общего количества влаги.

Паводков давно не было. В этом году вода поднималась только на севере региона на 30–70 см, констатировала и.о. начальника Ростовского гидрометцентра Виктория Антоненко. Запасы подземных вод тоже уменьшаются, потому что зимы малоснежные, снег быстро тает из-за резкого повышения температуры и влага в земле не накапливается.

В 1940-х годах реки Дон и Кубань ежегодно приносили в Азовское море 50 км³ воды, а с 2015 года – только 11–12 км³, то есть меньше в пять раз, как сообщил заведующий лабораторией многофункционального мониторинга периодически пересыхающих акваторий юга России ЮНЦ РАН Клим Григоренко.

Изменился и химический состав водоемов. Круглогодично при понижении уровня воды в южных рукавах дельты Дона происходит замена распесненных

Схема наблюдения режима минерализации авандельты Дона



вод смешанного состава на минерализованные. Ранее воды Дона характеризовались кальциево-карбонатным составом. В последние годы выросла доля ионов натрия и сульфат-ионов.

Иными словами, Азовское море, которое до середины XX века было относительно пресным, постепенно становится все более соленым. А соленые морские воды регулярно попадают в системы водоснабжения населенных пунктов.

Единого представления о системе циркуляции и, соответственно, о механизмах перемешивания вод, поступающих в Азовское море, не существует. Можно только предположить, что все это в комплексе – результат аридизации климата, усилившегося испарения, попадания в море воды повышенной минерализации из рек.

Следует отметить, что воду из природных источников с высокой минерализацией не рекомендуется употреблять в пищу.

лизацией не рекомендуется использовать для питья, сельскохозяйственных целей и рыбоводства.

КАК ЧЕЛОВЕК ВЛИЯЕТ НА СОСТОЯНИЕ ВОДОЕМОВ ►

Помимо проблемы маловодья участники круглого стола разобрали вопросы минерализации водоемов, растущей из-за деятельности человека.

Малые реки, как подчеркнул заведующий кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии Института наук о Земле ЮФУ Григорий Скляренко, являются первичным звеном в формировании водных ресурсов крупных рек, озер и морей. Они аккумулируют воду из атмосферных осадков, подземных водоносных горизонтов и родников, служат кормовой базой для молоди многих видов рыб, которая потом уходит в крупные реки.

Вода в малых реках Ростовской области, по данным Росгидромета, в период с 2020 по 2024 год оценивалась по качеству как «грязная». Судя по достигнутому содержанию ионов магния и сульфат-ионов, это произошло в результате попадания в реки шахтных вод. Дело в том, что в постсоветские годы в области ликвидировали порядка 50 угольных шахт «мокрым» способом, то есть перестав откачивать из них воду, которая в конце концов их затопила и теперь местами даже выходит на поверхность.

Сельскохозяйственная деятельность – следующий источник загрязнения природных водоемов. Из-за применения удобрений на полях в малых реках превысились предельно допустимые концентрации биогенных и органических веществ. Распашка земель также приводит к водной эрозии почвенного покрова, реки заливаются, вода в них «зачаствает».

И эта ситуация продолжает усугубляться, что еще раз подтвердили специалисты ЮНЦ РАН, которые весной 2025 года провели исследования в рамках проекта Русского географического общества «География малых рек и лиманов Приазовья: трансформация и экологические проблемы в условиях маловодья».

Разговор продолжил директор филиала «Южный» Всероссийского научно-исследовательского института «Экология» Роман Кишкань. Он показал фотографии рек и каналов в Херсонской и Запорожской областях, пересохших в результате ликвидации Ка-

Качество воды малых рек Ростовской области в современный период

Река	Пункт	Степень загрязнения	Критические показатели загрязненности
прот. Аксай	ниже г. Новочеркасск	Грязная	Сульфаты
р. Большая Каменка	ниже с. Верхнегерасимовка	Грязная	Сульфаты
р. Большая Каменка	устье	Грязная	Сульфаты
р. Большой Егорлык	выше с. Новый Егорлык	Грязная	
р. Большой Несветай	выше с. Гребцово	Очень грязная	Сульфаты, магний
р. Быстрая	ниже х. Анапаскин	Грязная	
р. Глубокая	в черте г. Каменск-Шахтинский	Грязная	Сульфаты
р. Глубокая	ниже г. Миллерово	Очень грязная	Сульфаты, аммонийный азот
р. Грушевка	устье	Грязная	Сульфаты, нитритный азот
р. Калитва	в черте г. Белая Калитва	Грязная	
р. Калитва	выше с. Раздолье	Грязная	
р. Кундрючья	в черте г. Красный Сулин	Грязная	Сульфаты, нитритный азот
р. Кундрючья	устье	Грязная	Сульфаты, нитритный азот
р. Средний Егорлык	ниже г. Сальск	Очень грязная	Сульфаты, магний
р. Тузлов	выше с. Несветай	Грязная	Сульфаты, магний
р. Тузлов	ниже г. Новочеркасск	Грязная	Сульфаты

(Составлено по данным ФГБУ «ГХИ»: <https://gidrohim.com/node/71>)

По данным Росгидромета за период 2020-2024 гг. качество воды малых рек Ростовской области характеризовалось преимущественно степенью «грязная».



