Научный электронный журнал

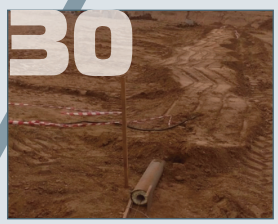
ГеоИнфо

Организация геотехнического мониторинга деформаций земляного полотна транспортных сооружений... *Стр. 30*

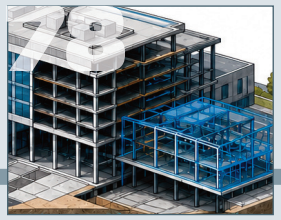
Автоматизированный анализ поверхностных карстопроявлений, повышающий эффективность оценки... *Стр. 54*

Обменные форматы данных инженерно-геологических изысканий и исследований... *Стр. 78*









GEOINFO

ISSN 2949-0677 (ONLINE)

WWW.GEOINFO.RU

ТОМ VIII • 2-2026

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ НАУЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЖУРНАЛА «ГЕОИНФО»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Самарин Евгений Николаевич

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

samarinen@mail.ru

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Абрамов Владимир Юрьевич

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

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

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

Белов Константин Владимирович

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

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

Буфеев Федор Константинович
Кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией исторических природно-технических систем и геоинформатики, ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН»
fbufeev@mail.ru

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 имени П.М. Машерова»
galkin-alexandr@yandex.ru

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

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

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

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

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

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

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

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

Лю Цзянькунь (Jiankun Liu)
Кандидат геолого-минералогических наук, профессор, Университет Сунь Ятсена (Гуанчжоу, КНР)
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.miigaik.ru

Маштаков Александр Сергеевич
Кандидат геолого-минералогических наук, директор, ООО «ВОЛГАСТРОИТЕХНОЛОГИЯ»
alsergmast@yandex.ru

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

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

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

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

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

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

Самсонов Тимофей Евгеньевич

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

Слободян Владимир Юрьевич
Генеральный директор АО «Институт экологического проектирования и изысканий» (АО «ИЭПИ»)
v.slobodyan@iepi.ru

Степаненко Виктор Михайлович

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Черепанский Михаил Михайлович

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

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

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

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

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

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

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

ГЕНЕРАЛЬНЫЕ СПОНСОРЫ ЖУРНАЛА

Геотехническая лаборатория
АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ»

ООО «ПЕТРОМОДЕЛИНГ»

АО «ИНСТИТУТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗЫСКАНИЙ»

ЛАБОРАТОРИЯ РОССИЙСКИХ
ИТ-РЕШЕНИЙ

МИР ИННОВАЦИОННЫХ ИДЕЙ
И УНИКАЛЬНЫХ РАЗРАБОТОК

СПОНСОРЫ ЖУРНАЛА

ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ПРОИЗВОДСТВО
ПОСТАВКА

MALININSOFT

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ
ГРУНТОВ

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
«ENGGEO»

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ

ПРОГРАМНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ДЛЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

РОССИЙСКОЕ ИНЖЕНЕРНОЕ ПО

СОЮЗ ГОРНЫХ ГЕОМЕХАНИКОВ

ПРИГЛАШАЕМ В СОЮЗ ГОРНЫХ ГЕОМЕХАНИКОВ!

Рады сообщить об основании Союза горных геомехаников (СГГ) – профессионального сообщества, объединяющего специалистов в области управления устойчивостью горных выработок при разработке месторождений. Профильные направления Союза: горная геомеханика, структурная геология, промышленная гидрогеология, геомеханика разрушения горных пород взрывом, геотехника инженерно-насыпных и гидротехнических сооружений. Основная задача Союза – повышение безопасности горного производства. Союз официально зарегистрирован в Минюсте 2 апреля 2026 года.

Цели Союза:

- Создание условий для эффективного профессионального взаимодействия среди специалистов отрасли.
- Повышение уровня производственной культуры и компетенций специалистов в горной отрасли.
- Снижение рисков аварийных ситуаций (горных ударов, обрушений горной массы).
- Обеспечение взаимодействия и обмена опытом между научным сообществом, проектными и производственными организациями.
- Способствование развитию отраслевых стандартов.

Мы приглашаем к сотрудничеству:

- руководителей и инженеров горных предприятий;
- инженеров-консультантов, проектировщиков;
- ученых и преподавателей профильных вузов;
- специалистов компаний поставщиков услуг и оборудования;
- сотрудников государственных надзорных органов и отраслевых структур;
- аспирантов и студентов горных специальностей.

Присоединившись к СГГ, вы получите:

- поддержку в развитии компетенций и повышении квалификации;
- площадку для обсуждения профессиональных вопросов и поиска решений;
- каналы для налаживания деловых контактов и партнерства;
- признание профессиональным сообществом и статус Компетентного лица;
- участие в профильных мероприятиях: конференциях, семинарах, мастер классах – как в качестве слушателя, так и преподавателя;
- участие в разработке отраслевых рекомендаций и стандартов;
- возможность привлечения к возмездным работам в качестве эксперта;
- доступ к библиотеке современных технических публикаций;
- карьерные перспективы, потенциал роста заработка.

Как присоединиться?

Для получения полной информации о членстве в Союзе горных геомехаников, о различных квалификационных уровнях, таких как действительный член (ДСГГ), постоянный член (ПСГГ), ассоциированный участник (АСГГ), молодежный участник (МСГГ) и компетентное лицо (КЛ) в области горной геомеханики, приглашаем посетить официальный сайт Союза

www.союзгеомехаников.рф

Хотите узнать больше?
Пишите на электронную почту contact@sggrf.org — будем рады ответить на все вопросы!



РЕКЛАМА

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: 27.07.2026

© Ананко Виктор Николаевич, 2026

© ГеоИнфо, 2026

Фото на обложке: ГеоИнфо

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Особенности эколого-геологических систем железнодорожных транспортно-коммуникационных комплексов Белоруссии 8

Королев В.А., Галкин А.Н.

МЕХАНИКА ГРУНТОВ. ГЕОТЕХНИКА

Организация геотехнического мониторинга деформаций земляного полотна транспортных сооружений инклинометрическим методом 30

Устян Н.А.

От принципа Ле Шателье – Брауна к диссипативным структурам 38

Мерзляков В.П.

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДИНАМИКА

Автоматизированный анализ поверхностных карстопроявлений, повышающий эффективность оценки карстовой опасности 54

Дробинина Е.В., Китаева М.А., Мизёв А.А., Романова Е.Р.

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

Обменные форматы данных инженерно-геологических изысканий и исследований: текущее состояние, проблемы, перспективы 78

Ракитина Н.Н., Бершов А.В., Жидков Р.Ю., Пайшанбиев С.А., Рекун В.С., Ланько С.В.

ПЕРЕВОДНЫЕ СТАТЬИ

Необходимо свести к нулю выбросы парниковых газов при сжигании ископаемых углеводородов, чтобы защитить экосистемы криолитозоны 98

Эбботт Б.У., Браун М., Кэри Дж.К. и др.

Роль геотехнического мониторинга при проектировании фундаментов и верификации принятых решений. Часть 1 120

Друза М., Влчек Й., Орининова Л.

Роль геотехнического мониторинга при проектировании фундаментов и верификации принятых решений. Часть 2 128

Друза М., Михалик Я., Музик Ю., Гаго Ф., Штефаник М., Рыбак Я.

Соответствие научным специальностям ВАК

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

1. Естественные науки

1.6. Науки о Земле и окружающей среде

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

2. Технические науки

2.1. Строительство и архитектура

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

ECOLOGICAL GEOLOGY

Features of ecological-geological systems of railway transport-communication complexes of Belarus 8

Korolev V.A., Galkin A.N.

SOIL AND ROCK MECHANICS. GEOTECHNICS

Organization of inclinometer-based geotechnical monitoring of transport infrastructure roadbed deformations 30

Ustyan N.A.

From the Le Chatelier-Braun principle to dissipative structures 38

Merzlyakov V.P.

ENGINEERING GEODYNAMICS

Automated analysis of surface karst features to enhance karst hazard assessment within segments along the routes of projected linear facilities 54

Drobinina E.V., Kitaeva M.A., Mizev A.A., Romanova E.R.

ENGINEERING GEOLOGY. ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS

Data exchange formats for engineering geological site investigation and research: current state, challenges, and prospects 78

Rakitina N.N., Bershov A.V., Zhidkov R.Yu., Paishanbiev S.A., Rekun V.S., Lan'ko S.V.

TRANSLATED ARTICLES

We must stop fossil fuel emissions to protect permafrost ecosystems 98

Abbott B.W., Brown M., Carey J.C., et al.

The role of geotechnical monitoring at design of foundation structures and their verification – part 1 120

Drusa M., Vlček J., Orininov3 L.

The role of geotechnical monitoring at design of foundation structures and their verification – part 2 128

Drusa M., Mihalik Ja., Muzik Ju., Gago F., Stefanik M., Rybak Ja.



Особенности эколого-геологических систем железнодорожных транспортно-коммуникационных комплексов Белоруссии. *Стр. 8*

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 Eiminating the Consequences of Hazardous Natural Processes and Penomena; 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: 27.07.2026

© Ananko Viktor Nikolaevich, 2026

© GeoInfo, 2026

Cover photo: GeoInfo

DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-8-29 УДК 502/504:624.131



ОСОБЕННОСТИ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТРАНСПОРТНО-КОММУНИКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ БЕЛОРУССИИ

Поступила 12.01.2026
Принята к публикации 26.01.2026
Опубликована 27.07.2026

КОРОЛЁВ В.А.
Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., профессор, г. Москва, Россия

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 рассмотрены особенности эколого-геологических систем (ЭГС) железнодорожных транспортно-коммуникационных комплексов Белоруссии. Несмотря на ключевую роль этих систем в транспортной инфраструктуре страны и значительные площади их распространения, они до сих пор остаются практически неизученными, об их абиотических и биотических компонентах имеются лишь фрагментарные разрозненные сведения.

На основе ранее разработанной авторами классификации природных и техногенных ЭГС территории Республики Беларусь, а также систематики эколого-геологических систем транспортно-коммуникационных комплексов в настоящей статье предпринята попытка составить общую характеристику ЭГС железнодорожных комплексов в пределах этой страны, выявить и охарактеризовать особенности их абиотических (литотопа, гидротопа, атмотопа), биокосных (эдафотопа) и биотических (микробоценоза, фитоценоза, зооценоза и социума) компонентов.

Выявленные закономерности и особенности эколого-геологических систем железнодорожных транспортно-коммуникационных комплексов Белоруссии можно рассматривать как общие для аналогичных ЭГС России, которые необходимо учитывать при инженерно-экологических изысканиях и исследованиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

эколого-геологическая система (ЭГС); железнодорожные комплексы; технолитотоп; техноэдафотоп; техномикробоценоз; технофитоценоз; технозооценоз; Белоруссия.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Королев В.А., Галкин А.Н. Особенности эколого-геологических систем железнодорожных транспортно-коммуникационных комплексов Белоруссии // Геоинфо. 2026. Т. 8. № 2. С. 8–29. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-8-29.

FEATURES OF ECOLOGICAL-GEOLOGICAL SYSTEMS OF RAILWAY TRANSPORT-COMMUNICATION COMPLEXES OF BELARUS

Received: 12.01.2026
Accepted for publication 26.01.2026
Published 27.07.2026

KOROLEV V.A.
DSc (Geology and Mineralogy), professor at the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

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

ABSTRACT

This article examines the characteristics of the ecological-geological systems (EGS) of the railway transport-communication complexes in Belarus. Despite their key role in the country's transport infrastructure and their significant distribution, these systems remain virtually unexplored, with only fragmentary and disparate information available on their abiotic and biotic components.

Based on the classification of natural and man-made EGS in the Republic of Belarus, which was previously developed by the authors, as well as on the systematics of the ecological-geological systems of transport-communication complexes, this article attempts to compile a general description of the EGS of railway complexes in this country, to identify and characterize the features of their abiotic (lithotope, hydrotope, atmotope), bioinert (edaphotope) and biotic (microbiocenosis, phytocenosis, zoocenosis, and society) components.

The identified patterns and features of the ecological-geological systems of the railway transport-communication complexes in Belarus can be considered common to similar EGS in Russia, which must be considered in engineering-ecological surveys and studies.

KEYWORDS:

ecological-geological system (EGS); railway complexes; technolithotope; technoedaphotope; technomicrobiocenosis; technophytocenosis; technozoocenosis; Belarus.

FOR CITATION:

Korolev V.A., Galkin A.N. Osobennosti ekologo-geologicheskikh sistem zheleznodorozhnykh transportno-kommunikatsionnykh kompleksov Belorussii [Features of ecological-geological systems of railway transport-communication complexes of Belarus] // Geoinfo. 2026. T. 8. № 2. S. 8–29. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-8-29 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Транспортно-коммуникационные комплексы занимают особое место среди разнообразных искусственно созданных (антропогенных) эколого-геологических систем (ЭГС). Их стабильная работа критически важна не только для удовлетворения потребностей населения в перевозках и услугах, но и для бесперебойного функционирования всех секторов экономики. С экологической точки зрения это является фундаментальным условием для поддержания жизнеспособности экосистем. Более того, надежность и безопасность транспортной инфраструктуры напрямую влияют на национальную безопасность государства, что также имеет экологическое значение.

Под эколого-геологической системой транспортно-коммуникационного комплекса следует понимать 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]. Этот вид ЭГС включает в себя природные компоненты: горные породы (литотоп), подземные воды (гидротоп), почвы (эдафотоп), геохимические и геофизические поля, приземный воздух (атмотоп), а также современные инженерно-геологические процессы, влияющие на существование и развитие



Рис. 1. Структура ЭГС транспортно-коммуникационных комплексов [3]

живых организмов, но при этом в той или иной степени техногенно измененные. Наряду с ними важную роль играют и техногенные компоненты – инженерные сооружения разных типов, многие из которых являются источниками техногенной трансформации природных компонентов таких ЭГС.

Транспортно-коммуникационная система как техногенный компонент ЭГС на территории любой страны – это совокупность экономических субъектов (отраслей, предприятий, организаций) и видов деятельности, которые обеспечивают или создают условия для функционирования производственных отраслей и жизнедеятельности общества, снабжая их транспортно-информационными потоками вещества, энергии и информации. По сути, это единая сеть, объединяющая все виды транспорта (автомобильный, железнодорожный, водный, воздушный, космический, трубопроводный), а также системы передачи электроэнергии и связи. Все эти элементы тесно связаны между собой и дополняют друг друга. Центральное место в этой системе занимает транспорт, который характеризуется: скоординированным развитием; эффективным использованием каждого вида транспорта; наличием материально-технической базы, технических средств, мощностей, пропускной способности; совместимостью и взаимодополняемостью используемых технологий. Основная задача транспортной системы – удовлетворять потребности всех хозяйствующих субъектов страны и населения в перевозках и международных связях. Кроме того, транспортная отрасль вносит существенный вклад в экспортный потенциал многих стран, предлагая свои услуги на международном уровне. Все это делает данную отрасль одной из ключевых в экономике [3].

Эколого-геологические системы транспортно-коммуникационных комплексов, как показано на рисунке 1, по структуре схожи с другими техногенными ЭГС. Они включают в себя как абиотические (литотоп, гидротоп, атмотоп, технические сооружения) и биокосные (эдафотоп), так и биотические (микробоценоз, фитоценоз, зооценоз) компоненты, но техногенно измененные или антропогенные за счет социума и создаваемых им технических транспортно-коммуникационных сооружений.

Кроме того, как и в других техногенных ЭГС, в эколого-геологических системах транспортно-коммуникационных комплексов основное значение, как уже было отмечено, имеют их различные технические подсистемы, такие как авто- и железные дороги, взлетно-посадочные полосы аэродромов, космодромы, линии электропередачи и связи, трубопроводы (включая продуктопроводы), а также ряд других объектов их инфраструктуры (различная техника, вокзалы, депо, ангары, парки, АЗС и др.). Именно эти подсистемы и объекты оказывают наибольшее

влияние на живые организмы в рассматриваемых ЭГС и формируют их внешний вид.

Технические сооружения в сочетании с литогенной основой – литотопом – образуют различные литотехнические системы (ЛТС). В связи с этим в рассматриваемом классе ЭГС нами выделено восемь типов: ЭГС автотранспортных, железнодорожных, транспортных терминалов, воднотранспортных, авиационных, транспортно-космических, коммуникационно-энергетических и промышленно-продуктопроводных[1] комплексов [4].

Белоруссия занимает стратегически важное положение, являясь ключевым транспортным узлом между Западной Европой, Россией и Азией. Через ее территорию проходят важнейшие железнодорожные, автомобильные и водные пути, а также сети нефте- и газопроводов, линии электропередачи и связи. Кроме того, воздушное пространство страны насыщено авиационными коридорами, используемыми для различных типов воздушных судов.

Согласно общей структуре и систематике эколого-геологических систем транспортно-коммуникационных комплексов, на территории Белоруссии функционируют практически все типы этих систем, за исключением ЭГС транспортно-космических комплексов [3]. Особое место среди них занимают ЭГС железнодорожных комплексов.

Это объясняется тем, что *железнодорожный транспорт* играет ключевую роль в транспортной системе республики, особенно для перевозок грузов и пассажиров на средние и дальние расстояния, а также в пригородном сообщении. Его преимущества [5]:

- массовость перевозок и высокая провозная способность железных дорог (до 80–90 млн т по двухпутной или 20–30 млн т по однопутной линии в год);
- регулярность перевозок независимо от времени года, времени суток и погодных условий;
- универсальность с точки зрения использования этого вида транспорта для перевозок различных грузов и возможность массовых перевозок грузов с большой скоростью;
- возможность создания прямой связи между крупными промышленными предприятиями по железнодорожным подъездным путям;
- сравнительно невысокая себестоимость перевозок по сравнению с автомобильным транспортом (если принять среднюю себестоимость на транспорте за 100%, то себестоимость железнодорожных перевозок составит 80%, автомобильных – 1600%, авиаперевозок – 5000%).

Белорусская железная дорога (БЖД) является важной составляющей евроазиатской железнодорожной сети, обеспечивая внешнеторговые связи. Имея давнюю историю[2], она интегрирована в железнодорожные системы Западной Европы, стран Балтии и СНГ. Основные транспортные потоки проходят в направлениях транспортных коридоров. Так, транспортный коридор IX пересекает территорию республики с севера на юг и проходит в обход крупных промышленных центров Белоруссии – Витебска, Могилёва, Гомеля. Протяженность железнодорожных линий составляет: 489 км по направлению Терюха – Гомель – Витебск – Езерище; 372 км по направлению Гудогай – Молодечно – Минск – Жлобин [7].

Особое значение имеет общеевропейский транспортный коридор II (Берлин – Варшава – Минск – Москва – Нижний Новгород), соединяющий Германию, Польшу, Белоруссию и Россию, поскольку он обеспечивает основные торговые потоки между Западом и Востоком. На территории республики железнодорожная линия этого коридора проходит по маршруту Брест – Минск – Орша – Осиновка. Важным преимуществом для грузоперевозок по данному маршруту является двухпутная электрическая линия, позволяющая грузовым поездам развивать скорость до 100 км/ч, а пассажирским – до 160 км/ч.

На западных границах страны функционирует развитая инфраструктура, учитывающая различия в ширине железнодорожной колеи. На пограничных переходах созданы условия для обработки различных видов грузов, при этом основные мощности по перегрузке сконцентрированы в железнодорожных узлах Бреста и Гродно.

Особое внимание уделяется перевозкам контейнеров – как транзитных, так и экспортно-импортных и внутренних. На железнодорожных станциях работают контейнерные терминалы, обслуживающие крупно- и среднетоннажные контейнеры. Помимо технического оснащения развивается сервис для грузовладельцев, который направлен на организацию доставки грузов по принципам «от двери до двери» или «железнодорожная станция – склад получателя» [8].

С функциональной точки зрения *эколого-геологические системы железнодорожных комплексов представляют собой системы, включающие в себя совокупность взаимосвязанных природных и техногенных компонентов, функционирование которых направлено на обеспечение бесперебойного и безопасного движения подвижных составов, а также на поддержание устойчивости геологической среды в зонах их воздействия.*

Их эколого-геологические характеристики, структура и специфические черты обладают особенностями, значительно отличающимися от таковых для других ЭГС, и до сих пор остаются недостаточно исследованными. В связи с этим, ос-

[1] Термин является авторским. По смыслу, он, возможно, охватывает различные типы трубопроводов, а не только продуктопроводы (прим. ред.).

[2] История Белорусской железной дороги началась более 160 лет назад – в 1862 году, когда было открыто движение поездов на участке Поречье – Гродно Санкт-Петербурго-Варшавской железной дороги [6].

новываясь на ранее разработанной нами классификации эколого-геологических систем территории Белоруссии [4, 9], в данной статье предпринята попытка представить общее описание рассматриваемых ЭГС, а также выявить и охарактеризовать особенности их абиотических (техническая составляющая, литотоп, гидротоп, атмотоп), биокосных (эдафотоп) и биотических (микробоценоз, фитоценоз, зооценоз, социум) компонентов. Это и стало основной целью исследования и его задачами.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОМПОНЕНТЫ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ЭГС ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Эффективная работа и развитие железнодорожного транспорта зависят от состояния природных комплексов и доступности природных ресурсов, уровня развития инфраструктуры искусственной или техногенной среды, а также от социально-экономических условий общества. Влияние этого вида транспорта на окружающую природную среду обусловлено состоянием инфраструктуры, связанной со строительством железных дорог, производством подвижного состава и оборудования, а также интенсивностью эксплуатации железнодорожных объектов. Все составляющие этой системы взаимосвязаны и влияют друг на друга как в прямом, так и в обратном направлениях.

В свою очередь, состояние окружающей среды при взаимодействии с объектами железнодорожного транспорта зависит от инфраструктуры, связанной со строительством железных дорог, производством, ремонтом и эксплуатацией подвижного состава и производственного оборудования, а также от интенсивности использования подвижного состава и других объектов на железных дорогах. Так, по данным пресс-службы БЖД потребление электрической энергии организациями этой белорусской магистрали составляет 1,5% от общего объема электроэнергии республики и более 85% от того, что расходует весь ее транспортный сектор. При этом более 76% электропотребления приходится на тягу поездов. В части тепла магистраль задействует более 51% тепловой энергии транспортной отрасли, и свыше 80% этого тепла производится собственными теплоисточниками БЖД [10]. В связи с этим уровень воздействия железнодорожного транспорта на окружающую среду является довольно существенным.

Воздействие железных дорог на окружающую среду – это сложный процесс, зависящий от множества технических факторов, их интенсивности и значимости для различных природных компонентов. Важно рассматривать влияние не только самого транспорта, но и всей сопутствующей инфраструктуры, а также деятельности предприятий, обеспечивающих ее функционирование [11].

Техногенное воздействие может проявляться как локально (со стороны одного источника), так и комплексно (со стороны совокупности факторов), и его принято оценивать с помощью коэффициентов экологической опасности, зависящих от типа, характера и объекта воздействия.

В целом факторы воздействия железнодорожного транспорта и инфраструктуры на окружающую среду классифицируют по признакам, связанным с такими видами воздействий, как [11, 12]:

- механическое (воздействие твердых отходов, дорожной техники на массивы грунтов);
- физическое (влияние теплового излучения, электромагнитных полей, ультра- и инфразвука, вибраций, радиации);
- химическое (воздействие кислот, щелочей, солей металлов, углеводородов, красок, растворителей, пестицидов);
- биологическое (влияние жизнедеятельности макро- и микроорганизмов, бактерий, вирусов);
- эстетическое (при нарушении ландшафтов, осушении или заболачивании территорий).

При этом степень перечисленных видов воздействий на компоненты окружающей среды может быть различной – от мгновенной и кратковременной до сравнительно недолгой и долговременной.

Железнодорожный транспорт является постоянным источником воздействия на природные компоненты. Его воздействие, а также влияние его инфраструктуры принято разделять на три уровня – допустимый, равновесный и кризисный. Характер такого влияния оценивается исходя из типа техногенных факторов, их интенсивности и экологической значимости.

Как было отмечено выше, техногенное воздействие может быть как локальным (вызванным одним фактором, безотносительно к пространственному масштабу), так и комплексным (обусловленным группой факторов). Для количественного анализа важности данных факторов используют коэффициенты экологической значимости, также именуемые коэффициентами весомости. Значения этих коэффициентов зависят от объекта, вида и характера воздействия.

Для определения общего уровня воздействия объектов железнодорожного транспорта на экологическое состояние природной среды используются следующие интегральные характеристики [11, 13]:

- абсолютные потери окружающей среды, выражаемые в конкретных единицах измерения состояния биоценозов (флоры, фауны, социума);
- компенсационные возможности экосистем, характеризующие их восстанавливаемость в естественном или искусственном режиме, создаваемом принудительно;

- опасность нарушения природного баланса, возникновение неожиданных потерь и локальных экологических сдвигов, которые могут вызвать экологический риск и кризисные ситуации в окружающей природной среде;
- уровень экологических потерь, вызываемых воздействием объектов транспорта на окружающую среду.

Эти характеристики позволяют оценить экологическую безопасность в зонах, где расположены транспортные объекты. Воздействие железнодорожного транспорта на экологическую ситуацию является значительным и в первую очередь связано с загрязнением воздуха, водных объектов и земельных площадей в процессе строительства и эксплуатации железных дорог. Состояние окружающей среды при взаимодействии с объектами железнодорожного транспорта зависит от инфраструктуры строительства железных дорог, производства подвижного состава, технического оборудования и других устройств, от интенсивности использования подвижного состава и других объектов на железных дорогах [13].

Влияние железнодорожного транспорта и его инфраструктуры на экологическую обстановку оценивают по величине расходования природных ресурсов и уровню загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду. Такие источники загрязнения элементов окружающей среды по характеру функционирования, как правило, разделяют на стационарные и передвижные.

Стационарными источниками являются локомотивные и вагонные депо, заводы по ремонту подвижного состава, пункты подготовки подвижного состава, котельные, пропарочно-пропиточные заводы, дезинфекционно-промывочные станции и др. К передвижным источникам относятся магистральные и маневровые тепловозы, путевые и ремонтные машины, автотранспорт, промышленный транспорт, рефрижераторный состав, пассажирские вагоны и др. В свою очередь, стационарные источники по сложности и числу технологических процессов неравнозначны и могут создавать загрязнения не одного, а нескольких видов. Интегральные характеристики позволяют определить экологическую безопасность в районах расположения транспортных объектов.

Влияние объектов железнодорожного транспорта на окружающую среду связано как со строительством железнодорожной сети и транспортной инфраструктуры, так и с эксплуатацией железных дорог и подвижного состава, что включает сжигание большого количества топлива, использование пестицидов на полосах отчуждения и другие факторы. Строительство и эксплуатация железных дорог сопровождаются загрязнением природных комплексов, выбросами в атмосферу, попаданием сточных вод в водоемы и образованием отходов. Кроме того, прокладка железнодорожных путей может проходить по традиционным маршрутам миграции животных, нарушая их и приводя к угрозе гибели отдельных экосистем и видов.

Чтобы минимизировать вредоносное воздействие железнодорожного транспорта и его инфраструктуры на окружающую среду, применяют системный подход при изучении их взаимодействия, учитывая уровни и нормы влияния на природную среду. При этом особое внимание уделяется анализу характеристик наиболее распространенных загрязнителей и факторов воздействия, связанных с деятельностью железнодорожного транспорта. Можно условно выделить следующие их категории [11, 13]:

- неорганические соединения (оксид углерода, диоксид серы, оксиды азота);
- органические вещества (сажа[3], нефтепродукты);
- биологические загрязнители;
- синтетические поверхностно-активные вещества;
- тяжелые металлы (железо, медь, кадмий, хром, никель, в некоторых случаях ртуть, свинец);
- шум и вибрации;
- радиоактивное и электромагнитное излучение;
- тепловое загрязнение.

Помимо этого важно отметить, что железнодорожный транспорт является потребителем значительных количеств пресной воды. Вода используется практически во всех производственных процессах – при обмывке подвижного состава, отдельных узлов и деталей, охлаждении компрессоров и прочего оборудования, получении пара, заправке вагонов, реостатных испытаниях тепловозов и т.д. Частично вода расходуется безвозвратно (потребляется в пассажирских вагонах, переходит в пар). Большая часть может быть собрана и повторно использована, однако в настоящее время доля повторного и оборотного водоснабжения на предприятиях железнодорожного транспорта составляет лишь 30% (в промышленности – 70%), а остальная вода после однократного использования сбрасывается в поверхностные водоемы.

Также железнодорожный транспорт оказывает негативное влияние на развитие эрозионных процессов, которые возникают при неправильном возведении и эксплуатации водоотводящих систем с полотна железной дороги, что приводит к возникновению и росту овражно-балочных систем. Нельзя не учитывать и трансформацию рельефа местности при строительстве железных дорог и инфраструктуры, что воздействует на целый комплекс физико-географических факторов, таких как микро- и мезоклимат, ландшафт и др. [14].

Основное загрязнение компонентов окружающей среды происходит на участках, где в качестве локомотивов используют

[3] Основной компонент сажи — аморфный углерод, но в ней нередко присутствуют примеси, в том числе органические вещества. На железных дорогах сажа (особенно от дизелей тепловозов) всегда адсорбирует на себе несгоревшее топливо и канцерогенные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) (*прим. ред.*).

тепловозы с дизельными силовыми установками. Их отработанные газы содержат большое количество диоксида углерода, оксидов азота, сажи и других вредных веществ.

Помимо продуктов сгорания топлива при транспортировке и перегрузке грузов в окружающую среду ежегодно попадают значительные объемы рудных веществ, солей и минеральных удобрений. Значительная часть железнодорожных путей загрязняется пылящими грузами. Из вагонов-цистерн из-за негерметичности клапанов, сливных приборов и люков теряются нефтепродукты. Эти утечки проникают в почву и загрязняют грунтовые воды. Пассажирские вагоны также способствуют загрязнению железнодорожного полотна сухим мусором и сточными водами.

Особую обеспокоенность с точки зрения экологической безопасности вызывает перевозка различных видов опасных веществ. В процессе перевозки происходят утечки ядовитых и других вредных веществ, в том числе (как уже отмечалось) нефтепродуктов. Кроме того, в холодильных установках некоторых старых рефрижераторных вагонов используются озоноразрушающие вещества (фреоны)[4] [13].

Резюмируя сказанное, следует отметить, что железнодорожный транспорт, будучи критически важным элементом глобальной логистики, оказывает двойственное воздействие на окружающую среду. С одной стороны, его электрифицированные системы обеспечивают низкие выбросы загрязняющих веществ в атмосферу и высокую энергоэффективность, что выгодно отличает его от других видов транспорта. С другой стороны, функционирование железных дорог и их инфраструктуры создает значительный риск загрязнения почв и водных объектов тяжелыми металлами, нефтепродуктами и другими неорганическими и органическими веществами, что неизбежно ведет к дестабилизации и ухудшению состояния местных экосистем.

ОСОБЕННОСТИ АБИОТИЧЕСКИХ И БИОКОСНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭГС ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОМПЛЕКСОВ БЕЛОРУССИИ

Особенности технической составляющей ЭГС

В структуре ЭГС железнодорожных комплексов выделяются те же основные структурные компоненты (подсистемы), что и в других техногенных ЭГС (см. рис. 1). Для них характерны как абиотические (технические сооружения, литотоп, гидротоп, атмотоп), так и биокосные (эдафотоп) и биотические (микробоценоз, фитоценоз, зооценоз) компоненты, но подвергнутые техногенному преобразованию или созданные искусственно под влиянием социума и возводимых им технических сооружений.

Техническая составляющая рассматриваемых ЭГС на территории Белоруссии, как и в пределах других промышленно развитых стран, объединяет [15]:

- железнодорожные пути с искусственными сооружениями;
- станции и другие раздельные пункты с пассажирскими, грузовыми и экипировочными устройствами;
- подвижной состав;
- вагонные и локомотивные депо;
- устройства энергоснабжения, включая тяговые подстанции и контактную сеть на электрифицированных линиях;
- устройства водоснабжения;
- специальные технические устройства для регулирования движения поездов и управления эксплуатационной работой;
- средства связи.

Функционирование всех этих систем или объектов обеспечивается специализированными службами или подразделениями, которые относятся к государственному объединению «Белорусская железная дорога», подчиняющемуся Министерству транспорта и коммуникаций Республики Беларусь.

В настоящее время в состав БЖД входят: аппарат управления из 30 отраслевых служб, отделов и других структурных подразделений, а также обособленные структурные подразделения и региональные отделения (рис. 2). Последние представлены шестью отделениями дороги с идентичной структурой: Витебским, Минским, Барановичским, Брестским, Гомельским, Могилевским (рис. 3).

В целом региональные отделения Белорусской железной дороги включают: 16 локомотивных депо, 1 моторвагонное депо (рис. 4, 5), 12 вагонных депо, 2 промывочно-пропарочные станции, 34 пункта технического обслуживания грузовых и пассажирских вагонов, 20 дистанций пути, 13 дистанций сигнализации и связи, 7 дистанций электроснабжения, 228 грузовых и 368 пассажирских станций. Грузовой парк насчитывает более 30 тыс. вагонов, перевозки осуществляются поездами массой до 9 тыс. т и длиной до 1500 м [16–18].

[4] Речь идет о старых типах хладагентов. В рамках Монреальского протокола старые озоноразрушающие фреоны (например, R-12) практически полностью выведены из эксплуатации. Современные рефрижераторы заправляют озонобезопасными хладагентами (например, R-134a или R-404A), которые влияют на глобальное потепление (усиливая парниковый эффект), но не разрушают озоновый слой. Старые фреоны (такие как R-12 и R-22), которые массово использовались в советских и ранних постсоветских рефрижераторных вагонах, полностью запрещены к ввозу и использованию в новых системах и в Белоруссии, и в России. Все новое или модернизированное холодильное оборудование железных дорог в этих странах выпускается исключительно на озонобезопасных веществах. Старые типы фреонов все еще используются, хотя объем их применения стремительно сокращается. Полностью перейти на новые стандарты слишком быстро невозможно из-за огромного количества эксплуатируемого оборудования прошлых поколений (*прим. ред.*).

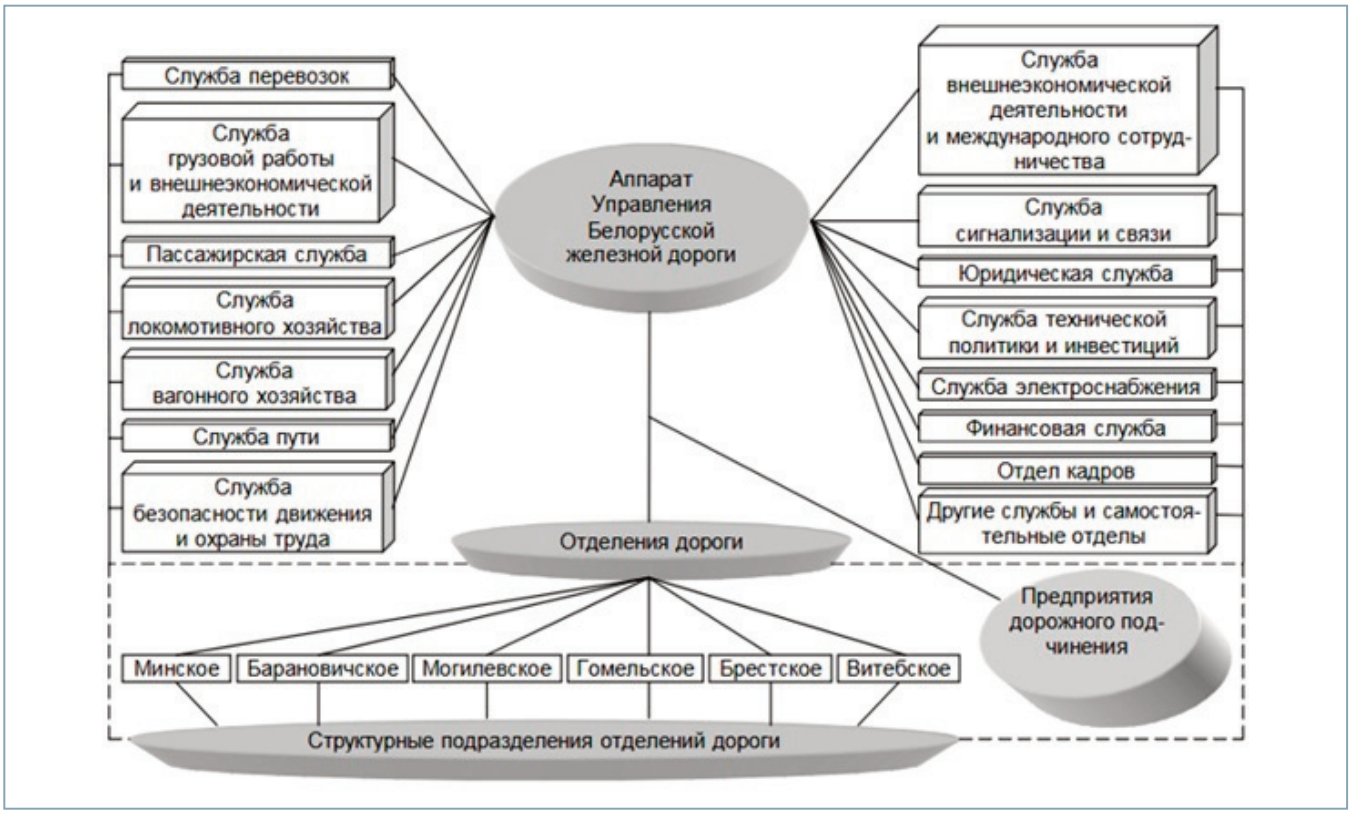


Рис. 2. Структура Белорусской железной дороги [8]

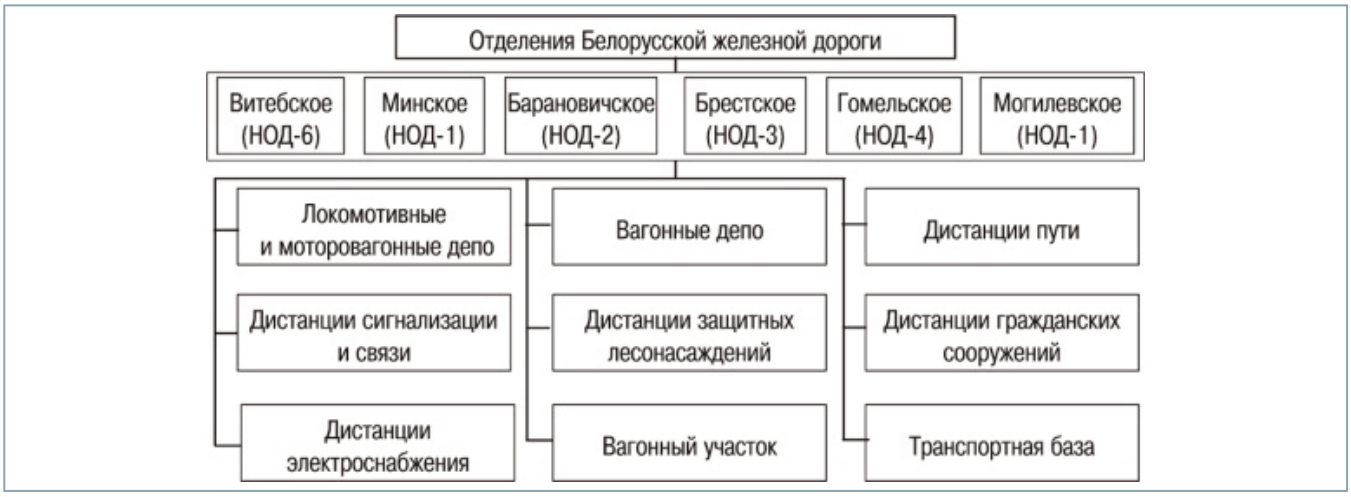


Рис. 3. Структура отделений Белорусской железной дороги [16]. НОД – начальник отделения дороги

В состав Белорусской железной дороги входят также ресурсообеспечивающие, проектно-изыскательские, строительно-монтажные, транспортно-логистические и другие предприятия и организации. В их числе Минский и Гомельский вагоноремонтные, Гомельский электромеханический, Брестский электротехнический заводы, Барановичский завод автоматических линий, Борисовский шпалопропиточный завод, опытный завод путевых машин при станции Пинск; институт «Белжелдорпроект» и унитарное предприятие (УП) «Дорстроймонтажтрест», осуществляющие проектирование и строительство объектов различного назначения на БЖД. Транспортно-экспедиторскую и логистическую деятельность на дороге выполняет республиканское унитарное предприятие (РУП) «Белинтертранс». Всю коммерческую работу проводит РУП «Главный расчетный информационный центр» – через него производятся провозные платежи за выполненные перевозки грузов. БЖД имеет вычислительный центр (в Бресте), который решает большой комплекс задач. В их числе:

- автоматизация оперативного управления внутренними и экспортно-импортными перевозками, коммерческой и грузовой работой на станциях;
- сбор и обработка статистических данных о работе дороги;
- выдача данных о формировании, дислокации вагонов и локомотивов и др.

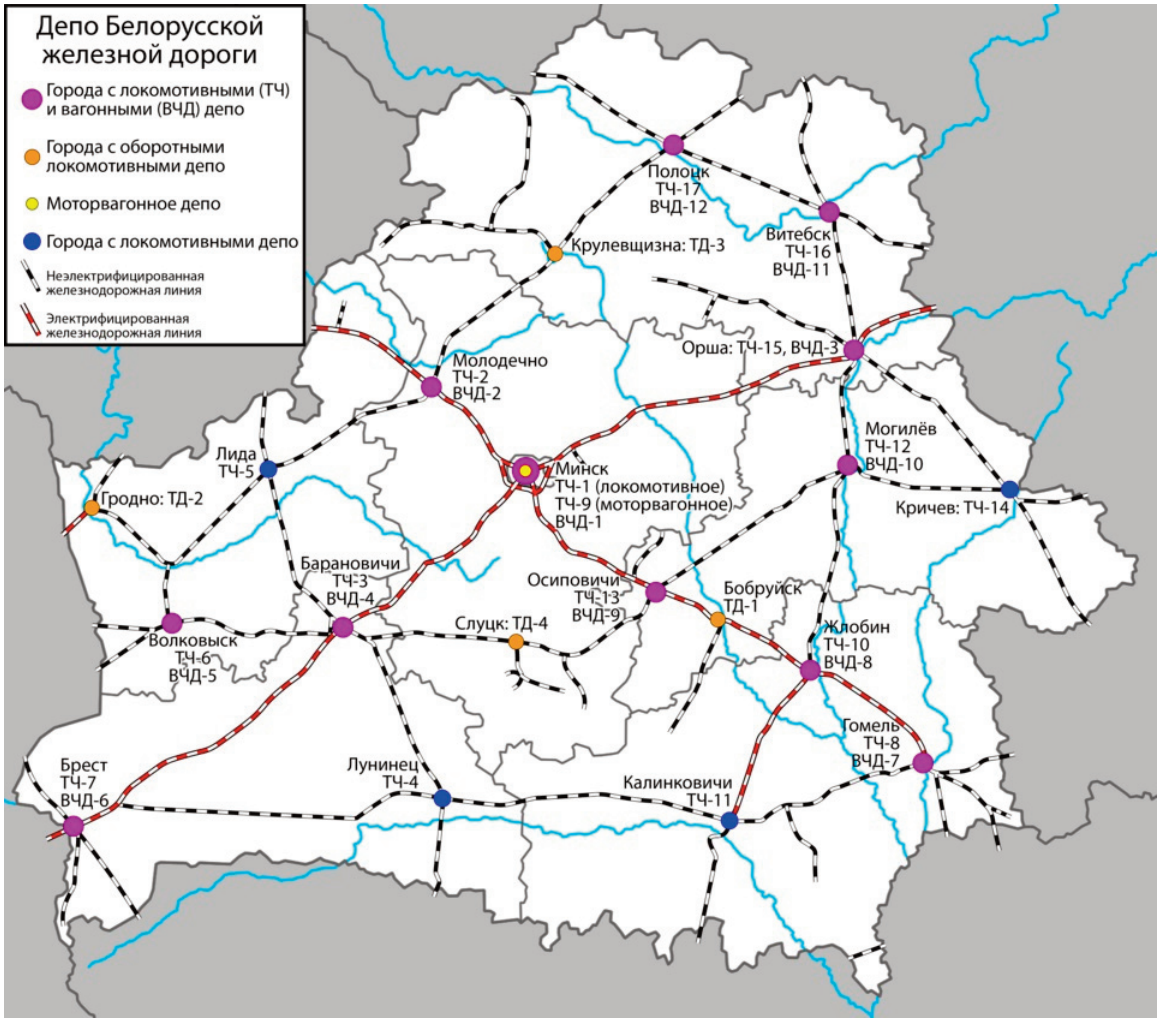


Рис. 4. Локомотивные и вагонные депо Белорусской железной дороги [19]

Большое развитие на дороге получили комплексные автоматизированные системы управления, которые охватывают планирование поездной и грузовой работы, технологические процессы, экономику и контроль исполнения документов и др. [18–20].

Одно из важнейших хозяйств, от которого зависит работоспособность всей БЖД, – путевое. От его состояния, мощности обустройств в значительной степени зависят пропускная способность дороги, безопасность и допускаемые скорости движения поездов.

Путевое хозяйство Белорусской железной дороги включает около 12 тыс. км железнодорожных путей, из которых 7,2 тыс. км составляют главные железнодорожные пути, в том числе 5,5 тыс. км путей общего пользования (по данным на 2023 г.). Протяженность электрифицированных участков составляет 1,37 тыс. км. Кроме того, путевое хозяйство включает 12,7 тыс. стрелочных переводов, 1856 мостов и путепроводов, а также 1824 железнодорожных переезда. Главные пути уложены на железобетонные шпалы на 89%

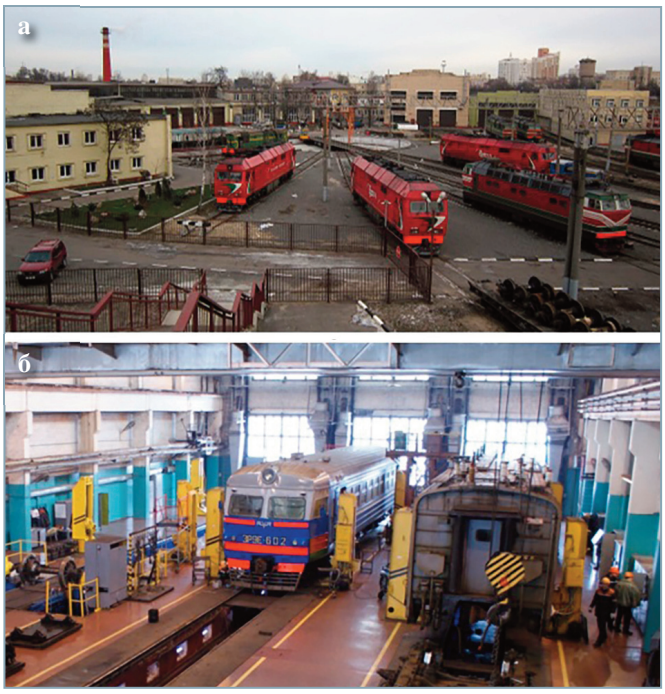


Рис. 5. Локомотивное депо ТЧ-1 Минск-Сортировочный (а) и моторвагонное депо Минск (б) [17]

от их общей протяженности, а рельсовые плети длиной 800 м и более уложены на 60% от протяженности главных путей. При этом ежегодно на БЖД производится восстановительный ремонт железнодорожных путей на основе новых материалов в объеме 130–140 км, восстановительный ремонт железнодорожных путей на основе старогодных материалов в объеме 100–130 км, средний ремонт в объеме 80–90 км, а также замена 150–200 стрелочных переводов новыми [18].

Содержание и ремонт объектов путевого хозяйства обеспечивают 20 дистанций пути, 6 дистанций защитных лесонасаждений, РУП «Рempуть Белорусской железной дороги», РУП «Рельсосварочный поезд № 10 станции Орша», а также «Центр механизации путевых работ БЖД».

Важной составляющей путевого хозяйства является его электрификация и электроснабжение. Этим направлением занимаются 7 специализированных дистанций – Минская, Барановичская, Брестская, Гомельская, Могилевская, Оршанская и Витебская. Причем последняя обслуживает неэлектрифицированные участки железной дороги [18–20].

Электрифицированные участки дороги работают с использованием переменного тока (27,5 кВ, 2×25 кВ) и постоянного тока (3,3 кВ). Развернутая длина контактной сети составляет 3449,5 км. Сеть электроснабжения представлена воздушными линиями 6–10 кВ протяженностью 7968,7 км и кабельными линиями 6–10 кВ протяженностью 1343 км.

Для обеспечения надежности работы службы электрификации и электроснабжения имеются дорожная электротехническая лаборатория и 20 тяговых подстанций. Контактную сеть обслуживают 26 районов контактной сети, энергетику – 18 районов электроснабжения.

Белорусская железная дорога была и остается одной из наиболее технически оснащенных среди железных дорог стран СНГ. Ее оснащенность современными средствами автоматики, телемеханики, связи и вычислительной техники является одним из решающих факторов в обеспечении безопасности движения поездов. В настоящее время на БЖД в электрическую централизацию включено 99% стрелок и сигналов на станциях. Устройствами интервального регулирования движения поездов на перегонах оборудовано более 70% от общей протяженности дороги. Все ее линии оборудованы устройствами поездной радиосвязи. Всю эту сложную многообразную технику обслуживают и содержат в исправном состоянии 13 дистанций сигнализации и связи [18, 20].

Особенности технолитотопа

Технолитотоп ЭГС железнодорожных комплексов Белоруссии представлен массивами грунтов различного состава и генезиса (магматических и метаморфических скальных, осадочных глинистых, песчаных, песчано-глинистых, искусственных и др.), служащих либо вмещающей средой (основанием), либо техногенными грунтами, под которыми понимают измененные и перемещенные в результате производственной и хозяйственной деятельности человека естественные грунты (скальные, дисперсные), и антропогенные образования, которые представляют собой твердые отходы жизнедеятельности населения, характеризующиеся коренными изменениями состава, структуры и текстуры природного минерального и органического сырья [21].

Строительство железных дорог и других объектов железнодорожной инфраструктуры неизбежно приводит к изменениям природного рельефа, так как требует частой отсыпки насыпей и создания выемок, что существенно влияет на геологическую составляющую этих эколого-геологических систем. Как уже отмечалось ранее, важнейшим сооружением инфраструктуры железнодорожного транспорта является железнодорожный путь. Его основу составляет земляное полотно, представляющее собой инженерное сооружение из грунта, на котором размещается верхнее строение пути. Оно воспринимает нагрузки от верхнего строения пути и передает их на грунтовое основание, а также выравнивает земную поверхность в пределах железнодорожной трассы для придания пути необходимого плана и профиля [10, 22]. От надежности земляного полотна зависят скорости движения, максимальная масса поездов, пропускная и провозная способность линий.

Земляное полотно работает в сложных условиях, поскольку подвергается значительным нагрузкам от проходящих поездов и влиянию природных факторов. От его целостности и состояния зависит исправность всего железнодорожного пути.

Земляное полотно, будучи грунтовым сооружением, обладает рядом важных характеристик, таких как прочность, устойчивость, ремонтопригодность, надежность и экономичность, которые напрямую зависят от свойств использованных грунтов. Для создания земляного полотна обычно используются местные или привозные грунты, обладающие различными физическими и физико-механическими характеристиками [10, 22].

Наиболее благоприятными грунтами являются щебеночные, галечные, гравийные, крупно- и среднезернистые песчаные, которые обладают высокой несущей способностью, хорошо пропускают воду (дренирующие грунты) и не изменяют своих свойств при замерзании. От свойств грунта зависят стабильность и долговечность земляного полотна. Для обеспечения надежности этого сооружения, построенного из местного грунта с низкими эксплуатационными характеристиками, обычно применяют уплотнение грунта (особенно в насыпях), устройство защитного слоя из дренирующих грунтов между земляным полотном и верхним строением пути, используют геотекстиль и теплоизоляционные материалы для предотвра-

щения образования деформаций при оттаивании, промерзании и пучении [10, 22].

Одним из главных врагов земляного полотна является вода (гидротоп), поскольку поверхностные воды, стекающие на полотно, могут вызывать его размывы, деформации и повреждения (рис. 6). Кроме того, при низких температурах вода, содержащаяся в порах грунта, может привести к образованию пучинистых деформаций, часто вызывающих вертикальные неровности рельсошпальной решетки.

Для защиты земляного полотна от поверхностных вод и устранения риска его размыва все поверхности полотна и прилегающей полосы отвода, как правило, планируют с учетом поперечных и продольных уклонов, что обеспечивает эффективный и оперативный отток поверхностных вод. Для перехвата, сбора и отвода воды применяют различные конструкции – водоотводные канавы, лотки, дренажные системы, ливневую канализацию и другие устройства. Самыми распространенными среди них являются канавы (водоотводные, нагорные, кюветы, резервы). Обычно они имеют трапецеидальную форму, а их размеры рассчитываются исходя из гидравлических параметров. Минимальный продольный уклон канав составляет 0,003. В районах с низким естественным уклоном, например на болотах и в речных поймах, он снижается до 0,002, а в исключительных случаях – до 0,001. Если расчетный максимально допустимый уклон канавы меньше уклона местности, на таком участке проектируют быстроток или перепад [23].

В условиях ограниченного пространства, например на станциях, а также при слабых грунтах вместо открытых канав используют водоотводные лотки, расположенные между шпалами или путями. Они могут иметь трапецеидальную или прямоугольную форму и оборудованы дренажными отверстиями по бокам для сбора грунтовых вод. Глубина междушпальных лотков обычно составляет 0,35; 0,5 или 0,7 м, а междупутных – 0,75; 1,25 или 1,5 м. Лотки изготавливаются из железобетона или полимерных материалов.

Для защиты земляного полотна от негативного воздействия грунтовых вод используют дренажные системы, предназначенные для снижения уровня грунтовых вод (УГВ), их перехвата и отвода. Для УГВ под основной площадкой в выемках часто устраивают подкюветные дренажи. Для этого под кюветом создается траншея, верхняя часть которой заполняется глиной, а ниже – фильтрующим слоем из мелкого гравия или крупнозернистого песка. Снизу укладывается дренажная труба с отверстиями, через которые под действием силы тяжести происходит фильтрация и отвод грунтовых вод. Для контроля работы дренажей и их очистки предусматривают устройство смотровых колодцев [23].

Наряду с реализацией *экологических геохимической и геофизической функций литотопов* рассматриваемых ЭГС,



Рис. 6. Размыв железнодорожного полотна под Оршей 28 июля 2023 г. (источник фото: https://www.instagram.com/p/CvPCP1WO1h6/)

о факторах формирования которых говорилось выше при рассмотрении особенностей техногенных воздействий на компоненты природной среды, строительство и эксплуатация ЭГС железнодорожных комплексов нередко являются причиной проявления и развития различных экзогенных геологических и инженерно-геологических процессов на территории Белоруссии, влияющих на *геодинамическую экологическую функцию* этих ЭГС. Среди таких процессов следует отметить выветривание, эрозионные процессы, суффозию, осадки и деформации зданий и др.

Например, изменение рельефа и нарушение естественного стока воды при строительстве железных дорог может значительно усилить эрозию земель. Особенно подвержены этому откосы железнодорожных выемок и насыпей из-за их крутизны и одновременного разрушения под воздействием выветривания. Водоотводные канавы, спроектированные с ошибками (слишком крутой уклон или недостаточный размер), также могут

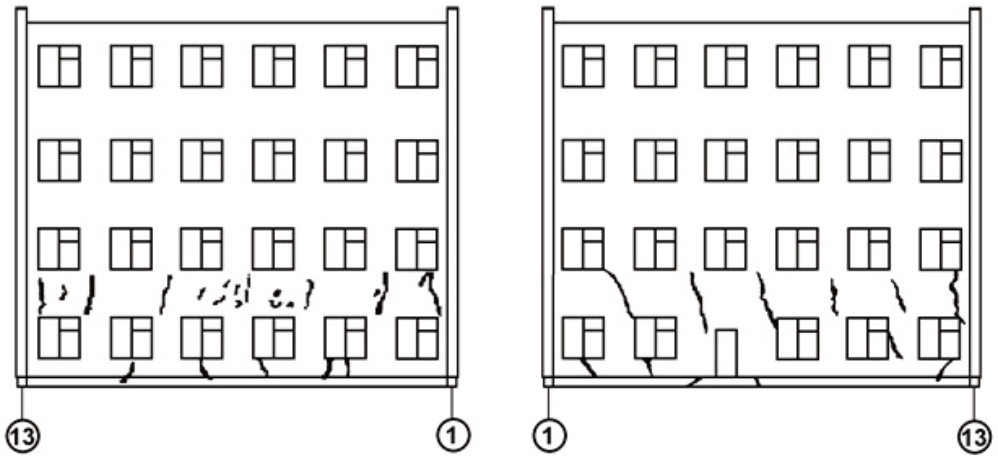


Рис. 7. Трещины на фасадах здания поста электрической централизации станции Могилев-1 [25]

стать очагами эрозии и даже привести к образованию оврагов, особенно в районах с лёссовидными грунтами. Строительство мостов может изменить гидрологический режим рек, вызывая усиление эрозии дна и берегов, что угрожает устойчивости опор мостов. Уничтожение растительности вдоль железных дорог (вырубка леса, снятие дерна) также способствует активизации эрозионных процессов [24].

При строительстве дорог в сильнопересеченной местности глубокие выемки обнажают грунты, которые ранее были защищены от воздействия окружающей среды. Эти грунты начинают интенсивно выветриваться, и продукты разрушения из-за крутизны откосов осыпаются вниз, загрязняя канавы и другие дренажные устройства. Если не принять защитные меры, процесс выветривания будет прогрессировать, захватывая прилегающие территории. Кроме того, вскрытие водоносных горизонтов может способствовать провальным явлениям, вызванным суффозией.

Динамические нагрузки от движущегося железнодорожного транспорта, особенно в условиях техногенно нарушенного гидродинамического режима, часто способствуют возникновению деформаций фундаментов и стеновых конструкций зданий и сооружений, расположенных вблизи. Ярким примером является ситуация, возникшая в начале 2000-х годов в Могилеве (улица Вокзальная, дом № 5б), когда из-за вибрационных нагрузок от железнодорожного транспорта и увлажнения грунтов основания произошло неравномерное оседание здания поста электрической централизации станции Могилев-1, о чем свидетельствовали многочисленные трещины на его фасаде (рис. 7).

При строительстве железнодорожных насыпей грунт под ними подвергается изменениям в распределении напряжений. Возрастание вертикальных напряжений может привести к уплотнению грунтовой толщи. Обычно эти дополнительные напряжения невелики, поэтому уплотнение не всегда существенно. Однако, если в грунтовой толще есть слабые слои (торф, заторфованные грунты, илы), уплотнение становится заметным. В таких случаях под насыпью происходит значительное сжатие грунта в активной зоне. Это может вызвать осадку поверхности, что, в свою очередь, может повредить близлежащие сооружения. Важно отметить, что процесс уплотнения не происходит мгновенно и может занимать месяцы или даже годы [24].

Резюмируя вышесказанное, следует отметить, что технолитотопы эколого-геологических систем железнодорожных комплексов уникальны тем, что в них, как и в ЭГС промышленных комплексов, в полной мере проявляются все четыре экологические функции литосферы – ресурсная, геохимическая, геофизическая и геодинамическая.

Особенности техноатмотопа

Атмотоп в приземной части воздуха рассматриваемой ЭГС в целом почти не отличается по составу от приземного атмосферного воздуха прилегающих территорий. В большинстве своем железнодорожные организации Белорусской железной дороги характеризуются как объекты с незначительным вредным воздействием на атмосферный воздух. Выбрасываемые ими вещества либо относятся к третьему или четвертому классам опасности, либо имеют малую интенсивность и небольшую продолжительность поступления в атмосферу [17].

Вместе с тем в ряде случаев имеют место источники выделения вредных веществ как с существенной мощностью выброса, так и со значительными валовыми выбросами. Особого внимания требуют склады насыпных материалов и площадки перегрузки сыпучих грузов дистанций погрузочно-разгрузочных работ (логистических центров переработки грузов). В процессе своей деятельности такие организации с высокой производительностью осуществляют переработку

широкой номенклатуры различных сыпучих грузов, в результате чего происходят существенные выделения в атмосферный воздух пылящих продуктов переработки. Особенностью таких предприятий на БЖД является частое их расположение в непосредственной близости от жилых массивов [17].

Особенности техноэдафотопа

Почвы, находящиеся в сфере влияния эколого-геологических систем железнодорожных комплексов классифицируются как техногенные и представляют собой измененные человеческой деятельностью земельные ресурсы, сочетающие в себе признаки почв горнодобывающих и промышленных территорий.

Как и в промышленных ЭГС, территории, занятые ЭГС железнодорожных комплексов, в зависимости от характера дневной поверхности подразделяются на два основных типа [26]:

1) открытые (с частичным озеленением);

2) закрытые (застроенные и заасфальтированные).

На открытых территориях выделяют четыре группы поверхностных почвенно-грунтовых образований:

- естественно-антропогенные поверхностно преобразованные почвы;
- антропогенные глубоко преобразованные почвы;
- молодые почвы, образовавшиеся на обнажившихся и насыпных субстратах;
- искусственно созданные почвоподобные образования – технозёмы, образованные в процессе рекультивации земель, пострадавших от различного рода аварий на транспорте (при разливах химически опасных жидкостей, нефтепродуктов и др.).