Картосхема маршрутов экспедиционных исследований ЮНЦ РАН под эгидой РГО в пределах приазовских регионов РФ, по территории которых протекают (в нижнем течении) средние и малые реки Северо-Восточного Приазовья



ховского водохранилища при разрушении плотины. Выжженная земля в вольерах диких копытных животных заповедника «Аскания-Нова» летом становится источником пыльных смерчей и миражей.

Предпринимаются попытки наполнения прудов из артезианских скважин, но единственным действенным решением этой проблемы может стать лишь восстановление Каховского водохранилища.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ ►

Как рассказал ведущий научный сотрудник кафедры океанологии Института наук о Земле ЮФУ Денис Кривогуз, уже, например, в 2023 году на 48% мировой суши хотя бы в течение одного месяца была экстремальная засуха. Аридные земли сейчас занимают 41% поверхности Земли. К 2100 году их площадь может увеличиться на 12–23%.

Для комплексной оценки пространственно-временной динамики аридизации климата ученые смоделировали развитие его изменений в Ростовской области с учетом глобальных тенденций, рассмотрев период с 1951 по 2024 год. Были проанализированы пространственные закономерности аридизации, исторические тенденции изменений температуры, выпадения атмосферных осадков, отношения го-

довой суммы осадков к средней годовой температуре воздуха (индекса Де Мартона).

Для юга Ростовской области в соответствии с тремя сценариями возможных изменений климата, признанными в международном научном сообществе, были установлены следующие изменения с 2025 по 2054 годы.

1. Для наиболее радикального сценария *CanESM5*: средняя годовая температура воздуха поднимется на 1,5–2 °C (к 2054 г.); среднее суммарное количество атмосферных осадков вырастет с 700 мм в 2025 году до 1100–1200 мм в 2054 году.

2. Для умеренного сценария *BCC-CSM2-MR*: средняя годовая температура увеличится на 1–1,5 °C; среднее суммарное количество осадков вырастет до 1300 мм к концу рассматриваемого периода.

3. Для наиболее консервативного сценария *MPI-ESM1-2-HR*: средняя годовая температура поднимется на 0,5–1 °C; среднее суммарное количество осадков будет увеличиваться в первые 10 лет, а затем снова начнет снижаться.

На севере Ростовской области климат изменится в меньшей степени.

В любом случае прогнозируются потепление и усиление различий в темпах климатических изменений с запада на восток. Юго-восточные районы окажутся в зоне максимального потепления. Допускается усиление контраста в количестве осадков: запад донского региона – более увлажненный, восток – более сухой. Площадь аридных территорий в области увеличится с 30 до 40%, преимущественно на юго-востоке. Кумо-Манычская впадина – наиболее аридная зона.

Климат в Ростовской области, если сравнивать его с остальными южными регионами РФ, наиболее нестабилен: сухой период часто и резко сменяется влажным и наоборот. На колебания температуры и количества осадков здесь скорее влияют локальные факторы, а не глобальные.

ЧТО ПРЕДЛАГАЮТ ОБЩЕСТВЕННИКИ И ЧИНОВНИКИ ►

На круглом столе также зашла речь об учете мнений экологических активистов.

Люди требуют от органов власти мероприятий по очистке рек, полагая что природная среда после этого сразу улучшится. На самом же деле хорошие последствия очистки не всегда гарантированы. В этом вопросе органам власти как раз и нужны подсказки ученых, чтобы можно было получить максимально полезные результаты за рационально израсходованные деньги. Доцент кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ Анна Михайленко отметила, что возрастание антропогенной нагрузки привело к изменениям водной среды. От 20 до 50 см донных отложений составляют продукты деятельности человека.

Ученые предлагают использовать антропогенный слой донных отложений для решения прикладных задач. Доцент кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ Борис Талпа считает этот материал пригодным для производства кирпича, тем более что природные месторождения подходящей глины находить все сложнее.

Он назвал донные отложения водных объектов (равнинных рек, озер, водо-

хранилищ, оросительных систем и др.), извлекаемые при расчистке русел и ремонтном дноуглублении, перспективным возобновляемым сырьем для керамической промышленности. В Китае подобная идея реализована, и ростовские специалисты побывали на таком производстве.

ПОСЛЕДНИЕ ГРОМКИЕ «КЛИМАТИЧЕСКИЕ» СОБЫТИЯ В РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ ►

В Ростовской области произошло два новых громких события, связанных с климатом. Первое – приятие нового статуса режиму чрезвычайной ситуации (ЧС). В связи с массовой гибелью урожая режим ЧС трансформирован из регионального в федеральный, чтобы привлечь дополнительные деньги для компенсации потерь.

Вторая новость касается намерения местных чиновников принудительно вызывать дожди в Ростовской области, распыляя специальные химические средства в атмосфере. По этому поводу ведутся переговоры с Росгидрометом.

Эти события вызвали большой общественный резонанс. Пользователи интернета высказали предположение, что политики предлагают такие радикальные вмешательства в природу, вероятно пытаясь спасти аграрный бизнес. Однако последствия экспериментов с вызовом дождей, в том числе для соседних регионов, не изучены, сомнительны и, возможно, опасны. Пока для этого нет научно обоснованных прогнозов. Также нет объяснений, почему игнорируется советский опыт орошения земель и посадки лесополос, который не менее затратен, чем искусственно вызванные дожди, но проверен и поэтому более реалистичен. И

ГеоИнфо Независимый электронный журнал



WWW.GEOINFO.RU

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