На заасфальтированных территориях второго типа под асфальтобетоном или другим дорожным покрытием формируется особая группа образований – запечатанные грунты (в том числе экранозёмы).

Естественно-антропогенные поверхностно преобразованные почвы характеризуются тем, что их верхний слой до глубины 50 см поврежден, изменен или обогащен за счет внесенного материала, при этом средний и нижний слои сохраняют природную структуру. Их классификация основывается на исходном типе почвы, к которому добавляется первая часть «техно-» (например, технодерновая, технодерново-подзолистая и проч.). Подобные почвы получили распространение преимущественно в придорожных зонах железнодорожных магистралей.

Антропогенные глубоко преобразованные почвы образуют группу, состоящую из механически (или физически) преобразованных, химически преобразованных почв и почвоподобных тел – «технозёмов».

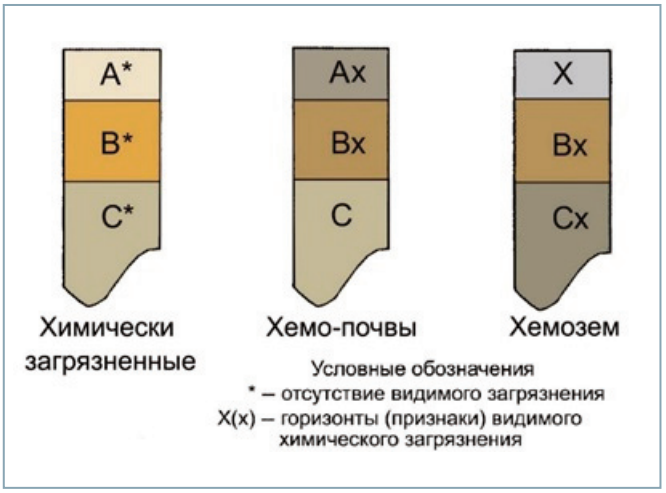


Рис. 8. Схемы строения профилей химически преобразованных почв, входящих в состав техноэдафотопа ЭГС железнодорожных комплексов [26]

Механически (или физически) преобразованные почвы – это почвы, которые не просто изменены человеком, а кардинально перекопаны, перемешаны и перестроены на значительную глубину (например, при создании котлованов под фундаменты зданий и сооружений, устройстве траншей для коммуникаций, планировке территорий и т.д.). Их профиль характеризуется отсутствием природных генетических почвенных горизонтов.

Химически преобразованные почвы (например, почвы на участках разливов нефти и нефтепродуктов при авариях подвижного состава – нефтезёмы) выявляются по морфологическим изменениям, вызванным воздействиями различных химических веществ, что ведет к вредному химическому загрязнению и стратификации техногенного субстрата. При этом существенно преобразуются генетические горизонты, могут появляться новые горизонты, не свойственные данному типу почвообразования (рис. 8). Вновь сформированный профиль может быть отчасти подобен естественному, но такой измененный грунт чаще всего представляет собой почвенно-техногенное образование, не имеющее полных природных аналогов. Трансформация профиля сопровождается существенным изменением характера миграции веществ, гумусообразования и других почвенных процессов.

Молодые почвы на техногенных грунтах – это почвы начальных этапов развития на техногенных или природных рыхлых и плотных субстратах (*эмбриозёмы*). Эти почвы имеют органогенный слаборазвитый верхний горизонт мощностью менее 5 см, а их нижние горизонты представлены различными обнажившимися естественными или насыпными грунтами (например, на откосах дорожных выемок и насыпей). По существу, они являются литогенными почвами [26].

Технозёмы – это искусственные почвоподобные образования, возникающие в результате рекультивационных мероприятий

на землях, подвергшихся антропогенному воздействию. Они характеризуются наличием одного или нескольких насыпных горизонтов, сформированных из природных или техногенных грунтов, общей мощностью более 50 см, и поверхностного плодородного слоя. Несмотря на выполнение почвенных функций, технозёмы отличаются от естественных почв отсутствием генетической связи между составляющими их слоями и, как следствие, неразвитостью системы генетических горизонтов.

Строительство дорог и другой транспортной инфраструктуры приводит к неизбежному запечатыванию почвы и других грунтов. Почвы, погребенные под асфальтом и другими дорожными покрытиями (*экранозёмы*), подвергаются значительным изменениям: они становятся сильно уплотненными, нарушается их водный, тепловой и газовый баланс, а микроорганизмы вынуждены адаптироваться к отсутствию кислорода. Такие почвы лишены доступа к внешним источникам питательных веществ, а процесс укладки дорожного покрытия часто повреждает верхние слои почвы. Если при строительстве дорог снимается верхний слой почвы и после этого участок непосредственно покрывается насыпным грунтом, то под последним образуется соответствующий *запечатанный грунт*[5] [26].

ОСОБЕННОСТИ БИОТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ЭГС ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОМПЛЕКСОВ БЕЛОРУССИИ

Особенности техномикробоценоза

В состав микробоценоза ЭГС железнодорожных комплексов Белоруссии, как и в других эколого-геологических системах, входят различные группы микроорганизмов, в том числе простейшие, низшие водоросли, низшие грибы, актиномицеты и бактерии, основная масса которых находится в почве. Однако из-за своей специфичности эта микробиота практически не изучена на территории страны. Тем не менее исследования, проведенные Ж.А. Аликиной, Н.И. Зубревым, И.Ю. Крошечкиной, О.В. Чемкаревой, Т.Н. Холодилиной и другими [27, 28 и др.], дали ценную информацию для характеристики микробных сообществ в контексте функционирования ЭГС железнодорожных комплексов на территории Белоруссии. Например, Ж.А. Аликиной и др. [27] на одном из участков железной дороги Европейской части России был изучен показатель общего микробного числа (ОМЧ) почв, находящихся в зоне влияния железнодорожного транспорта. Отбор проб проводился в сентябре 2021 года, при положительной температуре воздуха в отсутствие атмосферных осадков методом «конверта» на глубине 0–5 см. Для исследования были выбраны следующие четыре участка, различающиеся по своим характеристикам и удаленности от железнодорожного полотна:

1) маневровый район за локомотивным депо, непосредственно прилегающий к железнодорожным путям;

2) участок, расположенный параллельно железнодорожной линии и отделенный от нее защитным экраном;

3) участок вблизи станции 10 км, протягивающийся вдоль железнодорожного полотна и характеризующийся наличием лесополосы;

4) участок, удаленный на 400 м от железнодорожного переезда и не имеющий каких-либо препятствий для распространения загрязняющих веществ.

Во всех исследованных образцах почвы независимо от места отбора были обнаружены сапрофитные микроорганизмы в форме палочек и кокков. Общее количество микроорганизмов в каждой пробе указано в таблице.

Таблица. Общая численность микроорганизмов (ОМЧ) в исследованных почвах в зоне влияния железнодорожного транспорта [27]

№ участка отбора проб	№ пробы	Количество колоний в 1 г почвы, КОЕ/г почвы
1	1.1	$20{,}5\times10^6$
	1.2	$2{,}8\times10^6$
2	1.3	$1{,}0\times10^6$
	1.4	$2{,}5\times10^6$
	1.5	$5{,}1\times10^6$
3	2.1	$1{,}9\times10^6$
	2.2	$2{,}5\times10^6$
	2.3	$2{,}7\times10^6$
	2.4	$2{,}3\times10^6$
4	3.1	$2{,}5\times10^6$
	3.2	$4{,}0\times10^6$
	3.3	$4{,}7\times10^6$
	3.4	$4{,}9\times10^6$

[5] В инженерно-геологическом контексте экранозёмы можно рассматривать как разновидность запечатанных грунтов, поскольку в инженерной геологии почвы относят к грунтам (*прим. ред.*).

Анализ данных показал, что в пробе 1.1, взятой в 3 м от железнодорожных путей, общее микробное число значительно выше, чем в других образцах. Вероятно, это связано с загрязнением почвы нефтепродуктами и другими углеводородами, которые стимулируют рост определенных видов микроорганизмов [29].

На участке 1 наблюдается снижение ОМЧ по мере удаления от железной дороги. Например, в пробе 1.2, взятой в 5 м от путей, общее количество микроорганизмов более чем в 7 раз меньше, чем в пробе 1.1. На участках 2 и 4, напротив, отмечается заметное увеличение численности микроорганизмов. Эти различия в ОМЧ скорее всего обусловлены разной доступностью органических и минеральных веществ, необходимых для развития микробоценоза [30]. На участке 3 наблюдается постепенное увеличение ОМЧ по мере удаления от источника загрязнения. Небольшое снижение численности микроорганизмов в пробе 2.4, взятой в 50 м от железной дороги в зоне лесных насаждений, по сравнению с пробой 2.3, взятой на таком же расстоянии, но на открытом участке, может быть связано с расположением точек отбора проб относительно деревьев. В почве под периферией кроны дерева создаются более благоприятные условия для развития микробного сообщества, чем у основания дерева. Однако содержание загрязняющих веществ под кронами деревьев может быть несколько выше, если происходило их вымывание из крон под действием кислых дождей [31].

Не менее интересны результаты исследований И.Ю. Крошечкиной и Н.И. Зубрева [28], проводивших оценку видового состава микроорганизмов в почвах полосы железнодорожного отвода одного из участков обслуживания пассажирских вагонов Горьковской железной дороги с целью выявления уровня их бактериального загрязнения.

Для оценки бактериальной нагрузки на почвенный покров авторами работы [28] были выделены репрезентативные участки и разработана методика отбора проб. Выбор участков основывался на особенностях эксплуатации прилегающих железнодорожных путей. В частности, были исследованы почвы рядом с путями, обслуживающими поезда с современными экологичными туалетами (путь № 1), поезда без таких систем (путь № 7), а также в зоне стоянки пассажирских поездов и вагонов с отоплением (путь № 12). Образцы почв отбирались летом вдоль железнодорожных путей на глубине от 0 до 5 см. Для каждого объединенного образца использовался метод «конверта», при котором смешивались 12 точечных проб. Отбор проводился в сухую погоду при температуре 26 °С. Выполненный санитарно-микробиологический анализ включал определение ОМЧ, титра возбудителя газовой гангрены и количества бактерий группы кишечной палочки (БГКП). Также были выделены и подсчитаны основные группы почвенных микроорганизмов (бактерии, грибы и актинобактерии) с использованием соответствующих питательных сред.

Исследование почвенных образцов показало существенные различия в составе микрофлоры в зависимости от места отбора. На пути № 7 наблюдалась высокая концентрация бактерий и грибов, особенно спорообразующих бактерий рода *Bacillus*, а также грибов *Penicillium* и *Trichoderma* с небольшим количеством фитопатогенного *Fusarium*. На пути № 12, напротив, доминировали актиномицеты. Вероятно, на эти различия повлияли особенности эксплуатации путей, включая обслуживание подвижного состава, интенсивность использования и уровень химического загрязнения. Наблюдалась обратная корреляция между количеством грибов и актиномицетов. Во всех образцах были обнаружены бактерии группы кишечной палочки (*Escherichia coli*), что свидетельствует о фекальном загрязнении, наиболее выраженном на пути № 7 [28].

Особенности технофитоценоза

Фитоценозы ЭГС железнодорожных комплексов Белоруссии отличаются довольно широким разнообразием видов. Это объясняется тем, что железнодорожные пути, насыпи и полосы отвода создают уникальные местообитания, на которых присутствуют представители синантропной флоры. Данные местообитания имеют свои экосистемные условия, резко отличающиеся от естественных. Постоянно осуществляемое техническое обслуживание и ремонт полотна, применение различных химических препаратов и палов для борьбы с рудеральными растениями, засоряющими балластный слой, рубка подроста древесно-кустарниковых пород и выкашивание травостоя в полосе отвода также являются особенностями железной дороги как места обитания растений.

Динамика флоры на железных дорогах наиболее заметна с появлением видов, нехарактерных для местной флоры. Исследования показывают, что вдоль железных дорог в центральной части Белоруссии начинают распространяться более южные полесские виды, такие как василек рейнский (*Centaurea rhenana*) и молочай кипарисовый (*Euphorbia cyparissias*). Здесь также наблюдаются редкие адвентивные виды, такие как василек раскидистый (*Centaurea diffusa*), резеда желтая (*Reseda lutea*), щирица белая (*Amaranthus albus*) и др. Многие растения лучше развиваются на железнодорожных насыпях, чем в естественных условиях, в том числе гулявник изменчивый (*Sisymbrium polymorphum*), качим метельчатый (*Gypsophila paniculata*), коровяк фиолетовый (*Verbascum phoeniceum*), кострец безостый (*Bromopsis inermis*), чина лесная (*Lathyrus sylvestris*) и др.

В целом видовой состав растительности железных дорог довольно богат. Так, исследования, которые провели в 2019



Рис. 9. Фитоценозы окрестностей остановочного пункта Лётцы (одного из участков железной дороги Витебск – Полоцк): а – общий вид остановочного пункта; б – клевер средний (*Trifolium medium*); в – девясил иволистный (*Inula salicina*); г – осока заячья (*Carex leporina*) [34]

году Н.М. Дайнеко и Т.С. Сазанович [32], показали, что только на одном из участков железнодорожного пути в направлении Жлобин – Могилев протяженностью 550 м произрастает 62 вида высших сосудистых растений. Анализ таксономического состава показал, что собранные виды относятся к 18 порядкам, 27 семействам и 53 родам. К ведущим 6 семействам относятся *Asteraceae, Poaceae, Fabaceae, Polygonaceae, Brassicaceae, Plantaginaceae*, на долю которых приходится 56,5% от общего количества видов. Особенно заметным оказалось видовое разнообразие семейства *Asteraceae* (19,4%), что связано с его высокой эволюционной развитостью, адаптационными свойствами и экологической пластичностью. Также был зафиксирован один вид сосудистых споровых растений из семейства *Equisetaceae*[6], что указывает на неблагоприятные условия произрастания, связанные с избытком влаги и загрязнением (закислением) почв. В целом для исследуемой флоры характерно преобладание семейств с небольшим количеством видов, причем большинство семейств (66,6%) представлены всего одним или двумя видами.

Анализ жизненных форм растений показал, что наиболее распространены гемикриптофиты (43,5%), что может указывать на проникновение видов из естественных растительных сообществ на территорию железнодорожной насыпи. Терофиты (27,4%) и геофиты (11,3%) также играют заметную роль. Высокая доля терофитов, известных своей способностью быстро осваивать новые территории, говорит о постоянных нарушениях и экстремальных условиях вдоль железной дороги. Остальные жизненные формы, такие как хамефиты, переходные формы (терофиты-гемикриптофиты, гемикриптофиты-хамефиты, гемикриптофиты-геофиты), гидрофиты и нанофанерофиты, встречаются значительно реже.

Интересные результаты по изучению растительности на выемках и насыпях железных дорог в северной части страны представлены Н.А. Носковой [33]. Исследования проводились в июле 2018 года на одном из участков дороги Витебск – Полоцк в районе населенного пункта Малые Лётцы (рис. 9, а) протяженностью около 1000 м. На 100 площадках по 1 м^2 (по 25 по сторонам насыпей и выемок) автором было зафиксировано 77 видов цветковых растений, принадлежащих к 66 родам и 30 семействам. Видовой состав местообитаний оказался довольно различным, о чем свидетельствует низкий индекс Жаккара (от 0,14 до 0,34).

[6] Представители семейства хвощовые (*Equisetaceae*) являются индикаторами избыточного увлажнения (высокого уровня грунтовых вод) и закисления почвы. На железнодорожных насыпях они часто растут в понижениях у подошвы насыпи, где скапливается вода (*прим. ред.*).

Наибольшее сходство наблюдалось между растительностью насыпей южной и северной сторон, а наименьшее – между выемкой на северной стороне и насыпью на южной. Общая плотность травянистых растений убывала в следующем порядке: выемки северной (45,2 экз./м^2), выемки южной (38,24 экз./м^2), насыпи северной (37,6 экз./м^2) и насыпи южной (26,36 экз./м^2) экспозиции. На выемках северной экспозиции преобладал клевер средний (19,44 экз./м^2), а на выемках южной – девясил иволистный (7,84 экз./м^2) (рис. 9, б, в). На насыпях обеих экспозиций доминировала осока заячья (5,28 и 5,36 экз./м^2 для северной и южной экспозиций соответственно) (рис. 9, г). Анализ видового богатства и биологического разнообразия показал, что индекс Менхиника (видовое богатство) выше на насыпях (3,86–7,40), чем на выемках. При этом среднее обилие растений (экз./м^2) было выше на выемках. Концентрация видов была слабой (0,08–0,22), а выравненность, напротив, высокой (0,66–0,82). Индекс Шеннона (биологическое разнообразие с учетом выравненности) имел средние значения (2,16–2,98).

Особенности технозооценоза

В состав технозооценозов изучаемых эколого-геологических систем входят как беспозвоночные, так и позвоночные животные. Это разнообразие во многом определяется особенностями функционирования технических подсистем ЭГС, а также характеристиками литотопа, эдафотопа и фитоценоза, рассмотренными выше. Как и в большинстве природных, природно-техногенных и техногенных ЭГС, в этих экогеосистемах наиболее представлены беспозвоночные. К ним относятся насекомые, черви, паукообразные (в том числе пауки и клещи) и брюхоногие моллюски. Среди насекомых, которые играют ключевую роль в функционировании этих ЭГС, выделяются жуки, такие как жужелицы и божьи коровки, а также чешуекрылые, стрекозы и перепончатокрылые, включая муравьев и шмелей. Эти группы хорошо адаптировались к условиям, созданным в результате человеческой деятельности, и занимают важные экологические ниши в ЭГС железнодорожных комплексов.

Значимость беспозвоночных в экосистемах объектов железнодорожной инфраструктуры достаточно велика, поскольку они выполняют множество функций, способствующих поддержанию экологического баланса. Например, насекомые, такие как жуки и муравьи, активно участвуют в разложении органических остатков, что способствует улучшению качества почвы и поддержанию ее плодородия. Кроме того, они служат пищей для многих позвоночных животных, таких как птицы, тем самым обеспечивая связь между различными уровнями пищевой цепи.

Черви, в свою очередь, играют ключевую роль в аэрации почвы и переработке органических веществ, что также способствует улучшению условий для роста растений. Их деятельность способствует созданию более устойчивой экосистемы, способной адаптироваться к изменениям, вызванным человеческой деятельностью. Пауки (практически все из которых являются хищниками) и клещи (некоторые из которых тоже хищники) регулируют численность других беспозвоночных, тем самым предотвращая их чрезмерное размножение и поддерживая баланс в экосистеме.

Брюхоногие моллюски, обитающие во влажных местах, также вносят свой вклад в экосистему, участвуя в процессе поддержании ее чистоты. Их присутствие может служить индикатором здоровья экосистемы, так как изменения в их численности могут сигнализировать о нарушениях в ней.

Среди *позвоночных* территории Белоруссии, экологически связанных с ЭГС железнодорожных комплексов, выделяют многих представителей основных групп животных. Здесь находят себе место земноводные и рептилии, птицы и млекопитающие. Например, из земноводных вблизи железнодорожных насыпей возле воды можно встретить серую жабу (*Bufo bufo*), из рептилий – прыткую ящерицу (*Lacerta agilis*).

Велико видовое разнообразие птиц. Например, исследования С.А. Дорофеева и др. [35] в Белорусском Поозерье показали, что придорожные лесополосы служат местом обитания для значительного количества видов птиц (89 видов, что составляет более трети, или 36,6%, от общего числа видов, встречающихся в регионе). Птицы большинства из них (78 видов) гнездятся здесь, причем представители 54 видов делают это регулярно. В этих лесополосах обитают птицы 15 отрядов, 36 семейств и 62 родов. Преобладают воробьинообразные (62,7% видов). Большинство птиц, обитающих в придорожных насаждениях, являются перелетными (70%), а низкое количество зимующих и оседло-кочующих видов, вероятно, связано с антропогенгенным воздействием и мозаичностью растительности. В основном встречаются обычные и малочисленные виды, но присутствуют и редкие. Экологическая структура характеризуется преобладанием лесных видов (более 60% вместе с кустарниковыми и опушечными), а также значительным количеством луго-полевых птиц. Основу сообществ составляют виды европейского происхождения, характерные для широколиственных и смешанных лесов – представители семейств соколиные (*Falconidae*), фазановые (*Phasianidae*), голубиные (*Columbidae*), стрижиные (*Apodidae*), трясогузковые (*Motacillidae*), крапивниковые (*Troglodytidae*), завирушковые (*Prunellidae*), дроздовые (*Turdidae*), славковые (*Sylviidae*), мухоловковые (*Muscicapidae*), синицевые (*Paridae*), поползневые (*Sittidae*), пищуховые (*Certhiidae*), врановые (*Corvidae*), скворцовые

(*Sturnidae*), вьюрковые (*Fringillidae*) и др. Плотность гнездования птиц в придорожных лесонасаждениях составляет в среднем 4,3 пары на гектар, что соответствует общей биомассе 926,7 г на гектар. Наибольший вклад в плотность гнездования вносят зяблики (*Fringilla coelebs*), грачи (*Corvus frugilegus*), пеночки-теньковки (*Phylloscopus collybita*) и рябинники (*Turdus pilaris*), а в общую биомассу – грачи и рябинники. Многолетние наблюдения выявили, что численность 10,3% видов птиц в придорожных лесонасаждениях сокращается, в то время как только у 1,2% видов наблюдается ее рост. Большинство видов (68,9%) демонстрируют стабильную численность, а у 17,2% видов наблюдаются значительные колебания численности по годам. Низкий индекс устойчивости орнитофауны указывает на ее уязвимость и нестабильность, вызванную воздействием различных негативных факторов. Несмотря на это, придорожные лесонасаждения остаются важным местом обитания для более чем трети видового состава птиц региона, включая 22 редких вида и 5 видов, занесенных в Красную книгу Белоруссии, таких как хохлатый жаворонок (*Galerida cristat*a), коростель (*Crex crex*), обыкновенная пустельга (*Falco tinnunculus*), кобчик (*Falco vespertinus*), чеглок (*Falco subbuteo*) [35].

Что касается млекопитающих, то в полосе отвода железных дорог можно встретить как мелких грызунов (полевок, мышей и др.), так и более крупных животных (лис, косуль, лосей, кабанов и др.). Важно отметить, что животный мир в зонах влияния рассматриваемых ЭГС представляет собой сложную и многогранную экосистему, которая сталкивается с множеством вызовов (рис. 10). Железнодорожные магистрали оказывают значительное влияние на жизнь диких животных, изменяя их привычные маршруты миграции, места обитания и даже поведение. Одним из основных последствий строительства железных дорог является фрагментация среды обитания. Многие виды животных, такие как олени, лисы и мелкие млекопитающие, могут оказаться изолированными в небольших участках леса или поля, что затрудняет им поиск пищи и партнеров для размножения. Это может привести к снижению численности популяций и даже к вымиранию некоторых видов.



Рис. 10. Лось, бегущий вдоль железнодорожного вокзала в Гомеле (источник фото: https://people.onliner.by/2021/05/22/)

Социум

Начиная с середины XIX века железные дороги оказывают существенное влияние на экономику Белоруссии. Их можно сравнить с локомотивом, который и в прямом, и в переносном смысле повлек за собой развитие белорусского хозяйства. Именно с середины XIX века железнодорожное строительство стало ключевым фактором интеграции экономики страны сначала в общероссийские, а затем и в европейские рыночные системы. Однако железные дороги – это не только экономический успех, достигнутый с их помощью. Это также один из ярких исторических примеров воздействия на социум техногенного фактора: строительство и эксплуатация железных дорог привели к появлению наиболее квалифицированной и организованной трудовой среды рабочих.

Кроме того, железные дороги дали начало первым в Белоруссии учебным заведениям для подготовки технических специалистов: до 1917 года железнодорожные училища были открыты в Минске, Гомеле и Барановичах. Также сформировалась особая профессиональная группа инженеров, чьи навыки и инновационные способности нашли применение и в других сферах народного хозяйства. Железные дороги сыграли исключительную роль и в процессе урбанизации Белоруссии. Благодаря им появились новые города, такие как Барановичи, Молодечно, Осиповичи, Жабинка, Жлобин, Лунинец, Калинковичи и Кричев. Старые городские поселения, такие как Орша и Лида, получили развитие и ожили благодаря железнодорожному сообщению. В то же время некоторые их ровесники по средневековью (Мстиславль, Несвиж, Новогрудок), не имеющие связи с железными дорогами, утратили важный стимул к росту.

Благодаря железным дорогам значительно повысилась мобильность общества и динамика социальных перемен. Для Белоруссии начало железнодорожного строительства является наиболее выразительным признаком прихода новой эпохи – эпохи индустриального общества.

В настоящее время белорусская магистраль – это мощный транспортный комплекс с большим техническим и интеллектуальным потенциалом, в полном объеме обеспечивающим потребности предприятий страны и населения в перевозках грузов и пассажиров. За этим впечатляющим результатом стоит труд огромной команды – более 80 тыс. сотрудников самых разных профессий.

В постковидный период, начиная с 2020 года, Белорусской железной дорогой ежегодно перевозится в среднем порядка 100 млн т грузов и около 60 млн пассажиров. Существующая маршрутная сеть БЖД обеспечивает пассажирские перевозки в международном, межрегиональном и региональном сообщениях, а также между Минском и городами-спутниками. В настоящее время железнодорожное сообщение охватывает более 2100 населенных пунктов республики. Для этих целей создана и содержится инфраструктура для осуществления посадки и высадки пассажиров, а также функционируют 19 вокзальных комплексов [20].

Международные пассажирские перевозки в сообщении Беларусь – Россия организованы по основным пассажирообразующим направлениям в прямом и беспересадочном сообщении. Курсируют 20 пар поездов международных линий, из которых 11 пар – формирования БЖД и 9 пар – РЖД. Пассажирам предоставлена возможность проезда в сообщении Минск – Москва, Брест – Москва, Полоцк – Москва (беспересадочные вагоны), Гродно – Москва (беспересадочные вагоны), Брест – Минск – Санкт-Петербург, Гомель – Москва, Гомель – Санкт-Петербург, Гродно – Санкт-Петербург (беспересадочные вагоны), Минск – Мурманск, Минск – Адлер, Калининград – Москва, Калининград – Санкт-Петербург, Калининград – Адлер, Минск – Анапа.

Для удовлетворения потребности населения в пассажирских перевозках в пределах республики осуществляется курсирование 25 пар поездов межрегиональных линий бизнес-класса, 9 пар – региональных линий бизнес-класса, 36 пар – межрегиональных линий экономкласса, 250 пар – региональных линий экономкласса, 36 пар – городских линий [20]. Также для перевозок пассажиров в межрегиональном сообщении и региональном сообщении бизнес-класса используются современные электропоезда и дизель-поезда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все компоненты ЭГС железнодорожных комплексов (как абиотические, так и биотические) обладают совокупностью специфических характеристик, обусловленных антропогенным воздействием, которые необходимо учитывать при их систематизации, описании и анализе экологических функций литосферы.

Выявленные особенности ЭГС железнодорожных комплексов Белоруссии можно рассматривать как сходные с таковыми для аналогичных ЭГС в России, что следует учитывать при инженерно-экологических исследованиях и изысканиях.

Работа выполнена в рамках: госбюджетной тематики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Эколого-геологические системы: структура, многообразие, систематика и их анализ» (раздел 0110, для тем по госзаданию, номер 5-4-2021, номер ЦИТИС 121042200089-3); научного направления «Изучение закономерностей функционирования природно-технических систем Беларуси, мониторинг и управление их состоянием», утвержденного приказом ректора Витебского государственного университета имени П.М. Машерова № 7-н от 20.02.2025.

Список литературы

1. Трофимов В.Т. Эколого-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. 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.
4. Галкин А.Н., Королев В.А. Классификация эколого-геологических систем Беларуси на основе учета особенностей литотопов и инженерно-хозяйственных объектов // Літасфера. 2023. № 1 (58). С. 98–109.
5. Ивуть Р.Б., Косовский А.А., Стефанович Н.В. Единая транспортная система и география транспорта: учеб. пособие. Минск: БНТУ, 2009. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/236. Дата последнего обращения: 16.05.2025.
6. Рахманько В.Г. Этапы становления и развития Белорусской железной дороги // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. Наука и транспорт. 2001. № 2 (3). С. 4–13.
7. 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.
8. Сухонос Н.И. Транспортный комплекс Республики Беларусь и транзитный потенциал: состояние, развитие и перспективы // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. 2012. № 1. С. 96–102.
9. Королёв В.А., Галкин А.Н. К разработке систематики эколого-геологических систем Белоруссии // Инженерная геология. 2023. Т. 18. № 2. С. 12–28. DOI: https://doi.org/10.25296/1993-5056-2023-18-2-12-28.
10. Грудницкий С. Оптимизация затрат и внедрение современных технологий: БЖД утвердила стратегию повышения энергоэффективности // SB.BY – Беларусь сегодня [электронный ресурс]. URL: https://www.sb.by/articles/optimizatsiya-

zatrat-i-vnedrenie-sovremennykh-tekhnologiy-bzhd-utverdila-strategiyu-povysheniya-ener.html?ysclid=mkcemfl3nt380762483. Дата последнего обращения: 22.01.2026.

11. Ларин А.Н., Ларина И.В. Воздействие железнодорожного транспорта и обеспечивающей его функционирование инфраструктуры на окружающую природную среду // Инновационная экономика и общество. 2019. № 3 (25). С. 47–53.
12. Озерова Е.С. Экология ВСНТ для гуманитарных специальностей: учебное пособие. М.: МИИТ, 2009. 103 с.
13. Павлова Е.И. Экология транспорта: учебник. М.: Транспорт, 2000. 248 с.
14. Казанцев И.В. Влияние железнодорожного транспорта на загрязнение и состояние почв // Символ науки. 2016. № 4 (11). С. 26–28.
15. Пильгун Т.В., Осипова Ю.А. Транспортные системы: учебно-методическое пособие (в 2 ч.). Минск: БНТУ, 2023. Ч. 1. Инфраструктура грузовых перевозок. 87 с.
16. Шалягина О.Н. Организация перевозок грузов, пассажиров и багажа: учебное пособие. Минск: РИПО, 2015. 272 с.
17. Андрейчиков М.В., Горбачева О.В. Характеристика источников загрязнения атмосферного воздуха и компонентного состава выбросов в атмосферный воздух в организациях Белорусской железной дороги // Материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы безопасности на транспорте». Гомель: Белорус. гос. ун-т трансп., 2021. Часть 1. С. 211–213.
18. Якубук Ю.П., Луговская И.С. Транспорт и логистика // Белорусская энциклопедия [электронный ресурс]. URL: https://belarusenc.by/belarus/detail-article.php?ID=9223#railway. Дата последнего обращения: 22.01.2026.
19. Белорусская железная дорога // Википедия. Свободная энциклопедия [электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Белорусская_железная_дорога?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera. Дата последнего обращения: 22.01.2026.
20. Официальный сайт Белорусской железной дороги [электронный ресурс]. URL: https://www.rw.by/. Дата последнего обращения: 22.01.2026.
21. Галкин А.Н., Акулевич А.Ф., Павловский А.И., Галезник О.И. Техногенные грунты: учеб. пособие. Минск: Вышэйшая школа, 2020. 192 с.
22. ТКП 45-3.03-163-2009 (02250). Железные дороги. Земляное полотно. Правила проектирования. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 99 с.
23. Железнодорожный путь / под ред. Е.С. Ашпиза. М.: ФГБОУ «Учебно-метод. центр по образованию на железнодор. транспорте», 2013. 544 с.
24. Ипатов П.П., Строкова Л.А. Общая инженерная геология: учебник. Томск: Томский политех. ун-т, 2012. 365 с.
25. Семенюк С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформируемом основании. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2003. 269 с.
26. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация: учебное пособие / под ред. Г.В. Добровольского. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
27. Аликина Ж.А., Чемкарева О.В., Холодилина Т.Н. Микробиологическое исследование почв в зоне влияния железнодорожного транспорта // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и экологической безопасности». Оренбург: Оренбург. гос. ун-т, 2021. С. 9–13.
28. Крошечкина И.Ю., Зубрев Н.И. Загрязнение поверхностных горизонтов почвы при эксплуатации железнодорожного транспорта // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. 2016. № 3 (91). С. 11–17.
29. Заборская О.Ю., Заборская А.Ю., Крамм Э.А. Почвенная микрофлора в качестве агента биодеградации нефтяных загрязнений // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 12-4 (66). С. 15–17.
30. Симонова Е.В., Максимова Е.Н. Микробиологический мониторинг антропогенно преобразованных почв // Самарский научный вестник. 2016. № 1 (14). С. 62–66.
31. Благодатская Е.В., Семенов М.В., Якушев А.В. Активность и биомасса почвенных микроорганизмов в изменяющихся условиях окружающей среды. М: ООО «Товарищество научных изданий КМК», 2016. С. 160–161.
32. Дайнеко Н.М., Сазанович Т.С. Характеристика флоры участка железнодорожной насыпи пригорода Жлобина // Эпоха науки. 2019. № 20. С. 594–599.
33. Носкова Н.А. Динамика видового состава, обилия и биологического разнообразия травянистой растительности в зависимости от ориентации насыпей и выемок железной дороги // Материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. студентов и магистрантов «Молодость. Интеллект. Инициатива». Витебск: Витебск. гос. ун-т, 2019. С. 66–68.
34. Растения Евразии // ECOportal.info [электронный ресурс]. URL: https://ecoportal.info/rasteniya-evrazii/. Дата последнего обращения: 22.01.2026.
35. Дорофеев С.А., Шаврова Е.В., Кузьменко В.Я. Структура орнитокомплексов придорожных лесонасаждений Белорусского Поозерья // Пространственно-типологическая структура населения птиц естественных и трансформированных экосистем Белорусского Поозерья / под ред. В.Я. Кузьменко. Витебск: ВГУ имени П.М. Машерова, 2021. С. 27–33.

References

1. Trofimov V.T. Ekologo-geologicheskaya sistema, ee tipy i polozhenie v strukture ekosistemy [Ecological-geological system, its types and position in the structure of the ecosystem] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya. 2009. № 2. S. 48–52 (in Rus.).
2. Trofimov V.T. Ekologicheskaya geologiya: uchebnik [Ecological Geology: Textbook]. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2024. 415 s. (in Rus.).
3. 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.).
4. Galkin A.N., Korolev V.A. Klassifikatsiya ekologo-geologicheskikh sistem Belarusi na osnove ucheta osobennostei litotopov i inzhenerno-khozyaistvennykh ob"ektov [Classification of ecological-geological systems of Belarus based on the consideration of lithotope features and engineering-economic facilities] // Litasfera. 2023. № 1 (58). S. 98–109 (in Rus.).
5. Ivut' R.B., Kosovskii A.A., Stefanovich N.V. Edinaya transportnaya sistema i geografiya transporta: ucheb. posobie [Unified Transport System and Transport Geography: Textbook]. Minsk: BNTU, 2009. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/236. Data poslednego obrashcheniya: 16.05.2025 (in Rus.).
6. Rakhman'ko V.G. Etapy stanovleniya i razvitiya Belorusskoi zheleznoi dorogi [Stages of formation and development of the Belarusian Railway] // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta. Nauka i transport. 2001. № 2 (3). S. 4–13 (in Rus.).
7. Leonovich I.I., Pupeiko O.V. Set' dorog Respubliki Belarus' kak sostavlyayushchaya transportno-logisticheskoi 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.).
8. Sukhonos N.I. Transportnyi kompleks Respubliki Belarus' i tranzitnyi potentsial: sostoyanie, razvitie i perspektivy [Transport complex of the Republic of Belarus and transit potential: state, development and prospects] // Vesnik Brestskaga ўniversiteta. 2012. № 1. S. 96–102 (in Rus.).
9. Korolev V.A., Galkin A.N. K razrabotke sistematiki ekologo-geologicheskikh sistem Belorussii [On the development of a systematics of ecological-geological systems of Belarus] // Inzhenernaya geologiya. 2023. T. 18. № 2. S. 12–28. DOI: https://doi.org/10.25296/1993-5056-2023-18-2-12-28 (in Rus.).
10. Grudnitskii S. Optimizatsiya zatrat i vnedrenie sovremennykh tekhnologii: BZHD utverdila strategiyu povysheniya energoeffektivnosti [Cost optimization and implementation of modern technologies: Belarusian Railway approved a strategy to improve energy efficiency] // SB.BY – Belarus' segodnya [elektronnyi resurs]. URL: https://www.sb.by/articles/optimizatsiya-zatrat-i-vnedrenie-sovremennykh-tekhnologiy-bzhd-utverdila-strategiyu-povysheniya-ener.html?ysclid=mkcemfl3nt380762483. Data poslednego obrashcheniya: 22.01.2026 (in Rus.).
11. Larin A.N., Larina I.V. Vozdeistvie zheleznodorozhnogo transporta i obespechivayushchei ego funktsionirovanie infrastruktury na okruzhayushchuyu prirodnuyu sredu [Impact of railway transport and its supporting infrastructure on the natural environment] // Innovatsionnaya ekonomika i obshchestvo. 2019. № 3 (25). S. 47–53 (in Rus.).
12. Ozerova E.S. Ekologiya VSNT dlya gumanitarnykh spetsial'nostei: uchebnoe posobie [Ecology of Railway Transport for Humanities Specialties: Textbook]. M.: MIIT, 2009. 103 s. (in Rus.).
13. Pavlova E.I. Ekologiya transporta: uchebnik [Transport Ecology: Textbook]. M.: Transport, 2000. 248 s. (in Rus.).
14. Kazantsev I.V. Vliyanie zheleznodorozhnogo transporta na zagryaznenie i sostoyanie pochv [Influence of railway transport on topsoil pollution and condition] // Simvol nauki. 2016. № 4 (11). S. 26–28 (in Rus.).
15. Pil'gun T.V., Osipova Yu.A. Transportnye sistemy: uchebno-metodicheskoe posobie (v 2 ch.) [Transport Systems: Educational and Methodological Manual (in 2 parts)]. Minsk: BNTU, 2023. Ch. 1. Infrastruktura gruzovykh perevozok. 87 s. (in Rus.).
16. Shalyagina O.N. Organizatsiya perevozok gruzov, passazhirov i bagazha: uchebnoe posobie [Organization of Freight, Passenger and Baggage Transportation: Textbook]. Minsk: RIPO, 2015. 272 s. (in Rus.).
17. Andreichikov M.V., Gorbacheva O.V. Kharakteristika istochnikov zagryazneniya atmosfernogo vozdukha i komponentnogo sostava vybrosov v atmosfernyi vozdukh v organizatsiyakh Belorusskoi zheleznoi dorogi [Characteristics of atmospheric air pollution sources and composition of emissions in organizations of the Belarusian Railway] // Materialy KHI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Problemy bezopasnosti na transporte». Gomel': Belorus. gos. un-t transp., 2021. Chast' 1. S. 211–213 (in Rus.).
18. Yakubuk Yu.P., Lugovskaya I.S. Transport i logistika [Transport and logistics] // Belorusskaya entsiklopediya [elektronnyi resurs]. URL: https://belarusenc.by/belarus/detail-article.php?ID=9223#railway. Data poslednego obrashcheniya: 22.01.2026 (in Rus.).
19. Belorusskaya zheleznaya doroga [Belarusian Railway] // Vikipediya. Svobodnaya entsiklopediya [elektronnyi resurs]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Belorusskaya_zheleznaya_doroga?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera. Data poslednego obrashcheniya: 22.01.2026 (in Rus.).
20. Ofitsial'nyi sait Belorusskoi zheleznoi dorogi (elektronnyi resurs) [Official website of the Belarusian Railway (electronic resource)]. URL: https://www.rw.by/. Data poslednego obrashcheniya: 22.01.2026 (in Rus.).

21. Galkin A.N., Akulevich A.F., Pavlovskii A.I., Galeznik O.I. Tekhnogennye grunty: ucheb. posobie [Technogenic Soils: Textbook]. Minsk: Vysheishaya shkola, 2020. 192 s. (in Rus.).
22. TKP 45-3.03-163-2009 (02250). Zheleznye dorogi. Zemlyanoe polotno. Pravila proektirovaniya [Railways. Railway Subgrade. Design Rules]. Minsk: Minstroiarkhitektury, 2010. 99 s. (in Rus.).
23. Zheleznodorozhnyi put' [Railway Track] / pod red. E.S. Ashpiza. M.: FGBOU «Uchebno-metod. tsentr po obrazovaniyu na zheleznodor. transporte», 2013. 544 s. (in Rus.).
24. Ipatov P.P., Strokova L.A. Obshchaya inzhenernaya geologiya: uchebnik [General Engineering Geology: Textbook]. Tomsk: Tomskii politekh. un-t, 2012. 365 s. (in Rus.).
25. Semenyuk S.D. Zhelezobetonnye prostranstvennye fundamenty zhilykh i grazhdanskikh zdanii na neravnomerno deformiruemom osnovanii [Reinforced Concrete Spatial Foundations of Residential and Civil Buildings on Unevenly Deformable Bases]. Mogilev: Belorus.-Ros. un-t, 2003. 269 s. (in Rus.).
26. Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.V., Prokof'eva T.V. Antropogennye pochvy: genezis, geografiya, rekul'tivatsiya: uchebnoe posobie [Anthropogenic Topsoils: Genesis, Geography, Reclamation: Textbook] / pod red. G.V. Dobrovol'skogo. Smolensk: Oikumena, 2003. 268 s. (in Rus.).
27. Alikina Zh.A., Chemkareva O.V., Kholodilina T.N. Mikrobiologicheskoe issledovanie pochv v zone vliyaniya zheleznodorozhnogo transporta [Microbiological study of topsoils in the zone of railway transport influence] // Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Regional'nye problemy geologii, geografii, tekhnosfernoi i ekologicheskoi bezopasnosti». Orenburg: Orenburg. gos. un-t, 2021. S. 9–13 (in Rus.).
28. Kroshechkina I.Yu., Zubrev N.I. Zagryaznenie poverkhnostnykh gorizontov pochvy pri ekspluatatsii zheleznodorozhnogo transporta [Pollution of surface topsoil horizons during railway transport operation] // Vestnik CHGPU im. I.Ya. Yakovleva. 2016. № 3 (91). S. 11–17 (in Rus.).
29. Zaborskaya O.Yu., Zaborskaya A.Yu., Kramm E.A. Pochvennaya mikroflora v kachestve agenta biodegradatsii neftyanykh zagryaznenii [Topsoil microflora as an agent of biodegradation of oil pollution] // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. 2017. № 12-4 (66). S. 15–17 (in Rus.).
30. Simonova E.V., Maksimova E.N. Mikrobiologicheskii monitoring antropogenno preobrazovannykh pochv [Microbiological monitoring of anthropogenically transformed topsoils] // Samarskii nauchnyi vestnik. 2016. № 1 (14). S. 62–66 (in Rus.).
31. Blagodatskaya E.V., Semenov M.V., Yakushev A.V. Aktivnost' i biomassa pochvennykh mikroorganizmov v izmenyayushchikhsya usloviyakh okruzhayushchei sredy [Activity and Biomass of Topsoil Microorganisms under Changing Environmental Conditions]. M: OOO «Tovarishchestvo nauchnykh izdanii KMK», 2016. S. 160–161 (in Rus.).
32. Daineko N.M., Sazanovich T.S. Kharakteristika flory uchastka zheleznodorozhnoi nasypi prigoroda Zhlobina [Characteristics of the flora of a railway embankment site in the suburbs of Zhlobin] // Epokha nauki. 2019. № 20. S. 594–599 (in Rus.).
33. Noskova N.A. Dinamika vidovogo sostava, obiliya i biologicheskogo raznoobraziya travyanistoi rastitel'nosti v zavisimosti ot orientatsii nasypei i vyemok zheleznoi dorogi [Dynamics of species composition, abundance and biodiversity of herbaceous vegetation depending on the orientation of railway embankments and cuttings] // Materialy VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov i magistrantov «Molodost'. Intellekt. Initsiativa». Vitebsk: Vitebsk. gos. un-t, 2019. S. 66–68 (in Rus.).
34. Rasteniya Evrazii [Plants of Eurasia] // ECOportal.info [elektronnyi resurs]. URL: https://ecoportal.info/rasteniya-evrazii/. Data poslednego obrashcheniya: 22.01.2026 (in Rus.).
35. Dorofeev S.A., Shavrova E.V., Kuz'menko V.Ya. Struktura ornitokompleksov pridorozhnykh lesonasazhdenii Belorusskogo Poozer'ya [Structure of ornithological complexes in roadside forest plantations of the Belarusian Poozerye] // Prostranstvenno-tipologicheskaya struktura naseleniya ptits estestvennykh i transformirovannykh ekosistem Belorusskogo Poozer'ya (pod red. V.Ya. Kuz'menko.) Vitebsk: VGU imeni P.M. Masherova, 2021. S. 27–33 (in Rus.).

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо» выходит в формате *PDF. 4 выпуска в 2026 году.

WWW.GEOINFO.RU

DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-30-36 УДК 624.131.38:625.725:625.122





ОРГАНИЗАЦИЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Поступила 13.04.2026
Принята к публикации 8.06.2026
Опубликована 27.07.2026

УСТЯН Н.А.
Старший научный сотрудник ООО «ГЕО-ПРОЕКТ», к.т.н., доцент, г. Санкт- Петербург, Россия
nagapet_ustyan@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В настоящее время в строительной отрасли активно внедряется цифровизация, в том числе создание цифровых двойников инженерных объектов. Мониторинг сооружений и грунтовых оснований позволяет обновлять их цифровые модели по реальным данным. Однако традиционные методы измерения деформаций с использованием геодезических марок не дают полной картины и сопряжены с рядом трудностей.

В представленной статье рассматриваются основы организации геотехнического мониторинга земляного полотна транспортных сооружений на слабых грунтовых основаниях с применением нового подхода к инклинометрическим измерениям осадок и горизонтальных смещений. Этот подход позволяет более эффективно анализировать картину деформаций основания и насыпи. Указаны его организационные и технические особенности, а также экономическая целесообразность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

насыпи транспортных сооружений; земляное полотно; слабое грунтовое основание; инклинометрия; измерение осадок; измерение горизонтальных смещений.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Устян Н.А. Организация геотехнического мониторинга деформаций земляного полотна транспортных сооружений инклинометрическим методом // Геоинфо. 2026. Т. 8. № 2. С. 30–36. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-30-36.

ORGANIZATION OF INCLINOMETER-BASED GEOTECHNICAL MONITORING OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE ROADBED DEFORMATIONS

Received: 13.04.2026
Accepted for publication 8.06.2026
Published 27.07.2026

USTYAN N.A.
PhD (Technics), associate professor, senior researcher, GEO-PROEKT LLC, Saint-Petersburg, Russia
nagapet_ustyan@mail.ru

ABSTRACT

Currently, digitalization is being actively implemented in the construction industry, including the creation of digital twins for engineering structures. Monitoring of structures and foundation soils allows for updating their digital models based on real-world data. However, traditional deformation measurement methods using geodetic marks fail to provide a complete pattern and are associated with a number of difficulties. This paper discusses the principles for organizing geotechnical monitoring of transport infrastructure roadbeds on soft soils using a new approach to inclinometer measurements of settlements and horizontal displacements. The approach allows for a more effective analysis of deformation patterns in soil foundations and embankments. The organizational and technical features of applying this method, as well as its economic feasibility are described.

KEYWORDS:

transport infrastructure embankments; roadbeds; soft soil foundations; inclinometry; settlement measurements; horizontal displacement measurements.

FOR CITATION:

Ustyan N.A. Organizatsiya geotekhnicheskogo monitoringa deformatsii zemlyanogo polotna transportnykh sooruzhenii inklinometricheskim metodom [Organization of inclinometer-based geotechnical monitoring of transport infrastructure roadbed deformations] // Geoinfo. 2026. T. 8. № 2. S. 30–36. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-30-36 (in Rus.).

Введение

Возведение земляного полотна транспортных сооружений на слабых грунтовых основаниях требует применения сложных инженерных решений и методов строительства, а контроль режима отсыпки насыпи выходит на первый план. Нарушения темпов отсыпки могут привести к выпорам оснований, обрушениям откосов, что повлечет за собой не только дополнительные работы, но иногда и полный пересмотр конструкции земляного полотна.

Для исключения подобных случаев и обеспечения безопасности строительства и последующей эксплуатации предусматривается геотехнический мониторинг участков дорог на слабых основаниях в период их возведения [1, 2]. При этом необходимо наблюдать не только за осадками насыпи, но и за горизонтальными смещениями (сдвигами) грунтов, слагающих откосы насыпей и выемок, а в некоторых случаях и прилегающих к дороге склонов. От своевременной и полной информация о состоянии слабого основания зависит ход строительства и риски возникновения нештатных ситуаций, связанные с потерей прочности грунтового основания и устойчивости откосов насыпей, выемок и прилегающих склонов.



Рис. 1. Неравномерные осадки дороги через месяц после ее ввода в эксплуатацию

В настоящее время для выявления деформаций земляного полотна, используют визуально-инструментальные, геодезические и геофизические методы. Измерения могут производиться с применением нивелиров, теодолитов, тахеометров, сканеров (в том числе оптических, электронных, лазерных) и навигационных спутниковых систем. Из перечисленных

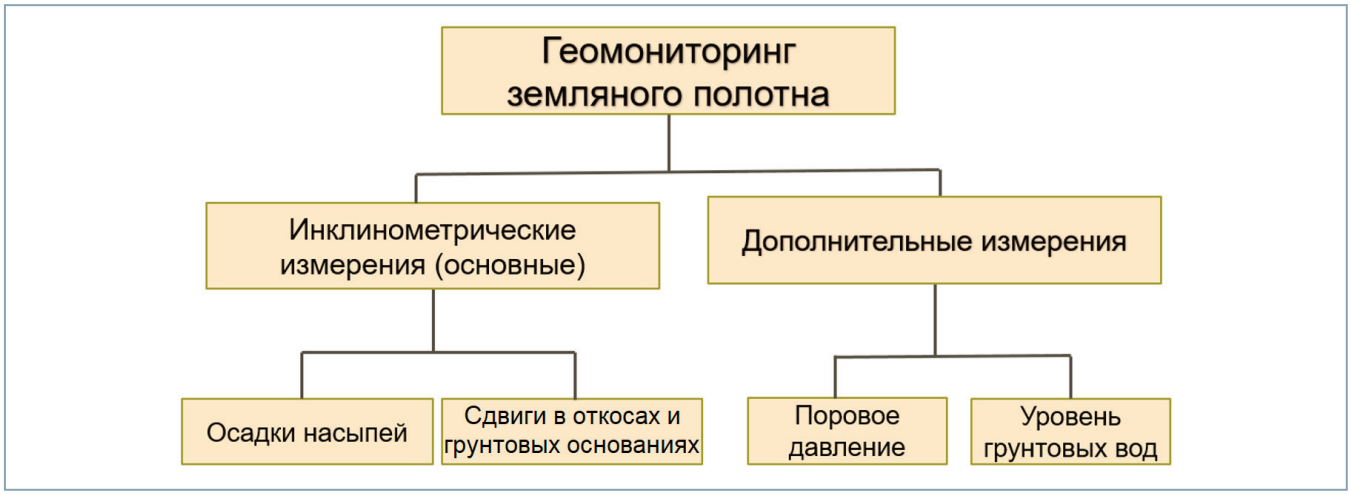


Рис. 2. Схема организации геотехнического мониторинга земляного полотна транспортного сооружения



Рис. 3. Портативный инклинометрический комплект УСМ-ИСП

подходов наиболее часто используются визуально-инструментальные и геодезические методы, так как остальные варианты гораздо дороже и сложнее.

Например, для мониторинга осадок земляного полотна в период его устройства чаще всего применяют геодезический метод с установкой осадочных марок (по три штуки на каждом поперечном профиле) на основание насыпи перед ее отсыпкой [3]. Но это требует больших затрат на металлоконструкции марок и постоянного присутствия бригады монтажников для их установки и наращивания высоты их мерных штанг в процессе возведения насыпи. При этом марки часто смещаются, повреждаются или уничтожаются в результате работы техники и их уже нельзя вернуть в первоначальное положение, поэтому такие точки измерений безвозвратно теряются. К концу строительства насыпи остается не более 20% от всех изначально установленных осадочных марок. К тому же данные, полученные с их использованием, часто бывают неполными и приблизительными, так как показывают осадки только в точках измерений, а остальную картину инженеры вынуждены восстанавливать на основе своих знаний и опыта. Поэтому состояние слабого основания земляного полотна зачастую оценивается неверно, а это напрямую влияет на безопасность строительства



Рис. 4. Инклинометрический измерительный канал на автодороге М7 «Волга» (до и после засыпки, 2023 г.)

и последующей эксплуатации транспортной инфраструктуры: в дальнейшем будут происходить вертикальные деформации уже готовой насыпи, возникать продольные или поперечные трещины в недавно уложенной дорожной одежде, теряться устойчивость откосов. Иногда эти негативные процессы полностью охватывают целый участок (рис. 1).

Поэтому совершенствование методов измерения деформаций (в частности осадок земляного полотна), дающих более полную и достоверную информацию о состоянии слабых грунтовых оснований транспортной инфраструктуры, является актуальной задачей, требующей решения. Одному из таких решений и посвящена настоящая статья.

Новый метод мониторинга осадок насыпей транспортных сооружений на слабых грунтовых основаниях

При строительстве развязки на пересечении кольцевой автодороги вокруг г. Санкт-Петербурга с Пискаревским проспектом в 2008 году автором статьи был разработан и предложен к внедрению инклинометрический метод (относящийся к параметрическим), предназначенный для измерения осадок слабых грунтовых оснований насыпей транспортных сооружений [4]. Позже он был запатентован [5].

Геотехнический мониторинг, организованный с применением этого метода, включает в себя измерения осадок и горизонтальных смещений грунтов основания и насыпи и, при необходимости, порового давления и уровня грунтовых вод (рис. 2). Основная цель его использования заключается в комплексной оценке напряженно-деформированного состояния земляного полотна на слабом грунтовом основании в любой момент времени на любом этапе строительства или эксплуатации дороги на основе данных указанных измерений.

Предложенный метод позволяет производить измерения осадок земляного полотна по всей ширине основания в любой его точке с применением переносного инклинометрического комплекта на основе технологий MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems – «микроэлектромеханические системы») (рис. 3). Включение дополнительных измерений в программу геотехнического мониторинга участка зависит от местных геологических и гидрологических условий, высоты насыпи и т.д. Кроме того, при необходимости какие-то из видов мониторинга (например, геодезическая съемка асфальтового покрытия после укладки первого слоя) могут быть исключены или добавлены в разные периоды строительства.

До начала отсыпки насыпи на выровненное основание земляного полотна (или в неглубокую траншею) в продольном направлении укладывают инклинометрический канал (ИИК) из специальных пластиковых труб, который будет служить траекторией для перемещения измерительного зонда. Затем ИИК засыпают грунтом для его фиксации и обеспечения возможности проезда техники (рис. 4).

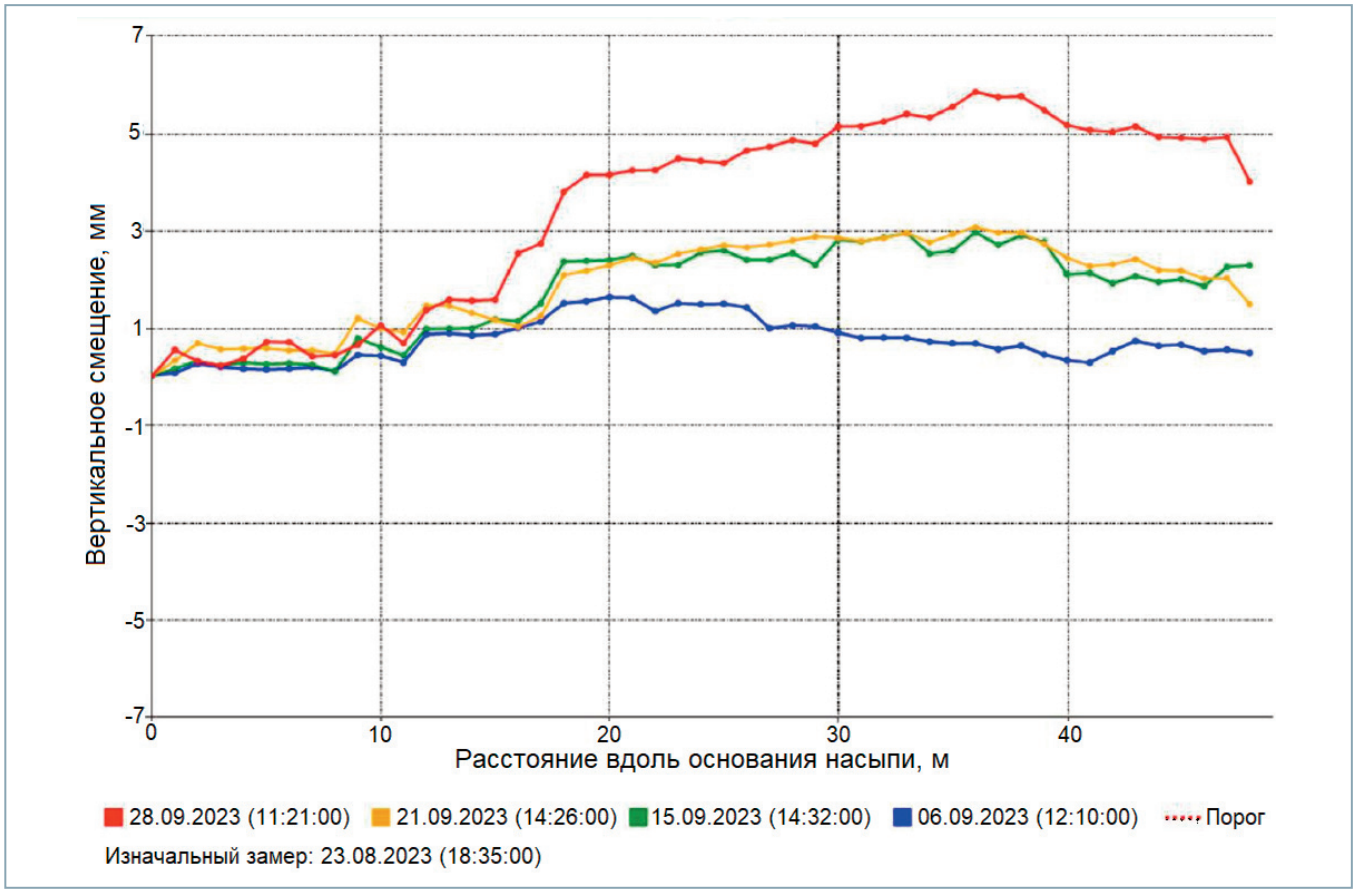


Рис. 5. Графики изменения осадок за первый месяц отсыпки насыпи

После укладки ИИК выполняют первичное измерение для получения графика, характеризующего начальное положение основания, с составлением соответствующего акта. С этим эталонным графиком в последующем сравнивают все дальнейшие результаты измерений и определяют динамику осадок в каждой выбранной точке канала (рис. 5).

Измерения проводят инженер-геотехник и техник с использованием портативного инклинометрического комплекта. Проходка одного канала (туда-обратно) длиной 70 м в среднем занимает 15–20 минут с точностью ±0,05% измерительного диапазона датчика на одном шаге измерений, что соответствует требованиям ГОСТ 24846 [6]. При протяженности канала 70–90 м накопленная систематическая погрешность по всей длине ИИК не превышает 3 мм. При этом первичный анализ полученных данных можно выполнять сразу после измерений, так как к этому времени на экране считывающего устройства отображается соответствующий график.

Кроме осадок земляного полотна необходимо контролировать горизонтальные смещения (сдвиги) грунтов слабого основания. Для этих целей на объекте оборудуются вертикальные инклинометрические скважины, для измерений в которых применяется описанный выше переносной инклинометрический комплект, что позволяет проводить основные работы по мониторингу одним и тем же инструментом (рис. 6).

Данные, полученные при измерениях в вертикальных скважинах, позволяют оценить горизонтальные смещения грунтов основания на разной глубине. В некоторых случаях такие оценки имеют первоочередное значение в определении устойчивости откосов или склонов.

После обработки полученных данных определяют, достигнута на данном этапе расчетная осадка или нет, а также вычисляют скорость прироста осадок за истекший период и динамику консолидации грунтов в целом. На этой основе могут быть даны рекомендации о возможности отсыпки последующих слоев, их толщине, устройстве пригруза для ускорения вертикальных смещений, создании дорожной одежды на наблюдаемом участке, оценке устойчивости откосов насыпи, выемок или прилегающих склонов, необходимости их укрепления или уположения.

Анализ данных, полученных при одном выезде на объект, позволяет полностью оценить напряженно-деформированное состояние объекта на этот момент, при необходимости выдать рекомендации по корректировке организации работ, а в экстренных случаях принять решение об их приостановке до выяснения всех обстоятельств или разработки другой технологии сооружения земляного полотна.

При изменении режима отсыпки насыпи или возобновлении работ после длительного перерыва требуется выполнить дополнительные изыскания в связи с изменением состояния

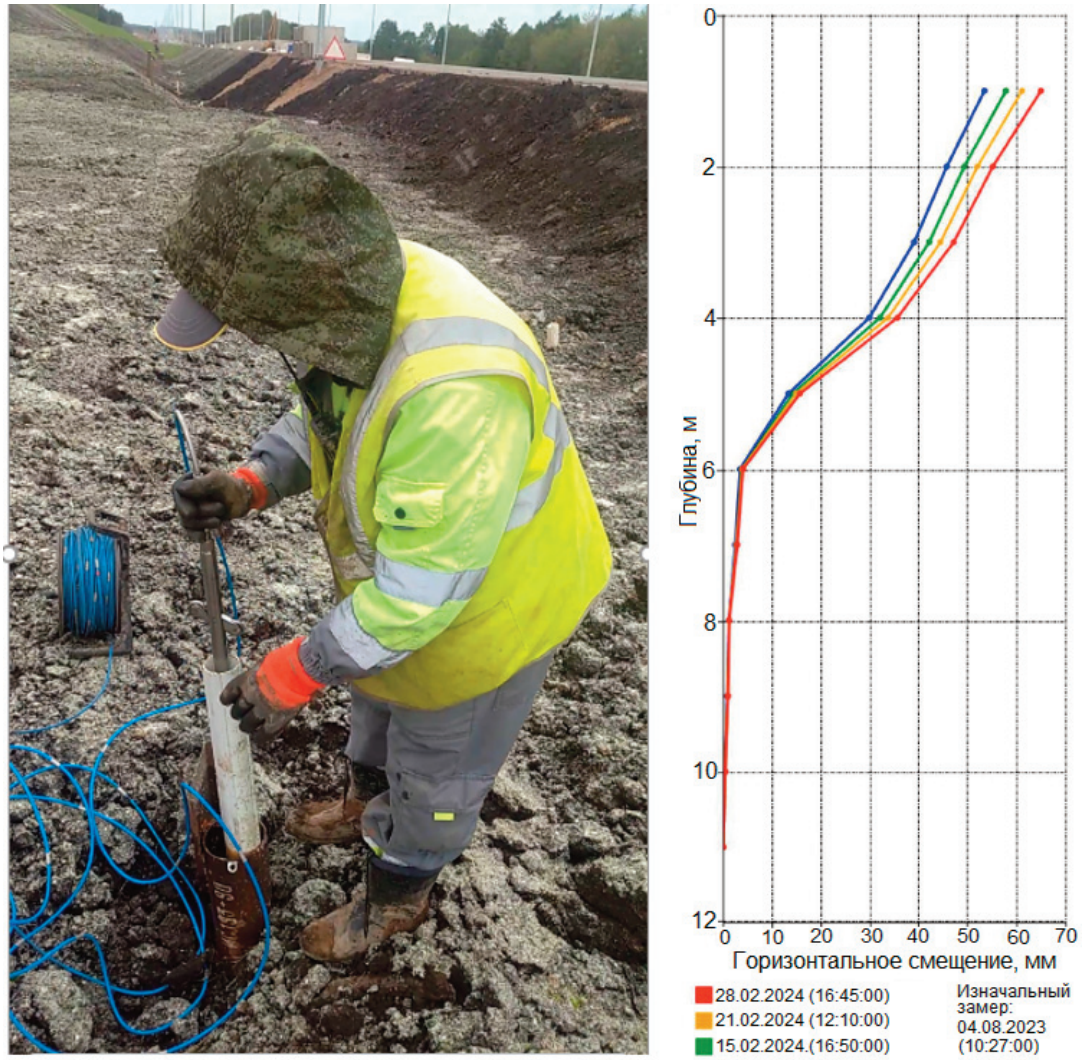


Рис. 6. Измерение горизонтальных смещений грунтов в основании насыпи с использованием вертикальной инклинометрической скважины и пример полученных графиков

грунтов. В таких случаях для определения степени и скорости консолидации грунтов основания необходимо произвести дополнительные геотехнические расчеты. Для расчетов по последним трем участкам автодороги М-7 «Волга», где производили досыпку насыпи до высоты 5 м после годового перерыва, была применена отечественная геотехническая программа SiO 2D. Эта хорошо зарекомендовавшая себя программа позволяет за один цикл расчетов определять осадки (в том числе для каждого слоя насыпного грунта), продолжительность консолидации, поровое давление, время его рассеивания, устойчивость откосов, величину пригруза для сокращения периода консолидации слабого основания [7].

Важно отметить, что, например, затраты на организацию и проведение геотехнического мониторинга инклинометрическим методом на подходе строящейся дороги к мосту через реку Волхов оказались в 5,1 раза меньше по сравнению с таковыми на геодезические измерения [8]. Кроме того, наблюдения с помощью данного метода не снижают темпы земляных работ, используемое при этом оборудование не повреждается строительной техникой, а точность и полнота получаемых результатов измерений по всей ширине насыпи значительно повышаются. Такие измерения могут выполняться по мере необходимости в любое время – как при строительстве дороги, так и при ее последующей эксплуатации.

Заключение

Инклинометрия, имея в своей основе передовые разработки в сфере микроэлектроники, существенно расширяет возможности получения информации о действительном состоянии и динамике развития деформаций грунтовых оснований и откосов насыпей на любом этапе их жизненного цикла и на всем участке строящейся дороги, на котором проводится геотехнический мониторинг. Это позволяет повысить уровень безопасности и качества строительства объектов транспортной инфраструктуры.

Список литературы

1. СП 22.13330.2016 (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83). Основания зданий и сооружений. М.: Минстрой России, 2016. 232 с.
2. СП 305.1325800.2017. Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве. М.: Минстрой России, 2017. 64 с.
3. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. М.: Минтранс РФ, 2003. 218 с.
4. Отчет о проведении геотехнического мониторинга съезда № 2 на объекте «Автомобильная дорога “Пискаревский проспект от ул. Руставели до КАД”». СПБ.: ООО НТЦ «Геотехнологии СПБ», 2008. 38 с.
5. Устян Н.А. Патент на изобретение RU 2714536 C1. Система инклинометрических измерений осадок насыпей и способ измерений для такой системы // Бюллетень № 5 ФИПС. 18.02.2020. 5 с.
6. ГОСТ 24846-2019. Методы измерений деформаций оснований зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2020. 24 с.
7. Рабочая документация по объекту «Реконструкция автомобильной дороги М-7 “Волга” Москва – Владимир – Нижний Новгород – Казань – Уфа на участке км 1169+910 – км 1231+352 (обход населенных пунктов Исаметово, Верхнеяркеево, Лаяшты, Ишкарово, Асяново, Республика Башкортостан)». СПб.: ООО «Гео-Проект», 2022.
8. Рабочая документация по объекту «Реконструкция мостового перехода через реку Волхов на км 122+085 автомобильной дороги М-18 “Кола” – от Санкт-Петербурга через Петрозаводск, Мурманск, Печенгу до границы с Норвегией (международный автомобильный пункт пропуска “Борисоглебск”) в Ленинградской области». СПб.: ООО «Гео-Проект», 2012.

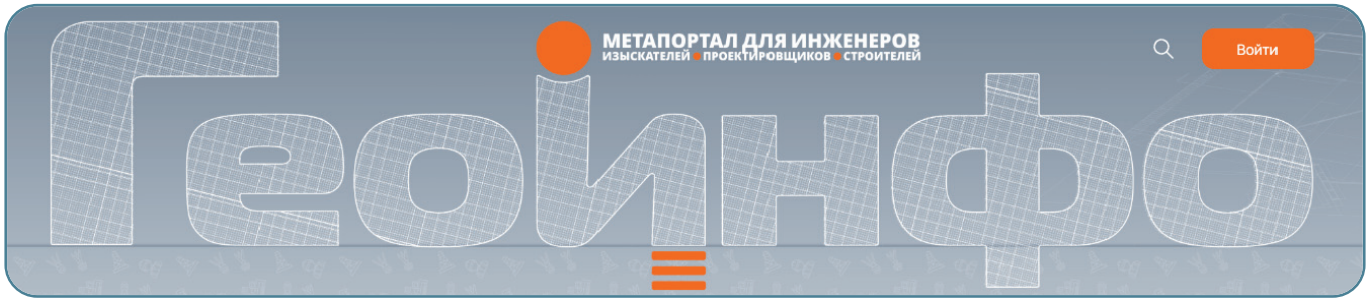
References

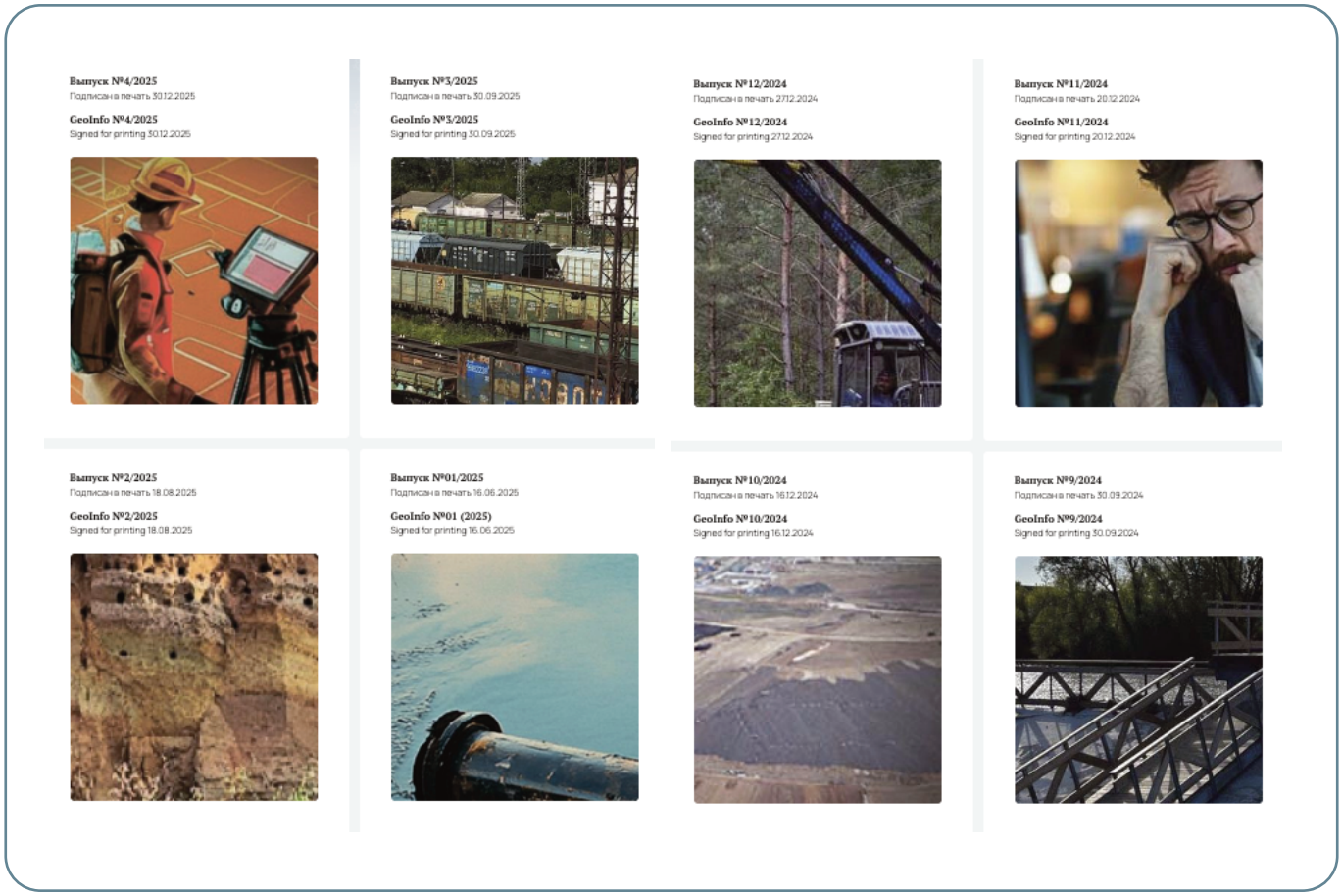
1. SP 22.13330.2016 (aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01-83). Osnovaniya zdanii i sooruzhenii [Soil Foundations of Buildings and Structures]. M.: Minstroi Rossii, 2016. 232 s.
2. SP 305.1325800.2017. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila provedeniya geotekhnicheskogo monitoringa pri stroitel'stve [Buildings and Structures. Rules for Geotechnical Monitoring During Construction]. M.: Minstroi Rossii, 2017. 64 s.
3. Posobie po proektirovaniyu zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog na slabykh gruntakh [Guidelines for the Design of Road Embankments on Soft Soils]. M.: Mintrans RF, 2003. 218 s.
4. Otchet o provedenii geotekhnicheskogo monitoringa s"ezda № 2 na ob"ekte “Avtomobil'naya doroga ‘Piskarevskii prospekt ot ul. Rustaveli do KAD’” [Report on Geotechnical Monitoring of Exit Ramp № 2 at the Object “Piskaryovsky Prospekt Highway from Rustaveli Street to the Ring Road (KAD)”]. SPb.: OOO NTTS “Geotekhnologii SPB”, 2008. 38 s.
5. Ustyan N.A. Patent na izobretenie RU2714536C1. Sistema inklinometricheskikh izmerenii osadok nasypei i sposob izmerenii dlya takoi sistemy [Patent for Invention RU2714536C1. A System for Inclinometric Measurement of Embankment Settlements and a Measurement Method for Such a System] // Byulleten' № 5 FIPS. 18.02.2020. 5 s.
6. GOST 24846-2019. Metody izmerenii deformatsii osnovanii zdanii i sooruzhenii [Methods for Measuring Deformations of Soil Foundations of Buildings and Structures]. M.: Standartinform, 2020. 24 s.
7. Rabochaya dokumentatsiya po ob"ektu “Rekonstruktsiya avtomobil'noi dorogi M-7 ‘Volga’ Moskva – Vladimir – Nizhnii Novgorod – Kazan' – Ufa na uchastke km 1169+910 – km 1231+352 (obkhod naselennykh punktov Isametovo, Verkhneyarkeevo, Layashty, Ishkarovo, Asyanovo, Respublika Bashkortostan)” [Working Documentation for the Object “Reconstruction of the M-7 Volga Highway (Moscow – Vladimir – Nizhny Novgorod – Kazan – Ufa), Section km 1169+910 – km 1231+352 (Bypasses of the Settlements of Isametovo, Verkhneyarkeyevo, Layashty, Ishkarovo, and Asyanovo, Republic of Bashkortostan)”]. SPb.: OOO “Geo-Proekt”, 2024.
8. Rabochaya dokumentatsiya po ob"ektu “Rekonstruktsiya mostovogo perekhoda cherez reku Volkhov na km 122+085 avtomobil'noi dorogi M-18 ‘Kola’ – ot Sankt-Peterburga cherez Petrozavodsk, Murmansk, Pechengu do granitsy s Norvegiei (mezhdunarodnyi avtomobil'nyi punkt propuska ‘Borisoglebsk’) v Leningradskoi oblasti” [Working Documentation for the Object “Reconstruction of the Bridge Crossing over the Volkhov River at km 122+085 of the M-18 Kola Highway (from St. Petersburg via Petrozavodsk, Murmansk, and Pechenga to the Norwegian Border, Including the Borisoglebsk International Border Crossing Point), Leningrad Region”]. SPb.: OOO “Geo-Proekt”, 2012.

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо
WWW.GEOINFO.RU

С 2022 года журнал
«ГеоИнфо» выходит
в формате *PDF.
4 выпуска в 2026 году.

PDF
Adobe





С 2022 года журнал «ГеоИнфо» выходит в формате *PDF.
4 выпуска в 2026 году.

Контакты

Адрес: 119146, Москва, ул. 3-я Фрунзенская, д.10, оф. 12

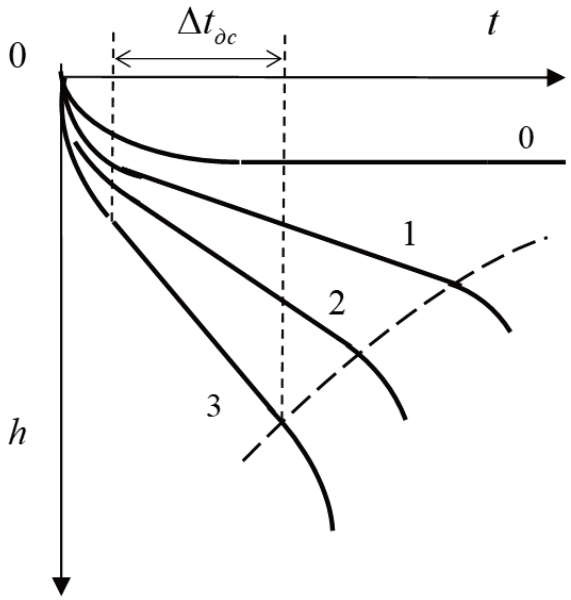
E-mail: info@geoinfo.ru

Тел.: +7 (499) 340-340-9, (916) 240-03-22

Главный редактор: Виктор Ананко



DOI:10.58339/2949-0677-2025-8-2-38-52 УДК: 536.7, 532.5, 624.131, 544.3



ОТ ПРИНЦИПА ЛЕ ШАТЕЛЬЕ – БРАУНА К ДИССИПАТИВНЫМ СТРУКТУРАМ

Поступила 27.04.2026
Принята к публикации 11.07.2026
Опубликована 27.07.2026

МЕРЗЛЯКОВ ВЛАДИМИР ПАВЛОВИЧ
Ведущий научный сотрудник лаборатории Геокриологии им. Г.З. Перльштейна, к.т.н.
Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия
E–mail: cryo17@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Совместное рассмотрение принципа Ле-Шателье – Брауна, теории линейных необратимых процессов и теории диссипативных структур охватывает весь диапазон возможных состояний термодинамических систем. Принцип Ле-Шателье – Брауна выполняется при малом отклонении от равновесия (обобщенные силы равны нулю). В линейно-необратимых процессах обобщенные силы остаются достаточно слабыми. В противоположность этому диссипативные структуры возникают и поддерживаются благодаря обмену энергией и веществом с внешней средой в условиях, далёких от равновесия. В настоящей работе излагаются некоторые положения современной термодинамики с целью дальнейшего анализа известных явлений и предотвращения неправильного толкования и применения теории. Основные положения этой теории были разработаны применительно к химии. Однако они имеют более широкое значение и могут применяться в других разделах науки, в частности, в гидроаэродинамике и теплофизике. Ниже приводится доказательство принципа Ле Шателье – Брауна в редакции автора. Даются краткие сведения о ламинарных (линейно неравновесных) и турбулентных (нелинейно неравновесных) потоках. Анализируется «хрестоматийный» пример диссипативных структур: ячейки Рэлея – Бенара. Обсуждается возможность использования термина «диссипативная структура» по отношению к грунтовым основаниям фундаментов (механика грунтов). Особое место занимает эксперимент Боттомли по прохождению проволочки с грузом через лёд. Выводы из этого эксперимента имеют большое значение для механики мёрзлых грунтов. В статье показано, как распределяется энергия (тепловая и механическая) в каждом из рассмотренных примеров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

принцип Ле-Шателье – Брауна; теория линейных необратимых процессов; теория диссипативных структур; эксперимент Боттомли; грунтовые основания

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мерзляков В.П. От принципа Ле Шателье – Брауна к диссипативным структурам // Геоинфо. 2026. Т. 8. № 2. С. 38–52. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-38-52.

FROM THE LE CHATELIER–BRAUN PRINCIPLE TO DISSIPATIVE STRUCTURES

Received: 27.04.2026
Accepted for publication 11.07.2026
Published 27.07.2026

VLADIMIR P. MERZLYAKOV
Leading Researcher, G.Z. Perlshtein Laboratory of Geocryology, Candidate of Technical Sciences
Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences (IEG RAS), 13 Bld. 2 Ulansky Lane, Moscow 101000, Russia
E-mail: cryo2@yandex.ru

ABSTRACT

The combined consideration of the Le Chatelier–Braun principle, the theory of linear irreversible processes, and the theory of dissipative structures covers the entire range of possible states of thermodynamic systems. The Le Chatelier–Braun principle holds for small departures from equilibrium, when generalized forces are equal to zero. In linear irreversible processes, generalized forces remain sufficiently weak. In contrast, dissipative structures arise and are maintained through the exchange of energy and matter with the external environment under conditions far from equilibrium. This paper presents several concepts of modern thermodynamics with the aim of further analyzing well-known phenomena and preventing misinterpretation and misuse of the theory. The fundamental provisions of this theory were originally developed in relation to chemistry. However, they are of broader significance and can be applied in other branches of science, in particular in hydroaerodynamics and thermal physics. A proof of the Le Chatelier–Braun principle in the author's formulation is presented below. Brief information is also given on laminar (linearly nonequilibrium) and turbulent (nonlinearly nonequilibrium) flows. The "classic textbook" example of dissipative structures, namely Rayleigh–BOnard cells, is analyzed. The possibility of using the term "dissipative structure" with respect to foundation soils in soil mechanics is discussed. A special place is given to Bottomley's experiment on the passage of a weighted wire through ice. The conclusions drawn from this experiment are of great importance for frozen ground mechanics. The paper shows how energy, both thermal and mechanical, is distributed in each of the examples considered.

KEYWORDS:

Le Chatelier–Braun principle; theory of linear irreversible processes; theory of dissipative structures; Bottomley experiment; foundation soils

FOR CITATION:

Merzlyakov V.P. Ot printsipa Le Shatelye – Brauna k dissipativnym strukturam [From the Le Chatelier–Brown principle to dissipative structures] // Geoinfo. 2026. T. 8. № 2. S. 38–52. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-38-52 (in Rus.).

Введение

Все макроскопические объекты природы и техники, обменивающиеся между собой и с окружающей средой энергией (тепловой или механической) и веществом, являются термодинамическими телами или системами. Чтобы перейти на язык термодинамики, уточним формулировки основных её понятий и определений [1, 10, 15, 18].

Термодинамическим телом называется непрерывное, однородное макроскопическое тело, заполняющее пространство в границах выделенного объёма. *Термодинамической системой* называется макроскопическая система, которая тем или иным образом выделена из *окружающей среды* и способна взаимодействовать с ней. Это может быть совокупность термодинамических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами.

Термодинамическая система называется *открытой*, если возможен обмен с окружающей средой и веществом, и энергией (тепловой энергией и механической работой). Система называется *изолированной* (*замкнутой*), если невозможен обмен с окружающей средой ни веществом, ни энергией.

Система называется *закрытой*, если *невозможен обмен* с окружающей средой веществом, но возможен обмен энергией (тепловой или механической). Система называется *адиабатной* (теплоизолированной), если невозможен обмен с окружающей средой тепловой энергией.

Термодинамическое равновесие – состояние *изолированной* системы или тела, при котором остаются неизменными во времени макроскопические величины этой системы (температура, давление, объём и т.д.). Если процесс состоит в прохождении системы через последовательность *равновесных* состояний, то такой процесс называется *равновесным*. Всякий равновесный процесс является *обратимым*.

Первое начало термодинамики (закон сохранения энергии)

Внутренняя энергия системы U является функцией состояния. Её изменение в некотором элементарном процессе определяется равенством

$$dU=\delta Q-\delta A, \qquad (*)$$

где δQ – *количество теплоты*, которое система получила от окружающей среды; δA – работа, совершаемая системой над внешней средой (работа против внешних сил); здесь dU – бесконечно малая разность значений функции состояния U (интеграл по замкнутому циклу $\oint dU = 0$), δQ и δA – бесконечно малые количества. Для *открытых* систем существует дополнительный вклад в уравнение (∗) из-за потока вещества от внешней среды $dU_{вещ} = \mu\delta N$, где μ – химический потенциал, δN – количество вещества. Поэтому полное уравнение первого начала термодинамики принимает вид:

$$dU=\delta Q-\delta A+\mu\delta N. \qquad (**)$$

Следует заметить, что если нет внешних и внутренних источников тепла, то изменение внутренней энергии определяется работой внешних сил $\delta A'=-\delta A$ и потоком вещества

$$dU=\delta A'+\mu\delta N. \qquad (***)$$

Второе начало термодинамики

Исследуя цикл Карно (*обратимый* круговой процесс), Р. Клаузиус заметил, что интеграл $\oint\frac{\delta Q}{T}$ становится равным нулю всякий раз, когда состояние термодинамического тела описывает замкнутый цикл (например, в плоскости *p* – давление, *T* – абсолютная температура) и возвращается к исходному состоянию. Это позволило предположить, что величина, стоящая под знаком интеграла, – полный дифференциал некоторой функции состояния *S*, значение которой не зависит от того, каким путём это состояние достигнуто. Функцию *S* Клаузиус предложил назвать энтропией, что в переводе на русский язык означает «обращённая внутрь» (функция).

Изменение энтропии *в обратимом* процессе $S-S_0=\int_{T_0}^{T}\frac{\delta Q}{T}$ зависит только от начального и конечного значений температуры.

В любом *необратимом* процессе в любой системе $S-S_0>\int_{T_0}^{T}\frac{\delta Q}{T}$ из-за диссипации энергии, и поэтому $\oint\frac{\delta Q}{T}<0$.

Другим основным положением *второго начала* является то, что в *изолированной* системе энтропия никогда не убывает. Она либо растёт в необратимых процессах (dS>0) до тех пор, пока не достигнет своего *максимального значения* в состоянии *термодинамического равновесия*, либо остаётся постоянной (dS=0).

На основании данных выше определений максимум энтропии означает, что *изолированная* термодинамическая система, для которой внешние условия остаются неизменными, с течением времени переходит в равновесное состояние, в котором прекращаются все макроскопические процессы, и нет тенденции к изменениям в макроскопическом масштабе[1].

При этом в системе на микроскопическом уровне могут происходить разнообразные процессы. Однако в среднем эти процессы компенсируют друг друга, и макроскопические параметры системы остаются неизменными, колеблясь относительно равновесного значения.

Краткая теория принципа Ле Шателье - Брауна

Рассмотрим *изолированную систему*, состоящую из среды и погруженного в неё тела (систему тело + среда). Пусть $S_{П}$ есть полная энтропия системы, включающая энтропию тела S, V – объём тела. Можно показать [10], что для малого отклонения от состояния равновесия существует зависимость

$$dS_{П}=-\frac{T-T_0}{T_0}dS+\frac{P-P_0}{T_0}dV, \qquad (1.1)$$

где индекс «0» – относится к состоянию полного равновесия.

Для удобства вводят вспомогательные обозначения

$$X=-\frac{\partial S_{П}}{\partial S},\ Y=-\frac{\partial S_{П}}{\partial V}. \qquad (1.2)$$

При полном термодинамическом равновесии системы энтропия $S_{П}$ должна быть максимальна. Необходимые условия для этого:

$$X=0,\ Y=0 \qquad (1.3)$$

Рассмотрим два случая.

1. Предположим, что по каким-то причинам изменилось значение S[2] на величину $\Delta S = S_1 - S_0$, при этом нарушается первое условие (1.3). Допустим, что величина *V* при данном воздействии не изменяется. Тогда изменение величины X от нуля до значения $X\equiv(\Delta X)_V\neq 0$ в момент воздействия будет равно:

$$(\Delta X)_V=\left(\frac{\partial X}{\partial S}\right)_V\Delta S. \qquad (1.4)$$

Сначала изменение переменной S при постоянном значении *V* приводит также к нарушению второго условия (1.3). Но после того, как равновесие снова восстановится, восстановится условие Y=0. А производная $\left(\frac{\partial X}{\partial S}\right)_V$ преобразуется в производную $\left(\frac{\partial X}{\partial S}\right)_{Y=0}$ и величина $X\equiv\Delta X$ будет иметь значение

$$(\Delta X)_{Y=0}=\left(\frac{\partial X}{\partial S}\right)_{Y=0}\Delta S, \qquad (1.5)$$

[1] Постоянство термодинамических параметров следует из условия изолированности системы. В самом деле, если предположить, что изменится какой-либо параметр, например, уменьшится объём, то это будет означать, что над телом совершена работа, а это запрещено.

[2] Изменение величины S означает, что телу сообщается (или от тела отнимается) некоторое количество тепла. В результате нарушается равновесие тела.

где производная берётся при постоянном, равном нулю, значении Y.

Учитывая (1.1), из равенства $Y = -\frac{p - p_0}{T_0} = 0$ получаем $P = P_0$ и поэтому равенство (1.5) равносильно равенству

$$(\Delta X)_{p_0} = \left(\frac{\partial X}{\partial S}\right)_{p_0} \Delta S. \qquad (1.6)$$

Доказывается [1,10], что

$$\left(\frac{\partial X}{\partial S}\right)_V > \left(\frac{\partial X}{\partial S}\right)_p > 0, \qquad (1.7)$$

при любом значении p, следовательно, и при значении P_0. Поэтому, сравнивая выражения (1.4) и (1.6), получим

$$\left|(\Delta X)_{V_0}\right| > \left|(\Delta X)_{p_0}\right| \qquad (1.8)$$

Неравенство (1.8) с учётом (1.1)[3] можно переписать в виде

$$\left|(\Delta T)_{V_0}\right| > \left|(\Delta T)_{p_0}\right| \qquad (1.9)$$

Таким образом, возникает *изобарический* процесс, приводящий к меньшему изменению температуры, чем *изохорический*.

2. Предположим теперь, что нарушается равновесие тела со средой путём изменения переменной V, при этом нарушается второе условие (1.3). Допустим, что величина S при данном воздействии не изменяется. Тогда изменение величины Y от нуля до значения $Y \equiv (\Delta Y)_S \neq 0$ в момент воздействия будет равно:

$$(\Delta Y)_S = \left(\frac{\partial Y}{\partial V}\right)_S \Delta V. \qquad (1.10)$$

Далее, *меняя местами* в предыдущих рассуждениях X и Ya также S и V, учитывая, что по аналогии с (1.7) будем иметь

$$\left(\frac{\partial Y}{\partial V}\right)_S > \left(\frac{\partial Y}{\partial V}\right)_T > 0, \qquad (1.11)$$

ещё раз, используя равенство (1.1)[4] и условие $\frac{\partial p}{\partial V} < 0$, получим

$$\left|(\Delta p)_{S_0}\right| > \left|(\Delta p)_{T_0}\right|. \qquad (1.12)$$

Т.е. *возникает изотермический* процесс, приводящий к меньшему изменению давления, чем *адиабатный* (изоэнтропийный).

Графическую картину проведенных рассуждений показывают процессы, изображенные на p–T диаграмме (рис.1). В

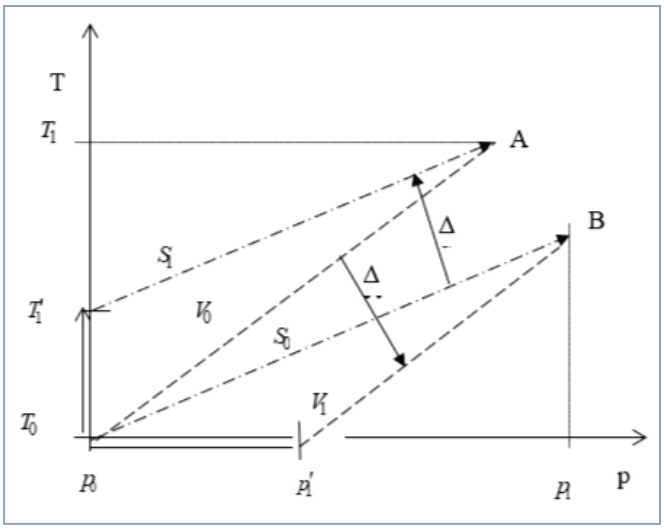


Рис. 1. Окрестность равновесного состояния некоторого термодинамического тела на p–T диаграмме (следует иметь в виду, что на представленном чертеже S1>S0, но V1<V0, т.е. ΔS>0,ΔV<0)

самом деле, как видим $|T_1 - T_0|_{V_0} > |T_1' - T_0|_{p_0}$, при изменении $\Delta S = S_1 - S_0$, и $|p_1 - p_0|_{S_0} > |p_1' - p_0|_{T_0}$, при изменении $\Delta V = V_1 - V_0$.

Итак, проблема реакции *равновесной системы* на малое внешнее воздействие решается известным принципом Ле Шателье – Брауна. Формулировка принципа: *«При внешнем воздействии, выводящем тело из состояния равновесия, возникают процессы, ослабляющие результат этого воздействия»*. В рассмотренном доказательстве такими «возникшими» процессами были *изобарический* и *изотермический* процессы.

Следствием принципа Ле Шателье – Брауна является смещение равновесия в ту или иную сторону при изменении термодинамических параметров: *температуры* системы (при её нагревании или охлаждении); *давления* в системе (при её сжатии или расширении).

Многочисленные примеры проявления принципа Ле Шателье – Брауна можно найти в монографиях [1, 9, 10, 18].

Изменение энтропии в изолированной и открытой системах. стационарные процессы. Условия устойчивости

Вследствие того, что состоянию термодинамического равновесия в *изолированной* системе соответствует *максимальное значение* энтропии, любое изменение состояния приводит к её *уменьшению*. В частности, любая флуктуация или случайное возмущение может только *уменьшить* энтропию. В ответ на уменьшение энтропии в соответствии со вторым началом термодинамики необратимый *внутренний* процесс, производящий энтропию, возвращает систему вновь к равновесию, т.е. $dS = dS_i$,

[3] Из (1.1) получаем $\Delta X \equiv X = -\frac{\partial S_\Pi}{\partial S} = \frac{\Delta T}{T_0}$.

[4] Из (1.1) получаем $\Delta Y \equiv Y = -\frac{\partial S_\Pi}{\partial V} = -\frac{\Delta p}{T_0}$.

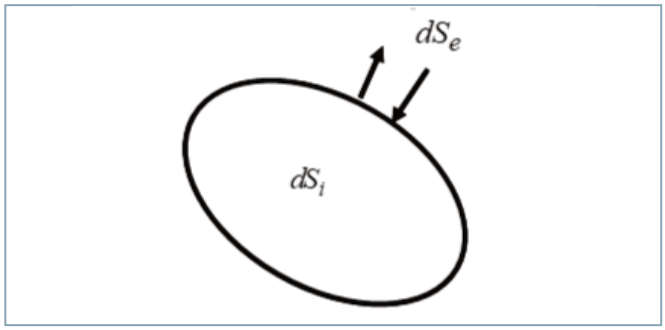


Рис. 2. Поток и производство энтропии в открытой системе

где dS_i – *производство энтропии*, связанное с изменениями *внутри системы,* причём из второго начала термодинамики следует, что производство энтропии неотрицательно

$$dS_i > 0 \qquad (2.1)$$

Изменение энтропии dS в открытой *системе* за интервал времени dt состоит из двух составляющих [15]

$$dS = dS_e + dS_i \qquad (2.2)$$

Здесь dS_e – *поток энтропии*, возникающий за счёт обмена энергией или веществом с внешней средой. В отличие от величины dS_i, поток энтропии dS_e может быть и положительным, и отрицательным. Это позволяет рассматривать процесс, в результате которого система оказывается в состоянии с меньшей энтропией (состояние 2) по сравнению с начальным состоянием (состояние 1)

$$\Delta S = \int_1^2 dS < 0. \qquad (2.3)$$

Такое состояние может существовать неопределённо долго, если оно является *стационарным*, т. е. состоянием, в котором

$$dS=0, \text{ при этом } dS_e = -dS_i < 0. \qquad (2.4)$$

или

$$dS/dt = dS_i/dt + dS_e/dt = 0.$$

Как видим, для поддержания *стационарного* неравновесного состояния необходимо непрерывно направлять в систему отрицательный поток энтропии, равный по величине внутреннему производству энтропии. Неравновесное состояние как бы «сбрасывает» энтропию, выработанную необратимыми процессами, в окружающую среду.

Вернёмся к началу этого раздела. Пусть произошло изменение состояния изолированной системе по внутренним причинам. Энтропия уменьшилась $S` < S_0$. Рассмотрим подробнее процесс возвращения к равновесному состоянию. Пусть $\Delta S = S` - S0 < 0$ (2.5) есть отклонение энтропии от равновесного значения. «Включается» производство энтропии (2.1). Вместо (2.5) получаем

$$\Delta S = S - S_0 < 0, \text{ где } S = S` + S_i \qquad (2.5)`$$

Разложение отклонения (2.5)` по формуле Тейлора даёт (в обозначениях И.Р. Пригожина)

$$\Delta S = \delta S + \frac{1}{2}\delta^2 S + \ldots \qquad (2.6)$$

Первое слагаемое в (2.6) обращается в нуль из-за условия начального равновесия: $\left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_0 = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_0 = 0,\ \delta S = \left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_0 \delta U + \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_0 \delta V = 0.$

Второе слагаемое в (2.6) (второй дифференциал) можно привести к виду [5]

$$\delta^2 S = -\frac{1}{T}\left[\frac{c_V}{T}(\delta T)^2 - \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T (\delta V)^2\right] = \frac{1}{T}\left|\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T\right|(\delta V)^2 < 0, \qquad (2.7)$$

т. к. $\frac{c_v \delta T}{T} = \frac{\delta Q}{T} = \delta S = 0$ и $\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T < 0.$

Здесь C_v – теплоёмкость при постоянном объёме.

Остальные члены ряда (2.6) пренебрежимо малы. Таким образом, знак отклонения энтропии ΔS определяется знаком второго дифференциала.

Дифференцируя (2.5)` по времени и учитывая *второе начало термодинамики* , получим $\left(\frac{dS_i}{dt} > 0\right)$

$$\frac{d(\Delta S)}{dt} = \frac{dS_i}{dt} \approx \frac{d\left(\delta^2 S\right)}{dt} > 0. \qquad (2.8)$$

Величина $\frac{d\left(\delta^2 S\right)}{dt}$ называется *избыточным производством энтропии*.

Функции, удовлетворяющие условиям (2.7) и (2.8) с точностью до знака являются функциями Ляпунова, а сами условия – условиями устойчивости. Для изолированной равновесной системы эти условия выполняются всегда, поэтому равновесное состояние изолированной системы всегда устойчиво (рис. 3).

В стационарных состояниях открытых систем, удалённых от равновесия, условия (2.7) и (2.8), вообще говоря, не выполняются. И такие состояния неустойчивы. Устойчивыми являются лишь такие стационарные состояния, для которых выполняются те же условий (2.7) и (2.8), что и для равновесных состояний [5, 15].

Линейная необратимость. Потоки и обобщённые силы

Нарушение равновесия между системой и окружающей средой приводит к возникновению *процессов переноса* массы, энергии, импульса, энтропии. *Потоки* и *движущие силы* — понятия, которые описывают процессы переноса [18]. Потоки характеризуют скорость переноса указанных физических величин через воображаемую единичную площадку. Они воз-

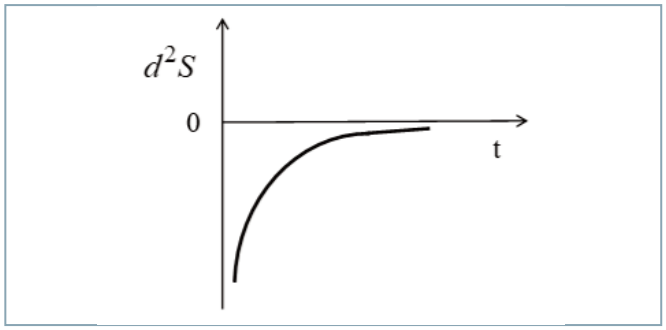


Рис. 3. Асимптотическая устойчивость

никают под действием движущих сил (иначе, обобщённых сил) — градиентов (градиента температуры, плотности, количества вещества и др.), которые количественно определяют неравновесие в системе.

Потоки обычно обозначают символом J_k, k=1,2...n, обобщённые силы можно обозначить символом F_l, l=1,2...n. При термодинамическом равновесии все потоки J_k и обобщённые силы F_l обращаются в нуль. Один и тот же поток может зависеть от нескольких обобщённых сил, поэтому потоки $J_k = J_k(F_1, F_2, \ldots F_l)$ можно разложить в степенной ряд в окрестности равновесного состояния

$$J_k(F_1,F_2,\ldots F_l) = J_k(0) + \sum_l \left(\frac{\partial J_k}{\partial F_l}\right)_0 F_l + \frac{1}{2}\sum_l \left(\frac{\partial^2 J_k}{\partial F_l \partial F_m}\right)_0 F_l F_m + \ldots \qquad (3.1)$$

Относящийся к равновесию поток $J_k(0) = 0$. Вкладами третьего и последующих членов можно пренебречь, т.к. предполагается, что система находится недалеко от равновесия (обобщённые силы достаточно малы). Выражение (3.1) принимает вид линейных соотношений

$$J_k\left(F_1,F_2,\ldots F_n\right) = \sum_{l=1}^{n} L_{kl}F_l, k = 1,2,\ldots,n \qquad (3.2)$$

где $L_{kl} = \left(\frac{\partial J_k}{\partial F_l}\right)_0$ – феноменологические коэффициенты.

Практически важным является случай, когда потоки возникают под действием двух градиентов (n=2): температурного $(\vec{\nabla}T)$ и давления $(\vec{\nabla}p)$, – «тепломассоперенос» (поток тепла J_1 и гидравлический поток J_2, действующие одновременно).

$$\begin{aligned} J_1 &= L_{11}F_1 + L_{12}F_2; \\ J_2 &= L_{21}F_1 + L_{22}F_2; \end{aligned} \qquad (3.3)$$

Оказывается, что если некоторая сила F_1 (пусть это будет градиент температуры) влияет на поток J_2 (например, на гидравлический поток), то сила F_2 (градиент давления) в такой же степени влияет на поток J_1 (тепловой поток). Поэтому равенства (3.3) дополняются т.н. «соотношениями взаимности» Онзагера

$$L_{12} = L_{21}, \qquad (3.4)$$

или в общем виде

$$L_{kl} = L_{lk}. \qquad (3.5)$$

Скорость изменения производства энтропии в процессе определяется формулой интегрирования по объёму [18]

$$dS_i / dt = \int\left(\sum_k J_k F_k\right)dV. \qquad (3.6)$$

Соотношения (3.2) с условием (3.5) являются основой теории линейных необратимых процессов. Эти соотношения успешно использовались во многих работах.

Приведём пример из работ В.С. Колунина с коллегами [7, 8] по изучению тепломассопереноса через водонасыщенное пористое тело с включением льда под действием термодинамических сил в форме

$$\begin{aligned} J_t &= C_{tt}\frac{\Delta T}{T_0 \Delta x} + C_{tp}\frac{\Delta p}{\Delta x}; \\ J_p &= C_{pt}\frac{\Delta T}{T_0 \Delta x} + C_{pp}\frac{\Delta p}{\Delta x}, \end{aligned} \qquad (3.7)$$

где J_t, J_p – тепловой поток и поток жидкости, C_{tt}, C_{tp}, C_{pt}, C_{pp} – коэффициенты переноса, определяемые экспериментально. Размерности потоков соответственно равны $[J_t] = \left[Дж \cdot м^{-2} \cdot сек^{-1}\right]$; $\left[J_p\right] = \left[м \cdot сек^{-1}\right]$.

Для линейно-необратимых процессов справедлив принцип минимума производства энтропии в единицу времени. Согласно теореме Пригожина, в открытой термодинамической системе, подверженной потоку энергии и вещества, скорость изменения производства энтропии, dS_i/dt, внутри системы в неравновесном *стационарном* состоянии достигает *минимального значения*. Или более коротко: в *стационарном* состоянии линейно-неравновесной системы скорость изменения производства энтропии *минимальна* [18, 19]. Теорема о минимуме производства энтропии применима ко всем линейно неравновесным стационарным состояниям.

Установлено, что для процессов *теплопроводности* и *диффузии* линейные соотношения (3.3) справедливы в более широком диапазоне изменения параметров, чем в других случаях.

В режиме линейной необратимости также выполняется *принцип локального термодинамического равновесия*: «Каждый малый макроскопический элемент объёма в любой момент

времени находится в состоянии равновесия»[5]. Как известно, этот принцип имеет большое практическое значение, т.к. позволяет использовать уравнения равновесной термодинамики для исследования неравновесных процессов.

В случае линейного неравновесного процесса имеется некоторая тенденция к изменениям в макроскопическом масштабе системы, но силы и потоки ещё слабы для того, чтобы система могла иметь упорядоченную структуру. Более того, если на систему не накладываются дополнительные условия, то производство энтропии со временем исчезает и система возвращается в равновесное состояние [19].

Диссипативные системы. Нелинейная необратимость. Диссипативные структуры

Диссипативной системой называется открытая система, в которой происходит рассеивание (диссипация) энергии, поступающей извне. Таковой системой является, например, течение воды в трубопроводе или в канале (или обтекание летательного аппарата воздухом). Для диссипативной системы характерно наличие диссипативных *сил*. Диссипативные силы всегда направлены противоположно скоростям частиц и, следовательно, вызывают их торможение (силы вязкого или сухого трения, трения качения, сила гидродинамического сопротивления воды, сила аэродинамического сопротивления). Эти силы являются обычными «ньютоновскими» силами и их не следует смешивать с обобщёнными термодинамическими силами, о которых шла речь в предыдущем разделе.

Наличие в уравнении энергии движущейся вязкой жидкости слагаемого [23]

$$dq' = \frac{\tau^{ij} e_{ij}}{\rho} dt, \qquad (4.1)$$

свидетельствует о том, что вышеуказанные системы являются диссипативными. Здесь $q'\left[\frac{дж}{кг}\right]$ – диссипация энергии, $\tau^{ij}\,(Па)$ – касательные компоненты тензора напряжений, $e_{ij}(сек^{-1})$ – компоненты тензора скоростей деформаций, $\rho\left[\frac{кг}{м^3}\right]$ – плотность жидкости.

Процесс, изображённый на рисунке 4, является *линейно неравновесным* процессом, в котором удельный объёмный *поток* жидкости по размерности совпадает со скоростью *V*: $\left[\frac{м^3}{м^2 сек}\right]=\left[\frac{м}{сек}\right]$. Удельный объёмный *поток* является функцией только одной обобщённой силы, – градиента давления *Δp/l*, где Δp[Па] – перепад давления на участке трубопровода

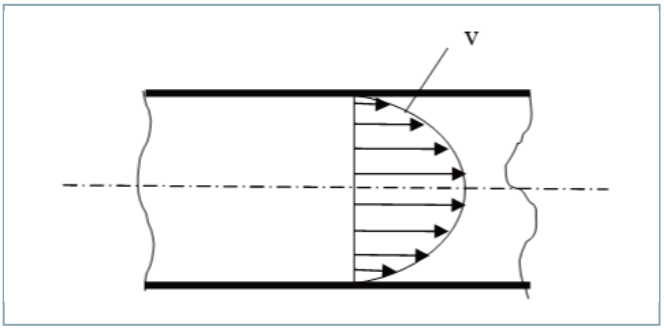


Рис. 4. Ламинарное течение жидкости в трубопроводе

длиной l[м]. Для расчёта удельного объёмного потока (скорости) справедлива т.н. формула Пуазейля

$$V = \frac{\pi d^4}{128\eta} \cdot \frac{\Delta p}{l}. \qquad (4.2)$$

Зависимость (4.2) – это простейший частный случай зависимости (3.2), содержащей только одну силу. Здесь $J_1 = \dot{V}$, $F_1 = \Delta p/l$, $L_{11} = \frac{\pi d^4}{128\eta}$. Параметр Δp удерживает систему в неравновесном состоянии (в общем случае параметр λ).

Когда термодинамические силы становятся достаточно большими и вынуждают систему покинуть *линейную* область, гарантировать устойчивость стационарного состояния, вообще говоря, нельзя. При достижении определённого критического значения параметра $\lambda = \lambda_\tau$ нарушается симметрия (3.6), меняются определяющие уравнения, решения которых теперь не отвечают условиям устойчивости (2.7) и (2.8). В области *нелинейной* необратимости необходимо специально исследовать, как стационарное состояние реагирует на различные типы флуктуаций, возникающих в системе или в окружающей среде, учитывая, что флуктуационные отклонения теперь уже могут достигать макроскопических размеров.

По мере удаления системы от равновесного состояния можно ожидать появление «дальней когерентности», когда между макроскопически различными частицами системы возникает корреляция (согласованное поведение). Устанавливается макроскопический поток, который стабилизируется (становится стационарным) благодаря обмену энергией или веществом между системой и окружающей средой. Это приводит к новому пространственно-упорядоченному состоянию – т.н. «диссипативной структуре».

Диссипативная структура – это *упорядоченное*, *устойчивое стационарное* состояние, возникающее в *открытой* дисси-

[5] Для выполнения этого принципа должны иметь место следующие условия:
Характерное время установления равновесия элемента (релаксации) должно быть значительно меньше характерного времени изменения макроскопических параметров.
Выделенный элемент среды должен содержать *достаточное количество* частиц, а его размер – *существенно превышать* микроскопические длины (средний размер частиц, среднее расстояние между частицами), но должен быть *существенно меньше* масштаба изменений параметров среды. Вследствие чего градиенты температуры, давления, концентрации и другие градиенты должны быть ограничены.
При выполнении указанных условий истинные значения в каждом выделенном элементе системы не будут сильно отличаться от своих средних значений, что позволит ввести понятия температуры, давления, химического потенциала и других термодинамических величин, как если бы этот элемент находился в равновесии.

пативной системе вдали от равновесия. Оно соответствует какой-либо форме надмолекулярного когерентного поведения огромного числа молекул. Этим качеством *нелинейно неравновесные* системы отличаются от равновесных и близких к равновесию систем, в которых радиус действия корреляций ограничен короткодействующими межмолекулярными силами[6]. Для поддержания диссипативной структуры необходим достаточно мощный поток энергии или вещества. Диссипативная структура исчезает сразу же после прекращения действия потока.

Самопроизвольное возникновение устойчивой, регулярной, пространственной (организованной) структуры в открытых неравновесных системах принято называть *самоорганизацией*. Более строго [16]: *Самоорганизацией называют природные скачкообразные процессы, переводящие открытую неравновесную систему, достигшую в своем развитии критического состояния, в новое устойчивое состояние с более высоким уровнем сложности и упорядоченности по сравнению с исходным.*

Примеры диссипативных структур

Турбулентное течение

При увеличении «удерживающего» параметра Δp до некоторого критического значения Δp_c скорость течения жидкости в трубопроводе (рис. 4) плавно возрастает. Если $\Delta p \geq \Delta p_c$, то зависимость скорости от перепада давлений изменится. Скорость резко возрастёт. Профиль скорости на рисунке 4 станет более наполненным из-за возникновения поперечных пульсаций. Тонкий слой потока, непосредственно примыкающий к стенке, остаётся ламинарным.

В гидродинамике для описания режима течения принято использовать критерий подобия – число Рейнольдса, – которое зависит от параметра Δp неявно:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V}{\eta d}, \qquad (5.1)$$

где $\rho\left[\frac{кг}{м^3}\right]$ – плотность жидкости, $V\left(\frac{м}{сек}\right)$ – скорость потока жидкости, $\eta\left(\frac{Н \cdot сек}{м^2}\right)$ – коэффициент динамической вязкости, d(*м*) – диаметр трубы.

Переход к турбулентному режиму происходит при значениях числа Рейнольдса превышающих 2300. Вследствие того, что устойчивость линейно неравновесного потока может затягиваться (влияние условий на входе в трубопровод, влияние шероховатости стенок и пр.), для устойчивого турбулентного течения в трубах принято Re>4000.

Многочисленным разнообразным типам турбулентности, отличающимся особенностями структуры потока и механизмом диссипации энергии, посвящена обширная литература (например, [25]). В некоторых случаях в потоке возникают упорядоченные двумерные вихри характерного размера (так называемые «когерентные структуры»). Некогерентные структуры можно рассматривать как смесь когерентных структур с различными размерами вихрей, которые могут отличаться по порядку величины до 10^5.

Известный пример турбулентной *когерентной* конвекции, в котором основные свойства диссипативных структур прослеживаются наиболее чётко, анализируется в следующем разделе.

Конвекция Рэлея – Бенара

Исторически сложилось так, что ячейки Рэлея – Бенара стали «эталонной» диссипативной структурой «нехимического» происхождения [4, 28].

Рассмотрим слой жидкости, подогреваемый снизу. Жидкость испаряется. Система является *открытой*, т.к. обменивается с внешней средой веществом. Это – *необходимое условие* для существования диссипативной структуры. В данном примере диссипативная структура защищает нижний слой основания от перегрева до тех пор, пока вся жидкость не испарится.

При испарении его поверхность оказывается холоднее внутренних частей. Поскольку между верхней и нижней поверхностями существует различие плотности, холодные слои стремятся опуститься вниз, а тёплые — подняться вверх. Действию гравитационной и архимедовой сил противодействует вязкая сила жидкости. Соотношение этих сил определяется безразмерным параметром – *числом Рэлея*:

$$Ral = \frac{g\alpha}{va}\left(T_1 - T_2\right)L^3, \qquad (5.2)$$

где T1, T2 (град C), – температура нижнего и верхнего слоёв, L(*м*) – высота контейнера, $g\left(\frac{м}{сек^2}\right)$ – ускорение свободного падения, $\nu\left(\frac{м^2}{сек}\right)$ – коэффициент кинематической вязкости, $a\left(\frac{м^2}{сек}\right)$ – коэффициент температуропроводности, α (град$^{-1}$) – коэффициент температурного расширения жидкости.

Чем больше число Рэлея, тем меньше влияние вязкости, и при критическом числе Ral≥1708 появляются конвективные ячейки (рис.5)

Рассматриваемая система является *открытой* и обменивается с внешней средой теплом. Система при температуре T_1 получает *такое же количество тепла* Q, что и отдает окружающей среде при температуре T_2. Следовательно, энтропия системы уменьшается на величину:

$$\Delta S_e = \frac{\delta Q}{T_1} - \frac{\delta Q}{T_2} < 0, \ (T_1 > T_2), \qquad (5.3)$$

[6] Корреляционный радиус определяет область, в пределах которой изменение состояния одного элемента системы влияет на состояние других элементов. И обратно, любой элемент «чувствует» изменения, произошедшие в других элементах в пределах корреляционного радиуса.

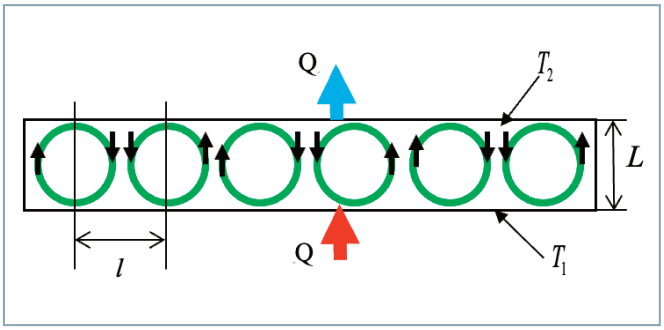


Рис. 5. Конвекция Рэлея – Бенара ($T_1 > T_2$)

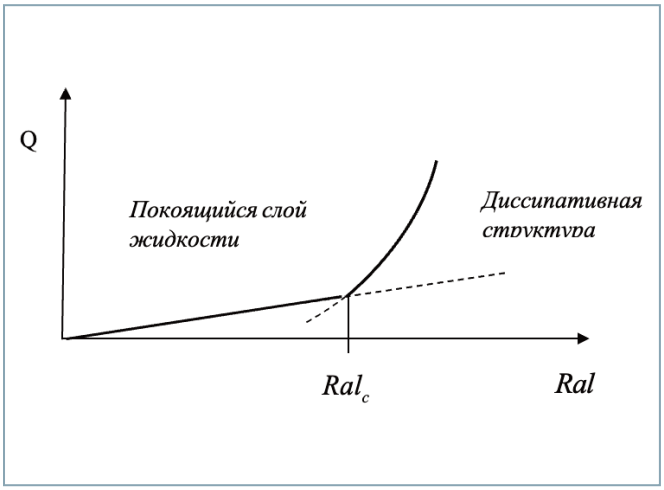


Рис. 6. Поток тепла в жидкости при докритических и сверхкритических значениях числа Рэлея

Или, иначе, к системе направлен отрицательный поток энтропии от окружающей среды. Одновременно внутри системы производится столько же энтропии за счёт потерь на трение, но с обратным знаком $\Delta S_i = (-\Delta S_e) > 0$. Полная энтропия в процессе не меняется (процесс *стационарный*).

Обратим внимание на появление в системе *характерного размера* – расстояния между ячейками l.

На рисунке 6 показано как осуществляется переход от обычной теплопроводности покоящегося слоя жидкости к интенсивной теплопроводности конвективного слоя [28].

Рассматриваемая диссипативная структура является предметом исследования многих теоретических работ [4]. Её адекватное описание даёт система гидродинамических уравнений в приближении Буссинеска. Приближение Буссинеска состоит в следующем. Плотность считается функцией только температуры

$$\rho - \rho_0 = -\rho_0 \alpha (T - T_0) \qquad (5.4)$$

где ρ_0 – значение плотности при некоторой подходящим образом выбранной отсчётной температуре T_0, α – коэффициент температурного расширения. Система уравнений, описывающая интересующую нас диссипативную структуру, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}\vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{\vec{\nabla} p'}{\rho_0} - \vec{g}\alpha\theta + \nu\Delta\vec{V}; \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{V}\vec{\nabla}(T_s + \theta) = a\Delta\theta; \\ div\vec{V} = 0; \end{cases} \qquad (5.5)$$

где $\theta = T - T_s$ – возмущённый профиль температуры, $T_s = T_1 - \beta Z$ – невозмущённый профиль температуры, p' – возмущение давления, т .е. его отклонение от распределения, соответствующего линейному профилю температуры. Первое уравнение (5.5) – векторное, два других – скалярные; $(\vec{V}\vec{\nabla})$ – скалярное произведение вектора скорости $\vec{V} = V_x\vec{i} + V_y\vec{j} + V_z\vec{k}$ на векторный дифференциальный оператор «набла» $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x}\cdot\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\cdot\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\cdot\vec{k}$.

Таким образом, система уравнений (5.5) содержит пять скалярных уравнений. Граничные условия для температуры на нижней границе z=0, T = T_1; на верхней границе

$z = h, T = T_2 = T_1 - \Delta T$, $\Delta T = \beta h$, следовательно:

$$\theta = 0, \qquad (5.6)$$

на обеих поверхностях.

Условия на границах для скоростей:

либо $\vec{V} = 0$, $\vec{V} = V_x\vec{i} + V_y\vec{j} + V_z\vec{k}$ (условие прилипания), (5.7), либо обращение в нуль вертикальной компоненты скорости V_z с искусственным условием, сильно упрощающим процедуру решения.

$$\frac{\partial V_x}{\partial z} = \frac{\partial V_y}{\partial z} = 0. \qquad (5,7)$$

Нескальные грунтовые основания под нагрузкой

В работах [21,22] было обращено внимание на самоорганизацию (упорядочение структуры) грунтов перед разрушением. В эксперименте, который можно назвать *ключевым* [21], фиксировалась *диссипативная структура* (рис. 7), наблюдалась форма когерентного поведения большого числа зёрен песчаного массива. Для этого эксперимента был изготовлен специальный прибор однородного сдвига.

В опытах при сдвиге от 0̊ до 15̊ происходила перестройка структуры образца, среда разделялась на элементы линиями скольжения. Появлялась характерная длина l – расстояние между линиями скольжения.

В ряде работ термин «диссипативная структура» использовался Г.П. Постоевым с коллегами при анализе напряженного состояния оползневых склонов и оснований фундаментов (например, [17]). Однако в этих работах отсутствует обоснование применимости этого термина в механике грунтов. Проведём такое обоснование (применительно к нескальным грунтовым основаниям фундаментов).

Как известно [27, 26], в зависимости от величины нагрузки различают *четыре фазы* напряженно-деформированного состояния грунтов: упругого деформирования, уплотнения, сдвигов и выпоров. В *первой* фазе уровень напряжений не превышает структурной прочности грунта. Зависимость между напряжениями и деформациями можно считать обратимой. Это – равновесное состояние. Процесс уплотнения грунта (*вторая* фаза) можно отнести к процессам линейной необратимости. *Третья* фаза характеризуется началом образования в грунте зон предельного равновесия с пластическими деформациями (рис. 8).

При дальнейшем увеличении нагрузки выше критической (*четвёртая* фаза) пластические зоны сливаются в одну общую зону предельного равновесия. Давление фундамента вызывает когерентное движение зернистой структуры грунта по линиям скольжения. В случае малозаглубленных фундаментов линии скольжения поворачиваются к свободной поверхности.

Образовавшаяся диссипативная система отделяет фундамент от нижележащего массива грунта. Часть основания, находящаяся ниже в допредельном состоянии, являетсяя *внешней средой* по отношению к диссипативной системе.

Получается так, что фундамент совершает механическую работу над диссипативной системой, а диссипативная система совершает работу над нижней частью основания (внешней средой). Но это только часть той работы, которую совершает фундамент. Другая часть механической энергии расходуется на выдавливание и перемещение грунта по линиям скольжения (работа против сил трения). Таким образом, диссипативная система «демпфирует» действие штампа на нижнюю часть основания, как бы «защищая» её. Здесь следует руководствоваться вариантом (***) первого начала термодинамики. Нетрудно видеть, что полная энтропия в этом процессе не меняется, т.к. теплом, выделенным при трении, можно пренебречь по сравнению с механической работой. Система *стационарна* и *открыта*.

Как известно, параметром формы (очертания) области предельного равновесия (диссипативной системы) является глубина заложения фундамента [27]. По мере увеличения глубины заложения очертания области предельного равновесия изменяются, как показывает сравнение зон предельного равновесия под фундаментами мелкого и глубокого заложения (рис. 9 и рис.10). На рис. 10 граница между диссипативной системой и ненарушенной частью массива (*внешней средой*) не выходит на поверхность.

В механике грунтов известны кривые деформации связных пылевато-глинистых грунтов в фазах сдвига и выпора [27], На (рис. 11) представлены усредненные результаты многих испытаний на вдавливание. При нагрузке $p < p_0$ устанавливается равновесие. При $p > p_0$ возможно появление диссипативной структуры (здесь $p_3 > p_2 > p_1 > p_0$). Отмеченный интервал

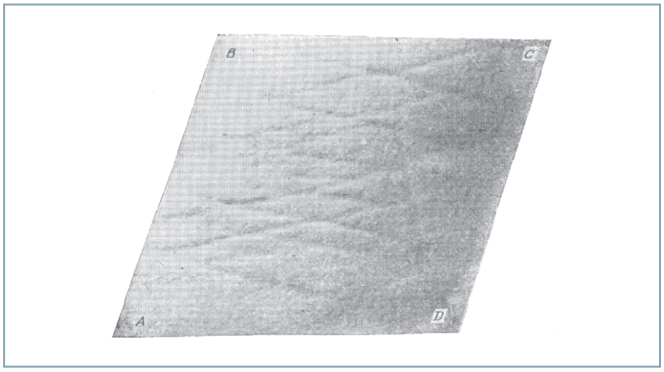


Рис. 7. Диссипативная структура песчаного грунта (песок тонкой крупности с углом внутреннего трения Ф = 31̊).

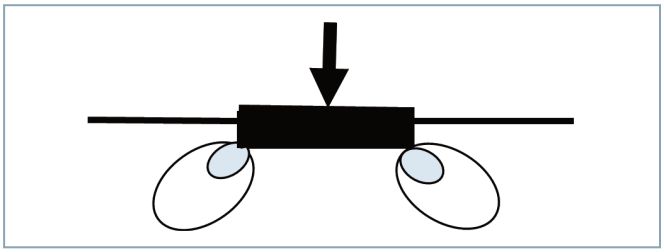


Рис. 8. Начало образования зон предельного равновесия

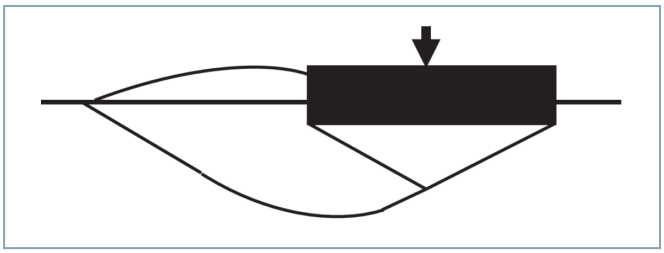


Рис. 9. Фундамент мелкого заложения (симметричная часть зоны предельного равновесия отброшена)

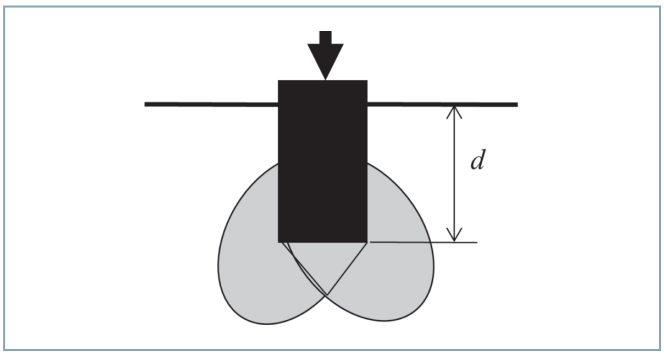


Рис. 10. Фундамент глубокого заложения

времени $\Delta t_{дс}$ можно назвать *временем жизни диссипативной структуры*. Штриховая линия позволяет определить так называемую длительную прочность грунта p_0.

Из рассмотрения рисунка 11 следует, что диссипативная структура защищает нижнюю часть основания до тех пор, пока значительные деформации не приведут грунт к развитию прогрессирующего течения.

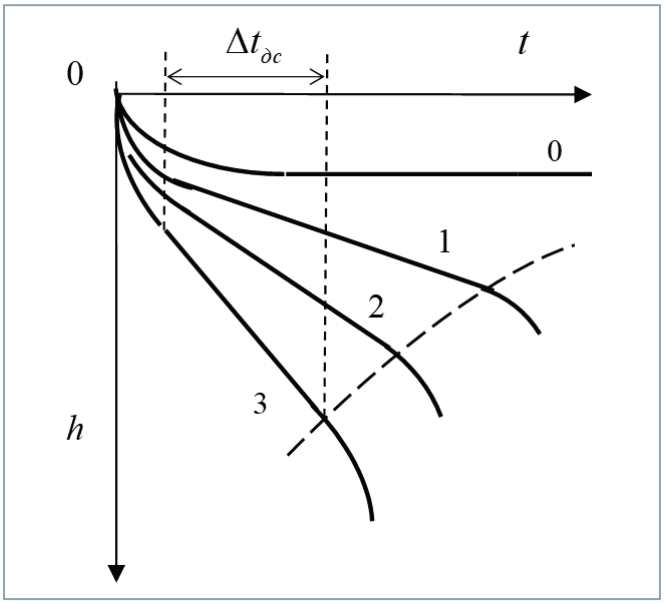


Рис.11. Деформации связных грунтов в зависимости от времени

Состояние диссипативной структуры в грунтах является состоянием предразрушения. Оно может представлять теоретический интерес, но не может допускаться в строительстве.

Аналитическое описание диссипативной структуры в основании получается с помощью модели, в которой предполагается, что в каждой точке грунтовой среды достигается предельное напряженное состояние и выполняется условие Кулона.

Система уравнений плоской задачи имеет вид [24, 6]:

Уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}+X=0; \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}+Z=0. \end{aligned} \qquad (5.8)$$

Условие предельного равновесия:

$$\sigma_1-\sigma_2=\left(\sigma_1+\sigma_2+2\sigma_c\right)\sin\varphi. \qquad (5.9)$$

Граничные условия на контуре области предельного равновесия:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}\cos\left(n,x\right)+\tau_{yx}\cos\left(n,y\right)=X_s; \\ \tau_{xy}\cos\left(n,x\right)+\sigma_{yy}\cos\left(n,y\right)=Y_s. \end{aligned} \qquad (5.10)$$

Здесь используются стандартные обозначения

где σ_1, σ_2 – главные напряжения; $\sigma_c = c/tg\varphi$; c – сцепление; φ – угол внутреннего трения; X и Z – проекции *объёмной* силы [н/м^3] на оси x и z соответственно; X_s и Y_s – соответствующие проекции *поверхностной* силы, действующей на единицу площади поверхности контакта области предельного равновесия с массивом [н/м^2]; $\vec{n}$ – единичный вектор внешней нормали к поверхности контакта (в случае плоской задачи – к линии контура). Граничные условия (5.10) должны выполняться на поверхности контакта с частью массива, который не является диссипативной системой, а является внешней средой по отношению к ней.

Предложенная В.В. Соколовским замена переменных [24] позволяет перейти от системы уравнений в частных производных (5.8) с условием (5.9) к системе обыкновенных дифференциальных уравнений для двух семейств линий скольжения:

$$\begin{aligned} dx/dz=tg\left(\delta+\mu\right);d\varsigma/dz=a \\ dx/dz=tg\left(\delta-\mu\right);d\eta/dz=b \end{aligned}, \qquad (5.11)$$

где $\mu=\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}$; δ – угол между осью x и главным напряжением σ_1; ς и η – некоторые функции x и z;

$$\left.\begin{matrix} a \\ b \end{matrix}\right\}=\pm\frac{X\cos\left(\delta\mp\mu\right)-Z\sin\left(\delta\mp\mu\right)}{2\sigma\cdot\sin\varphi\cdot\cos\left(\delta\pm\mu\right)},$$

где $\sigma=\frac{1}{2}(\sigma_1+\sigma_2)+\sigma_c$.

В каждой точке среды возникают две площадки скольжения, расположенные по отношению к главным площадкам под углами $\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}$ и $\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}$.

Заметим, что система уравнений теории упругости имеет единственное решение до критической точки состояния среды[7], в которой это решение теряет устойчивость. Вместо него мы получаем два решения (т.н. «простейших») системы уравнений теории пластичности.

Линии скольжения по простейшему решению системы уравнений (5.8) – (5.10) для случая активного давления ($\sigma_{zz} > \sigma_{xx}$) представлено на рисунке 12.

Область грунта, где справедливо указанное решение, ограничена прямыми линиями скольжения, проведёнными под углом $\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}$ к вертикали. В некоторых случаях прямые линии скольжения сходятся в одной точке. Тогда второе семейство образуют т.н. логарифмические спирали вида $r = Ce^{-\theta tg\varphi}$ (в полярных координатах r и θ) [6].

Эксперимент Боттомли

Опыт Боттомли [29, 30, 11] является одним из интереснейших примеров из термодинамики и состоит в следующем. Проволока с подвешенным на ней грузом разрезает ледяной блок, закреплённый на опорах, имеющий *слабо-отрицательную температуру* (порядка десятых долей °K). После прохождения проволоки разрез залечивается, и лёд оказывается неразрезанным. Скорость прохождения проволоки через лёд зависит от действующей силы, а также от материала и диаметра проволоки. Упрощенная схема этого явления такова (рис.13, на схеме показано сильно увеличенное поперечное сечение проволоки).

[7] Здесь в качестве параметра λ принимается максимальное касательное напряжение τ. Критическое значение этого параметра λ_c равно кулоновскому напряжению $\tau=\sigma tg\varphi+c$.

Лёд, который находится непосредственно под проволокой, плавится. Образовавшаяся при плавлении вода выдавливается *вверх*, обтекая проволоку. Вода, которая собирается в *верхней части* сечения непосредственно над проволокой, замерзает[8].

Тепло, выделившееся при замерзании воды в окрестности *верхней точки*, передаётся к *нижней точке* по материалу проволоки и по льду. Область льда вблизи *нижней точки*, поглощает тепло, выделившееся в области *верхней точки*. Устанавливается конвективно-кондуктивный процесс в некоторой движущейся вместе с проволокой области.

Здесь диссипативным телом является тонкий слой воды, лёд – окружающая среда. Проволока с грузом совершает надо льдом механическую работу, переводя его в состояние с меньшей температурой фазового равновесия. Она не выделяет тепло и не поглощает тепло, и является только передатчиком тепла, своеобразным «катализатора» процесса.

Итак, при температуре T_1 лёд поглощает тепло, превращаясь в воду (плавление), при температуре T_2 вода отдаёт тепло, превращаясь в лёд (замерзание). Диссипативная система обменивается с внешней средой тепловой энергией и веществом. Можно сказать, что к диссипативной системе направлен отрицательный поток энтропии от окружающей среды, равный

$$\Delta s_e = \frac{L}{T_2} - \frac{L}{T_1} < 0, \qquad (5.12)$$

т.к. температура T_2 в градусах Кельвина мало отличается от температуры T_1, но несколько выше, так что $T_2 > T_1$.

Здесь малой буквой s обозначена удельная энтропия, размерность $\left[\frac{дж}{г \cdot град}\right]$, $L = 333{,}6 \frac{дж}{г}$ – удельная теплота плавления (затвердевания)[9].

Одновременно внутри диссипативной системы производится столько же энтропии за счёт потерь на трение, но с обратным знаком $\Delta S_i = (-\Delta S_e) > 0$. Полная энтропия в процессе не меняется, поэтому диссипативная система *стационарна* в смысле равенства (3.5). Таким образом, рассматриваемая система, как очевидно, далека от равновесия, открыта, стационарна и устойчива.

К сожалению, из-за принципиальных трудностей до сих пор не выполнены эксперименты, из которых следовало бы более определённое описание структуры потока, обтекающего проволоку. Нет определяющих систем уравнений, описывающих процесс, аналогичных уравнениям (5.5) – (5.10). Существующие теоретические подходы оказались слишком грубыми [12, 13, 31]. Наличие результатов более тонких экспериментов и определяющей системы уравнений позволило бы описать плавление льда и вытеснение образовавшейся влаги к порам и периферии грунтового массива под воздействием давления, которые наблюдались в опытах с мёрзлыми грунтами [3, 20].

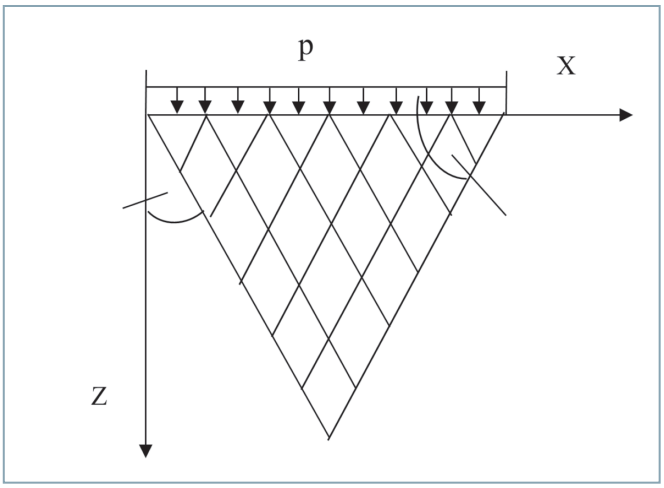


Рис. 12. Простейшее решение уравнений 5.8 – 5.10. Случай активного нагружения

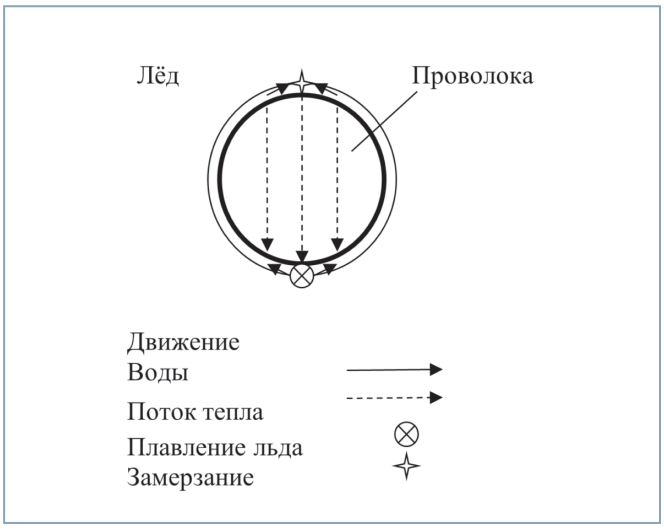


Рис. 13. Конвективно-кондуктивный процесс при прохождении проволоки через лёд

Тем не менее, используя аналогию с опытом Боттомли, можно предположить существование механизма перераспределения льдистости под действием внешней нагрузки. Разности величин давления на уровне структуры грунта в окрестности точек *контакта минеральных частиц со льдом* приводит к неравномерности температуры фазового равновесия.

На рисунке 14 показаны тепловые диполи. Условные обозначения те же, что и на рис.13.

На следующем рисунке показана идеальная модель мёрзлого грунта с *базальным типом* льда-цемента. Здесь представлена

[8] В работе [12] показано, что температура окрестности верхней точки T_2 и температура окрестности нижней точки T_1 равны температурам фазового равновесия в этих точках. При этом T_2 несколько выше T_1 из-за пониженного давления в верхней точке.

[9] Количество воды, образовавшейся в окрестности нижней точки в единицу времени равно количеству льда, образовавшегося в верхней окрестности в единицу времени ($dm_w / dt = dm_i / dt$). Пару тепловых источников одинаковой мощности (здесь, равной $L\frac{dm}{dt}$), но с противоположными знаками, разнесённых в пространстве, называют тепловым диполем.

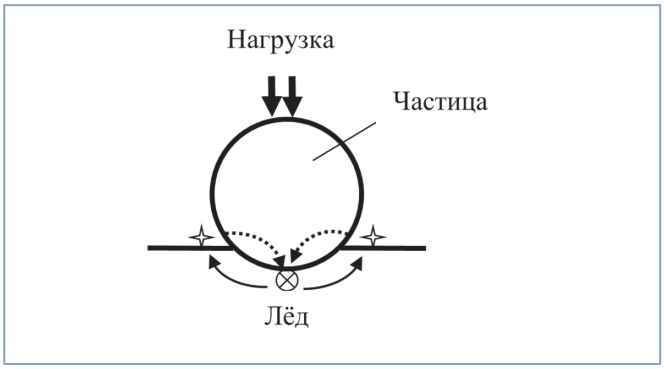


Рис. 14. Контакт сферической частицы с поверхностью льда

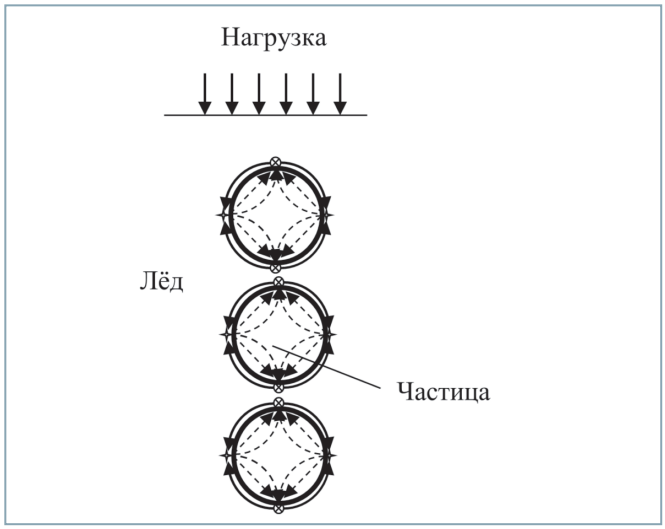


Рис. 15. Идеальная модель мёрзлого грунта

система тепловых диполей. На рисунке показана одна вертикальная цепочка, каких может быть множество.

Как следует из теории упругости, вертикальная нагрузка, приложенная к образцу такого грунта, вызвала бы повышенное давления на «полюсах» каждой из частиц и понижение давления на её «экваторе». Следствием чего явилось бы плавление льда на полюсах и нарастание льда на экваторе. Это, в свою очередь, привело бы к сокращению образца в вертикальном направлении и к распуханию – в поперечном.

Процессы, показанные на рисунках 13 – 15, при снятии внешней нагрузки останавливаются.

Заключение

Причиной к объединению в одной статье таких понятий, как «принцип Ле Шателье – Брауна», «линейно необратимые процессы» и «диссипативные структуры» послужило то, что эти понятия ассоциируются с «демпфированием» внешнего воздействия на термодинамическое тело или систему. В первом случае ослабление воздействия достигается стремлением изолированной системы к равновесию. Во втором случае – «сбрасыванием» избыточной энтропии во внешнюю среду. В третьем случае – рассеиванием энергии, поступающей в термодинамическую систему извне.

Явления турбулентности (гидроаэромеханика), конвекции Рэлея – Бенара (тепломассообмен) и реакции Белоусова –Жаботинского (химия), в настоящее время ставшие хрестоматийными, были известны до появления термодинамики необратимых процессов. Эти открытия были результатом экспериментов и их аналитического описания в рамках соответствующего раздела науки. Эти открытия послужили стимулом для развития термодинамики необратимых процессов. Были сформулированы общие принципы термодинамики сильно неравновесных процессов, в частности, найдены условия возникновения т.н. диссипативных структур.

Информация, получаемая из термодинамики, ценна своей общностью. Теория позволяет упорядочить наши представления о процессах самоорганизации, выявляет особенности их свойств, предохраняет от ошибок в толкованиях каких-либо результатов исследований. Знание общих принципов позволяет отнести к классу диссипативных структур явления из разных разделов науки. Термодинамика даёт возможность установить, как распределяется, откуда поступает и на что расходуется энергия. Это имеет большое значение для многих приложений.

Однако с помощью только общих принципов термодинамики невозможно получить конкретную систему с диссипативной структурой. Для этого теория диссипативных структур, так же, как и принцип Ле Шателье – Брауна, необходимо дополнялась соответствующими *законами*, *правилами*, *результатами экспериментальных исследования*, *уравнениями* типа (5.4) – (5.7) или (5.8) – (5.10) с учётом особенностей той науки, в которой эти системы возникают (в механике, химии и т. д.). *Самоорганизация* не является физическим законом. Это природный процесс, который осуществляется с учётом физических законов, никогда их не нарушая [15, 16, 14].

Возникновение диссипативной структуры нигде не вступает в противоречие с классической механикой грунтов и теорией грунтовых оснований сооружений. В допредельном состоянии оснований нагруженная часть под фундаментом не является диссипативной. При увеличении нагрузки выше критической, система становится диссипативной. Пластические зоны сливаются в одну общую зону. Образующаяся диссипативная структура отделяет фундамент от нижележащего массива грунта. В связи с этим по-новому освещается роль граничных условий (5.6), (5.7) и (5.10), как формы взаимодействия диссипативной системы с внешней средой.

Рассматривая грунтовое основание в запредельном состоянии как термодинамическое тело, можно сделать вывод, что это *упорядоченное*, *стационарное* состояние, возникающее в *открытой* диссипативной системе вдали от равновесия, т.е. диссипативная структура. Однако в отличие от случая с ячейками Рэлея – Бенара, в механике грунтов мы наблюдаем проявление *надкарпускулярной* (но не *надмолекулярной*) коге-

рентности – согласованного поведения огромного числа *частиц грунта* с «дальнодействующими» связями. На микроскопическом уровне здесь необходимо рассматривать силовое взаимодействие зёрен грунта вместо хаотического движения молекул газа, колебательного движение молекул твердого тела или жидкости. Тем не менее, в случае механики грунтов мы имеем право говорить, как минимум, о близкой аналогии состояния *предразрушения* грунтового онования с диссипативными структурами. Это состояние может представлять теоретический интерес, но не может допускаться в строительстве.

Дальнейшее развитие теории эксперимента Боттомли, также привлеченного здесь для обсуждения, было бы полезно для механики мёрзлых грунтов, в которой контакты минеральных частиц со льдом, вызывающие локальное плавление льда с последующим повторным замерзанием (т.н. режеляцией), играют большую роль [2, 12, 13, 31]). Будем надеяться, что в будущем экспериментаторы, проводя опыты с нагруженными образцами мёрзлого грунта, с помощью новой приборной техники смогут увидеть картину чередующихся оттаиваний и замерзаний, образующих диссипативную структуру.

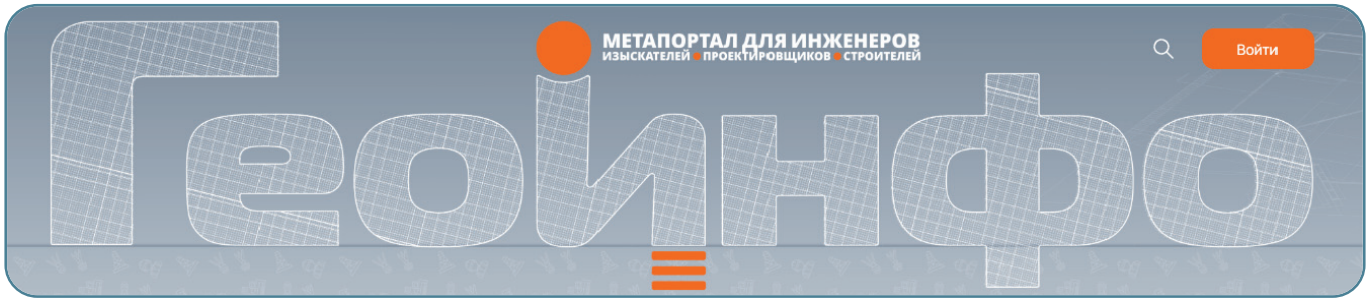
Литература

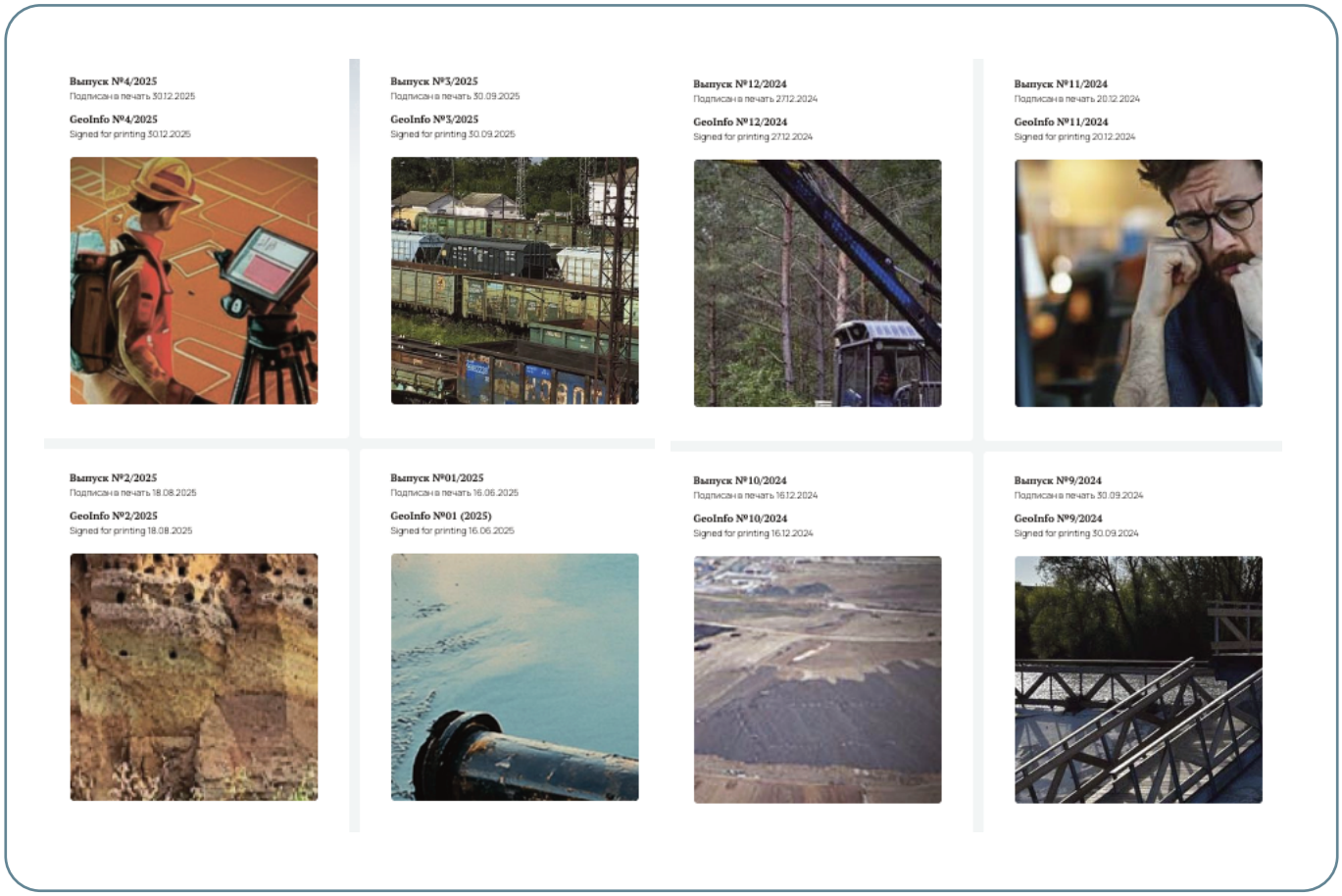
1. Базаров И.П. Термодинамика. М.: «Высшая школа», 1991. – 376 с.
2. Брушков А.В., Мерзляков В.П., Власов А.Н., Талонов А.В., Ухов С.Б. Влияние локальных фазовых переходов на ползучесть пластично-мерзлых грунтов// Геоэкология, 1995, N5, с.71-77.
3. Вялов С.С. Реологические свойства и несущая способность мёрзлых грунтов. М.: АН СССР, 1959. – 190 с.
4. Гетлинг А.В. Формирование пространственных структур конвекции Рэлея – Бенара // Успехи физических наук, 1991. Том 161, №9, с. 1 – 80.
5. Гленсдорф П., Пригожин И.Р. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: «Мир», 1973. – 280 с.
6. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. М.: «Высшая школа», 1985. – 351 с.
7. Колунин В.С., Колунин А.В., Писарев А.Д. Тепломассоперенос через водонасыщенную керамику с включением льда под действием различных термодинамических сил. Часть 1. Градиент давления жидкости. // Криосфера Земли, 2011. Том XV, № 3, с. 56-60.
8. Колунин В.С., Колунин А.В., Писарев А.Д. Вклад движения льда в тепломассообменные свойства пористых сред // Криосфера Земли, 2011. Том XV, № 4, с. 43-45.
9. Комаров И.А. Термодинамика и теплофизика мёрзлых пород. М.: «Научный мир», 2025. – 631с
10. Ландау Л.Д. и Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: «Наука», 1964. – 567 с.
11. Маэно Н. Наука о льде. – М.: Мир, 1988.– 229с.
12. Мерзляков В.П. Влияние внешнего давления на фазовое равновесие льда и влаги в мёрзлых грунтах// Основания, фундаменты и механика грунтов, 2001, №1, с. 2 – 6.
13. Мерзляков В.П. Основные явления, характерные для механического взаимодействия твёрдых частиц со льдом (анализ эксперимента Боттомли) // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2007, №1, с. 2 – 7.
14. Мухаметгалеев Д.М., Савдур С.Н. Элементы термодинамики, хаос и порядок. Синергетика. Казань: Казанский Университет, 2016. – 79 с.
15. Николис Г., Пригожин И. Р. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: «Мир», 1979. – 512 с.
16. Очкина Н.А., Захаров О.А. Классическая (равновесная) термодинамика. Неравновесная термодинамика. Самоорганизация природы. Пенза: ПГУАС, – 111 с.
17. Постоев Г.П. Диссипативные структуры в грунтовом массиве на примере формирования глубоких оползней// Инженерная геоэкология. 2018. Т. XIII, №3. С. 54 – 61.
18. Пригожин И.Р., Кондепуди Д. Современная термодинамика. М.: «Мир», 2002. – 461 с.
19. Пуртов П. А. Введение в неравновесную химическую термодинамику. Новосибирск: НГУ, 2000. – 97 с.
20. Разбегин В.Н., Вялов С.С., Максимяк Р.В., Садовский А.В. Исследования механических свойств мерзлых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1996, №2, с. 2– 8.
21. Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И. О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1974. № 3. С. 130–133.
22. Ревуженко А. Ф. Механика сыпучей среды: некоторые фундаментальные проблемы и приложения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 5. С. 19–32.
23. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 1. М.: «Наука», 1970. – 492 с.
24. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 240с.
25. Турбулентность. Принципы и применения / Ред. Фрост У., Моулден Т. – М.: «Мир», 1980. – 535 с.
26. Учебное пособие по курсу "Механика грунтов" / Петраков А.А.,Яркин В.В., Таран Р.А., Казачек Т.В.; ред. Петраков А.А. – Макеевка: ДонНАСА, 2004. – 164 с.
27. Цытович Н.А. Механика грунтов. - М.: “Высшая школа”, 1983. - 257 с.
28. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: «Мир», 1979. – 279 с.

29. Bottomley, J.T. [Melting and regelation of ice]. Nature, vol.5, no. 114, 1872, pp. 185.
30. Drake, L.D., Shreve, R.L. [Pressure melting and regelation of ice by round wires]. Proc. Roy. Soc. London, A332, 51, 1973, pp. 51 ▤ 83.
31. Merzlyakov, V.P. [Hydraulics of Regelation Flows in the Frozen ground under load]. Composites: Mechanics, Computations, Applications, V.7, 2016, Issue 2, pp. 1 – 14.

References

1. Bazarov I.P. [Thermodynamics]. Moscow, Higher school, 1991, 376 p. (in Russian).
2. Brushkov, A.V., Merzlyakov, V.P., Vlasov, A.N., et. al. [Effect of local phase transitions on the creep of plastic frozen soils]. Geoecology, 1995, no. 5, pp. 71 – 77. (in Russian)
3. Vyalov, S.S. Rheological Properties and Load-Bearing Capacity of Frozen Soils. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1959. 190 p. (in Russian).
4. Getling, A.V. [Formation of Spatial Structures of Rayleigh-Benard Convection]. Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences), 1991, vol. 161, no.9, pp. 1 – 80. (in Russian).
5. Glansdorff, P., Prigogine, I., [Thermodinamic Theory of Structure, Stability and Fluctuation]. Moscow, Mir Publ., 1973, 280 p. (in Russian).
6. Ivanov, P.L., [Soils and Foundations of Hydraulic Structures]. Moscow, Higher school Publ., 1985. 351 p. (in Russian).
7. Kolunin, V.S., Kolunin, A.V., Pisarev, A.D. [Heat and Mass Transfer through Water-saturated Ceramics with Ice inclusion under the Influence of various Thermodynamic Forces. Part I. Fluid pressure gradient]. Earth's Cryosphere, 2011. vol. XV, no. 3, pp. 56 – 60. (in Russian).
8. Kolunin, V.S., Kolunin, A.V., Pisarev, A.D. [Contribution of ice motion to the heat and mass transfer properties of porous media]. Earth's Cryosphere, 2011. vol. XV, no. 4, pp. 43 – 45. (in Russian).
9. Komarov, I.A. [Thermodynamics and Thermophysics of Frozen Soils]. Moscow, Scientific World, 2025, 631 p. (in Russian).
10. Landau, L.D., Lifshitz, E.M. [Statistical Physics]. Moscow, Nauka, 1964, 567 p. (in Russian).
11. Maeno, N. [The Science of Ice]. Moscow, Mir, 1988, 229 p. (in Russian).
12. Merzlyakov, V.P. [Effect of External Pressure on the Phase Equilibrium of Ice and Water in Frosen Soils]. Soils Mechanics and Foundation Engineering, vol. 38, no. 1, 2001, pp. 1-7 (in Russian)..
13. Merzlyakov, V.P. [Basic phenomena characteristic of mechanical interaction between solid particles and ice]. Soils Mechanics and Foundation Engineering, vol. 44, no. 1, 2007, pp. 1-8. (in Russian).
14. Mukhametgaleev D.M., Savdur S.N. [Elements of Thermodynamics, Chaos and Order. Synergetics]. Kazan, Kazan University, 2016, 79 p. (in Russian).
15. Nicolis, G., Prigogine, I. [Self-organizations in nonequilibrium systems]. Moscow, Mir, 1979, 512 p. (in Russian).
16. Ochkina, N.A., Zakharov, O.A. [Classical (Equilibrium) Thermodynamics. Non-Equilibrium Thermodynamics. Self-Organization of Nature]. Penza: PGUAS, – 111 p.
17. Postoev G.P. [Dissipative Structures in the Soil Massif: The Formation of Deep Landslides]. Engineering Geoecology, 2018, vol. XIII, no. 3, pp. 54 – 61. (in Russian).
18. Prigogine I., Condepudi D. [Modern Thermodynamics]. Moscow, Mir, 2002, 461 p. (in Russian).
19. Purtov, P. A. [Introduction to Nonequilibrium Chemical Thermodynamics]. Novosibirsk: NSU, 2000. – 97 p. (in Russian).
20. Razbegin, V.N., Vyalov, S.S., Maksimyak, R.V., Sadovsky, A.V. [Research of the Mechanical Properties of Frozen Soils]. Soil mechanics and foundation engineering. 1996, no. 2, pp. 2–8.
21. Revuzhenko, A.F., Stazhevskii, S.B., Shemyakin, E.I. [About the mechanism of deformation of loose material under large shear strains]. Journal of Mining Science, 1974. no. 3, pp. 130 – 133. (in Russian).
22. Revuzhenko, A.F. [Mechanics of a Bulk Medium: Some Fundamental Problems and Applications]. Journal of Mining Science, 2014, №5. P. 19 – 32. (jn Russian).
23. Sedov, L.I. [Continuum mechanics]. Vol. 1, Moscow, Nauka, 1970, 492 p. (in Russian).
24. Sokolovskii, V.V. [Bulk Medium Statics]. Moscow, State Publishing House of Physico-Mathematical Literature, 1960, 240 p. (in Russian).
25. [Handbook of Turbulence. Fundamentals and Applications]. Edited by Frost, W., Moulden, T.H. Moscow, Mir, 1980, 535 p. (in Russian).
26. [Textbook on the course "Soil mechanics"]. Petrakov, A.A., Yarkin, V.V., Taran, R.A., Kazachek T.V.; Ed. Petrakov A.A., Makeyevka, DonNASA, 2004. 164 p. (in Russian).
27. Tsitovich, N.A. [Soil Mechanics]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1983, 257 p. (in Russian).
28. Yebeling, W. [Structure Formation in Irreversible Processes]. Moscow, Mir, 1979, 279 p. (jn Russian).
29. Bottomley J.T. [Melting and regelation of ice]. Nature, vol.5, no. 114, 1872, pp. 185.
30. Drake L.D., Shreve R.L. [Pressure melting and regelation of ice by round wires]. Proc. Roy. Soc. London, A332, 51, 1973, pp. 51 ▤ 83.
31. Merzlyakov, V.P. [Hydraulics of Regelation Flows in the Frozen ground under load]. Composites: Mechanics, Computations, Applications, V.7, 2016, Issue 2, pp. 1 – 14.





С 2022 года журнал «ГеоИнфо» выходит в формате *PDF.
4 выпуска в 2026 году.

Контакты

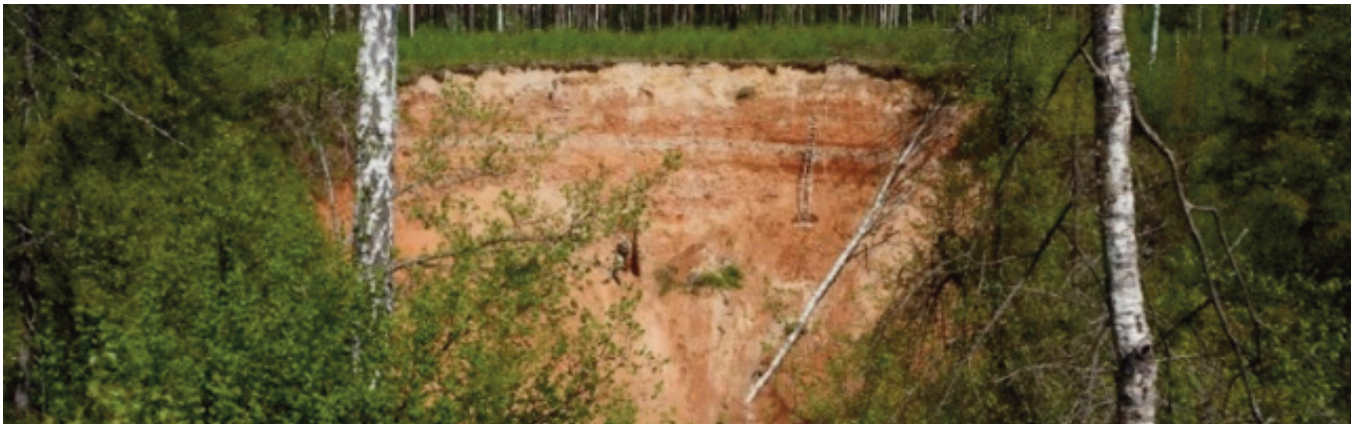
Адрес: 119146, Москва, ул. 3-я Фрунзенская, д.10, оф. 12

E-mail: info@geoinfo.ru

Тел.: +7 (499) 340-340-9, (916) 240-03-22

Главный редактор: Виктор Ананко

DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-54-76 УДК 551.435.8:004.9



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОПРОЯВЛЕНИЙ, ПОВЫШАЮЩИЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЦЕНКИ КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ НА УЧАСТКАХ ВДОЛЬ ТРАСС ПРОЕКТИРУЕМЫХ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Поступила 19.06.2026
Принята к публикации 15.07.2026
Опубликована 27.07.2026

ДРОБИНИНА Е.В.
Доцент кафедры динамической геологии и гидрогеологии, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории инженерно-экологических исследований геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ), к. г.-м. н., г. Пермь, Россия
alenadrobinina@yandex.ru

КИТАЕВА М.А.
Лаборант научно-исследовательской лаборатории инженерно-экологических исследований геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ); инженер-геолог Пермского филиала ООО «Противокарстовая и береговая защита», г. Пермь, Россия
kitaeva0822@yandex.ru

МИЗЁВ А.А.
Студент геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ), г. Пермь, Россия

РОМАНОВА Е.Р.
Младший научный сотрудник лаборатории экзогенной геодинамики и анализа геологического риска Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН; преподаватель и аспирант кафедры инженерных изысканий и геоэкологии Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ, г. Москва, Россия
romanova.elizaveta.r@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

В статье представлен комплексный подход к оценке карстовой опасности с использованием геоинформационных систем (ГИС) и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Этот подход позволяет быстро и достоверно оценивать карстовую опасность вдоль проектируемых линейных сооружений на примере Пивоваровского карстового участка во Владимирской области России. Существенным методическим вкладом в решение подобных задач является разработка специализированного инструмента на языке программирования Python для автоматизированного морфометрического анализа карстовых форм, включающего оценку их размеров и ориентации. Данный подход является эффективным решением частных вопросов оценки карстовой опасности, поскольку позволяет быстро обрабатывать большие объемы данных и получать высококачественные результаты, которые могут быть использованы при принятии проектных решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

геоинформационная система (ГИС); поверхностный карст; карстовая опасность; данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ); отрицательные карстовые формы рельефа; пространственный анализ.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Дробинина Е.В., Китаева М.А., Мизёв А.А., Романова Е.Р. Автоматизированный анализ поверхностных карстопроявлений, повышающий эффективность оценки карстовой опасности на участках вдоль трасс проектируемых линейных сооружений // Геоинфо. 2026. Т. 8. № 2. С. 54–76. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-54-76.

AUTOMATED ANALYSIS OF SURFACE KARST FEATURES TO ENHANCE KARST HAZARD ASSESSMENT WITHIN SEGMENTS ALONG THE ROUTES OF PROJECTED LINEAR FACILITIES

Received: 19.06.2026
Accepted for publication 15.07.2026
Published 27.07.2026

DROBININA E.V.
Associate professor at the Department of Dynamic Geology and Hydrogeology, research scientist at the Research Laboratory of Engineering and Ecological Investigations, Faculty of Geology, Perm State University, PhD (Geology and Mineralogy), Perm, Russian Federation
alenadrobinina@yandex.ru

KITAEVA M.A.
Research assistant, Research Laboratory of Engineering and Ecological Investigations, Faculty of Geology, Perm State University (PSU); engineering geologist, Perm Branch of "Karst and Shore Protection" LLC, Perm, Russian Federation
kitaeva0822@yandex.ru

MIZEV A.A.
Student, Faculty of Geology, Perm State University, Perm, Russian Federation

ROMANOVA E.R.
Junior Researcher, Laboratory of Exogenous Geodynamics and Geological Risk Analysis, Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS; lecturer and postgraduate student, Department of Engineering Surveys and Geoecology, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation
romanova.elizaveta.r@yandex.ru

ABSTRACT

The paper presents an integrated approach to karst hazard assessment using geoinformation systems (GIS) and Earth remote sensing (ERS) data. This approach enables rapid and reliable karst hazard assessment along designed linear infrastructure. It is demonstrated for the Pivovarovo karst area in the Vladimir Region, Russia. A significant methodological contribution to solving such problems is the development of a Python-based tool for the automated morphometric analysis of karst features, including the estimation of their sizes and orientation. The proposed approach is an efficient solution of particular issues of karst hazard assessment because it provides rapid processing of large datasets and high-quality results. These advantages can be used to support design decisions.

KEYWORDS:

geographic information system (GIS); surface karst; karst hazard; remote sensing data; negative karst landforms; spatial analysis.

FOR CITATION:

Drobinina E.V., Kitaeva M.A., Mizev A.A., Romanova E.R. Avtomatizirovannyi analiz poverkhnostnykh karstoproyavlenii, povyshayushchii effektivnost' otsenki karstovoi opasnosti na uchastkakh vdol' trass proektiruemykh lineinykh sooruzhenii [Automated analysis of surface karst features to enhance karst hazard assessment within segments along the routes of projected linear facilities] // Geoinfo. 2026. T. 8. № 2. S. 54–76. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-54-76 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Развитие опасных геологических процессов на осваиваемых территориях вызывает определенные сложности при проведении инженерных изысканий. На участках развития карста для обеспечения безопасности эксплуатации зданий и сооружений крайне важна точная оценка карстовой опасности.

Закарстованные массивы характеризуются широким распространением на их поверхности замкнутых понижений рельефа различного размера [1]. В зависимости от происхождения такие понижения классифицируются как карстовые воронки или провалы.

Карстовая воронка представляет собой замкнутое понижение рельефа в массиве карстующихся пород, нередко выполняющее роль дренажного канала, по которому дождевые и поверхностные воды устремляются вертикально вниз, питая карстовый водоносный горизонт, тогда как термин «карстовый провал» закреплен за обвальной формой, образующейся при обрушении свода подземной полости и вышележащей толщи [2].

Карстовые провалы часто возникают внезапно, что несет значительные экономические, экологические и социальные риски. Ключевая особенность карста заключается в том, что новые провалы появляются вблизи уже существующих, где условия для их образования уже сформировались. Та-

кая закономерность говорит о важности детального изучения поверхностного карста для прогнозирования карстовой опасности.

Сжатые сроки проведения инженерных изысканий часто приводят к неполному пониманию динамики карстового процесса в пределах той или иной площадки будущего строительства. Однако современные методы пространственного анализа с помощью геоинформационных систем (ГИС) в сочетании с доступными данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и широким набором инструментов анализа пространственных данных позволяют исследовать карстовые проявления весьма оперативно и исчерпывающе [3].

Потенциальные возможности ГИС и ДЗЗ выходят далеко за рамки изучения карста и находят важнейшее применение при оценке широкого спектра экологических рисков. Ярким примером этого является борьба с лесными пожарами, где данные технологии незаменимы для моделирования вероятности их возникновения. Как показало исследование охраняемых природных территорий округа Маюрбхандж в Индии, точно определять зоны соответствующего высокого риска позволяет комплексный подход с использованием многокритериальных моделей принятия решений (AHP/FAHP) и таких показателей, как тип растительности, климат, рельеф, буферные зоны дорог и исторические данные о пожарах, полученные со спутника MODIS [4].

Геопространственные технологии доказывают свою универсальность в самых разных сферах изучения окружающей среды. Например, при исследовании подземных вод в индийском штате Пенджаб с использованием данных за 26 лет было выявлено резкое падение уровня грунтовых вод с глубины 3,6 м до глубины 30,7 м, что позволило провести точное зонирование территорий по риску засухи [5].

При моделировании оползневой опасности стандартной практикой сегодня считается использование передовых методов статистики и машинного обучения, включая метод соотношения частот, применение логистической регрессии и искусственных нейронных сетей (Artificial Neural Networks). Для эффективного выявления зон высокого оползневого риска на основе таких критических факторов, как геологическое строение, крутизна и экспозиция склона, в этих методах используется геопространственная информация, в том числе цифровые модели рельефа, результаты изучения литологических особенностей и данные по землепользованию [6].

Это иллюстрирует пример оценки оползневого риска в индийских округах Лахул и Спити с применением нескольких моделей машинного обучения [7]. В данном случае наиболее эффективным оказался алгоритм «случайный лес» (Random Forest), показатель качества предсказаний которого AUC (площадь под кривой ошибок, то есть ROC-кривой) составил 0,954. Были выявлены зоны высокого риска, обусловленные преимущественно крутизной склонов и близостью к рекам, что обеспечило получение критически важных данных для защиты инфраструктуры.

Еще одно исследование оползневой опасности в долине Спити в Индии [8–10] показало, что передовые методы машинного обучения и новые методики составления обучающей выборки (путем выделения безопасных точек в буферных зонах и с учетом крутизны склонов – Buffer Zone Safe Points, Slope Buffer Safe Points соответственно) позволяют повысить точность картирования оползневой опасности и надежность прогнозов в зонах высокого риска. Были построены детальные карты зонирования территорий по оползневой опасности с помощью трех современных методов машинного обучения с целью всестороннего сравнения прогностической способности соответствующих моделей. Использовались такие алгоритмы, как экстремальный градиентный бустинг (XGBoost), «случайный лес» (RF) и *K* ближайших соседей (KNN).

Следующий примечательный пример – картирование оползневой опасности в Гималаях [11], где модели соотношения частот (Frequency Ratio) и оценки ценности информации (Information Value) обеспечили высокую прогностическую точность (AUC≈0,84). Исследование, результаты которого были верифицированы на основе данных по более чем 1000 оползневых событий, позволило успешно разделить изучаемую территорию на пять зон, характеризующихся различными категориями риска. Это продемонстрировало практическую ценность геопространственного анализа для защиты инфраструктуры и обеспечения готовности к стихийным бедствиям в горных районах.

В качестве еще одного яркого примера универсальной применимости технологий цифрового анализа геопространственных данных можно привести управление качеством городского атмосферного воздуха. В исследовании, проведенном в городе Дели в 2018–2023 годах [12], использовалась интерполяция методом кригинга в среде ГИС и статистический анализ для моделирования пространственно-временной динамики изменений концентрации основных загрязняющих веществ. Это позволило эффективно количественно оценить резкое снижение их содержания в воздухе во время локдауна, введенного из-за пандемии коронавирусной инфекции (COVID-19). Такой подход позволил с высокой точностью визуализировать распределение загрязнений, что напрямую связало источники выбросов с их влиянием на качество воздуха и заложило доказательную базу для разработки политики в сфере охраны здоровья населения. Эффективность применения этой методики в условиях сложной городской среды подчеркивает важнейшую закономерность: интеграция ме-

тодов пространственной интерполяции, анализа временных рядов и статистической валидации в среде ГИС позволяет создать мощную универсальную модель для экологического мониторинга.

Таким образом, современные геопространственные технологии выступают в роли единого и незаменимого инструмента оценки природных рисков, обеспечивая основу для устойчивого планирования территорий. Вместе с тем нельзя механически переносить алгоритмы анализа, отработанные для пожаров, оползней или атмосферных выбросов, на изучение карстового процесса. Карст относится к категории скрытых геологических процессов, а его поверхностные проявления не являются строго специфичными: не всякое проседание земной поверхности свидетельствует о карстообразовании, что диктует необходимость применения специализированных, а не универсальных алгоритмов дешифрирования.

Настоящая статья посвящена важным аспектам совершенствования исследований поверхностных форм карста на территориях проектируемого строительства линейных сооружений. Основная цель данной работы – автоматизация анализа карстопроявлений для повышения точности оценки карстовой опасности и риска и для оптимизации времени их выполнения. Авторами решается задача применения данных ДЗЗ и современных инструментов пространственного анализа, включая автоматизированные процедуры в среде ГИС, разработанные на языке программирования Python, что позволяет повысить качество и эффективность карстологических исследований. Такой комплексный подход позволяет быстро и точно проводить анализ проявлений карста, выполнять морфометрические измерения карстовых форм и соответствующее зонирование территорий. Это может послужить основой для стратегического планирования и снижения рисков при реализации проектов строительства на карстоопасных территориях.

Представленное исследование сосредоточено на так называемом Пивоваровском карстовом участке во Владимирской области России. Данная территория отличается значительным развитием отрицательных карстовых форм рельефа. Эти проявления в свое время были тщательно задокументированы в ходе полевых исследований. Такая предварительная валидация позволила выполнить надежную оценку эффективности предлагаемой методики, дав возможность напрямую сравнить результаты цифрового анализа данных с результатами полевых измерений.

ВЫЯВЛЕНИЕ И КАРТИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОПРОЯВЛЕНИЙ

Традиционная методика оценки поверхностного карста обычно включает выявление и картирование карстовых форм по спутниковым изображениям с последующим составлением их подробного каталога. Такой каталог содержит параметры каждой соответствующей формы рельефа, включая ее пространственное положение, размеры (длину, ширину, площадь, радиус, глубину), временные изменения (при наличии данных мониторинга), дату образования (если она известна) и другие показатели, важные для целей исследования. Картирование и оцифровка информации о карстовых формах по панхроматическим (черно-белым) и мультиспектральным (цветным) космическим снимкам до сих пор выполняются преимущественно вручную [13].

Для обнаружения карстовых форм устоявшейся практикой является использование данных дистанционного зондирования Земли. Например, в одной из работ [14] был составлен каталог поверхностных карстопроявлений на основе данных ДЗЗ для территории площадью более 5 млн га. В ходе этого исследования на участке Центрально-Анатолийского плоскогорья в Турции было обнаружено 398 потенциальных форм поверхностного карста. Процесс их выявления включал использование спутниковых изображений высокого разрешения, аэрофотоснимков и цифровой модели рельефа (ЦМР). Еще 100 карстовых форм были задокументированы на основе архивных материалов и опубликованной литературы. Расположение и геометрия этих форм были впоследствии верифицированы с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (GPS) и электронных тахеометров, что позволило подтвердить наличие на исследуемой территории 283 карстовых форм. Весьма ценным дополнением к методике исследования стала разработка специального приложения для подтверждения наличия и параметров карстовых форм, выявленных по космическим снимкам, в полевых условиях.

Применение данных ДЗЗ при исследованиях карста уже давно вышло за рамки классического анализа спутниковых изображений. В настоящее время для выявления локальных понижений повсеместно применяют цифровые модели рельефа, что позволяет осуществлять полуавтоматизированное дешифрирование спутниковых снимков в среде ГИС. Использование ЦМР оказалось особенно ценным при изучении закарстованных территорий, где подземные и поверхностные воды тесно связаны между собой в силу особых гидрологических и геоморфологических условий. Исследование этой взаимосвязи было положено в основу создания карт уязвимости водоносных горизонтов ЦМР и изучения закономерностей распространения поверхностного карста. Кроме того, цифровые модели рельефа предоставляют критически важные данные для гидрологического моделирования поверхностного стока и питания подземных вод [15], выделения зон санитарной охраны скважин и родников [17], а также для моделирования путей миграции загрязнений [18, 19]. Важным методологическим достижением стала корректировка ЦМР

с учетом гидрологических условий, что позволяет исследователям выявлять отрицательные замкнутые округлые формы рельефа, а именно бессточные понижения, возникшие в результате развития карстового процесса [19–21].

На основе этих результатов рядом авторов были предложены полуавтоматизированные методы обнаружения карстовых форм с использованием цифровых моделей рельефа, полученных с помощью съемки интерферометрическими радиолокаторами с синтезированной апертурой (InSAR, или IFSAR). Такие подходы, как правило, задействуют в том числе методы гидрологического моделирования (алгоритмы выделения водосборных бассейнов и заполнения локальных понижений) для выявления замкнутых впадин и измерения глубины отрицательных карстовых форм рельефа. Затем обнаруженные локальные понижения классифицируют и подтверждают с использованием дополнительных источников информации, таких как гиперспектральные снимки, представленные на сервисе Google Earth Engine, и современные ЦМР [22].

В последние годы наметился значительный прогресс в разработке методов автоматизированного обнаружения различных типов карстовых форм с использованием множества видов цифровых моделей рельефа. Результаты исследований показывают, что для автоматизированного выявления карстовых воронок и провалов особенно эффективно использование данных воздушного лазерного сканирования (полученных с помощью лидара, LiDAR) благодаря высокому пространственному разрешению такой съемки и ее способности проникать сквозь растительный покров [22–25].

Для оптимизации процесса ручной оцифровки (векторизации) замкнутых понижений рельефа по ЦМР зарубежные исследователи применили метод визуализации RRIM (Red Relief Image Map – метод «красного» изображения рельефа на карте). Интеграция трех топографических параметров – крутизны склонов, положительной и отрицательной открытости рельефа – позволяет отчетливо выделять локальные повышения и локальные понижения соответственно. Исходные данные, предоставленные Главным картографическим управлением Турции, включали в себя аэрофотоснимки, спутниковые изображения, топографическую карту с шагом горизонталей 10 м и ЦМР с пространственным разрешением 5 м. Слои положительной и отрицательной открытости рельефа были обработаны в ГИС SAGA и затем использованы для расчета индекса «гребней и тальвегов» (RVI – Ridge and Valley Index). Конечный продукт визуализации методом RRIM был сформирован путем совмещения величин этого индекса с данными о крутизне склонов, при этом выпуклые и вогнутые элементы рельефа отображаются как локальные повышения и понижения соответственно. Данная методика существенно облегчает ручное выявление карстовых форм за счет цветового отображения склонов и четкого выделения границ этих форм [26].

Аналогичный подход был применен к цифровым моделям рельефа на основе воздушного лазерного сканирования (LiDAR) в Австрии [27]. Несмотря на то что основное внимание уделялось визуализации ЦМР для картирования археологических объектов, в работе [27] подчеркивается эффективность использования этого подхода для разграничения элементов рельефа, в том числе локальных повышений и понижений.

В дополнение к ручной оцифровке отрицательных карстовых форм рельефа, выделение таких проявлений можно улучшить с помощью косвенных показателей. Например, доказана эффективность использования спектральных вегетационных индексов, особенно при учете характерного кустарникового покрова, который обычно встречается на склонах и на дне карстопроявлений [28].

Полученный набор карстовых форм используется в качестве основы для проведения различных видов пространственного анализа, в том числе зонирования территорий на основе плотности распределения этих форм на единицу площади, а также построения гистограмм распределения их диаметров или показателей окружающей среды вблизи карстовых форм. Указанные виды анализа имеют решающее значение для разработки и проверки достоверности прогнозных карстологических моделей [29, 30]. Подходящим примером здесь является создание карты карстовой опасности на основе данных о подземном карсте в сочетании с мощностью и литологическим составом грунтов, перекрывающих закарстованные породы [31]. Исследуемая территория была разделена на участки по трем классам опасности. Последующая валидация этих результатов по известным местам расположения карстовых форм показала их отсутствие на участках с низким классом карстовой опасности, что подтвердило точность критериев выполненного зонирования.

Таким образом, практическая польза картирования форм поверхностного карста заключается в его двойной эффективности – как для оценки карстовой опасности, так и для зонирования территорий по условиям окружающей среды (с выделением наиболее благоприятных для развития карста). Изучение поверхностной закарстованности заслуживает особого внимания в том числе и потому, что карстовые формы часто служат прямыми каналами для проникновения загрязняющих веществ в подземные водоносные горизонты [19].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ КАРСТОВЫХ ФОРМ

Измерение размеров карстовых форм рельефа может выполняться с помощью различных методик, включая ручные, полуавтоматизированные и автоматизированные.

Ручной метод

Популярные картографические сервисы, такие как «Яндекс Карты», 2GIS и Google Maps, предоставляют доступ к спутниковым снимкам высокого разрешения со встроенными инструментами для измерения расстояний на поверхности. Было установлено, что эти платформы подходят для предварительного анализа карстовых форм рельефа, позволяя определять их горизонтальные размеры, взаимное расположение и удаленность от интересующих объектов. Данные инструменты имеют два основных преимущества: во-первых, доступ к ним возможен без необходимости установки дополнительного программного обеспечения, а во-вторых, они совместимы с мобильными устройствами. Однако они не лишены и недостатков, среди которых отсутствие встроенных таблиц для сохранения результатов, невозможность проведения статистического анализа и непрактичность при измерениях в пределах больших площадей. Но, например, сервис Google Earth Pro предлагает расширенные функциональные возможности, позволяя просматривать изображения с высоким разрешением, вручную выделять карстовые формы и сохранять результаты оцифровки в векторных форматах (например, в KMZ) для последующего определения размеров в ГИС.

Полуавтоматизированный метод

В данный подход входит поэтапное использование стандартного программного обеспечения (ПО) геоинформационных систем (например, QGIS, ArcMap, NextGIS) для создания, редактирования и визуализации геопространственной информации. Это ПО предоставляет широкие инструменты для обработки как векторных, так и растровых данных.

Рассматриваемый метод включает в себя построение минимальной ограничивающей геометрической фигуры, длинная ось (длина) которой соответствует максимальному диаметру карстопроявления, а короткая ось (ширина) – минимальному. Это обычно прямоугольник со вписанной в него фигурой круглой (округлой) или эллиптической (эллипсовидной, овальной) формы, отражающей очертания карстовой формы. Хотя этот метод эффективен для быстрого измерения размеров множества локальных понижений, ему не хватает высокой точности, поскольку ориентация минимального ограничивающего прямоугольника может не совпадать с главной осью карстопроявления, особенно если оно неправильной формы. Тем не менее направление средней линии такого прямоугольника может служить индикатором пространственной ориентации впадины. Рассматриваемый метод успешно устраняет ограничения ручного подхода. Он эффективно применялся, например, при измерении размеров замкнутых понижений рельефа различного происхождения на равнине Арагуая в Бразилии [32].

Автоматизированный метод

В среде ГИС ряд аналитических этапов можно объединить в цепочку команд с помощью конструктора моделей (Model Builder), что позволит полностью выполнять их с различными входными наборами данных. Независимо от сложности или количества этапов, такая модель будет функционировать как единый алгоритм, что сэкономит время и усилия, сведя к минимуму ошибки, возникающие из-за периодического вмешательства человека. Следовательно, поэтапное построение ограничивающих геометрических фигур и расчеты параметров можно объединить в один инструмент. От пользователя потребуется лишь предоставить входные векторные данные по карстовым формам, а взамен он получит выходные данные со значениями диаметров для ограничивающих фигур круглой формы или с величинами большой и малой осей для фигур эллиптической формы. Рассматриваемый процесс предназначен для оптимизации всей процедуры измерений в целом.

ИССЛЕДУЕМАЯ ТЕРРИТОРИЯ

Представленное в данной статье исследование было сосредоточено на Пивоваровском карстовом участке, расположенном во Владимирской области России. Несмотря на значительную глубину залегания кровли карстующихся пород, карстовый процесс на этом участке активен и сопровождается образованием на поверхности отрицательных форм рельефа различных размеров.

Изучаемая территория характеризуется карстом покрытого сульфатно-карбонатного типа.

Один из самых крупных задокументированных карстовых провалов возник на этой территории в 1959 году на северо-восточной стороне древнего карстопроявления. Первоначальный диаметр провала составлял 18 м (рис. 1). С тех пор он увеличился до 75 м, а глубина образования достигла 22 м [33]. Активизация карстового процесса на периферии указанной древней формы наблюдалась также в 2016 году (рис. 2).

В ноябре 2015 года примерно в 1,5 км к северо-западу от вышеописанных форм образовался еще один провал, который увеличился в 2016 году (рис. 3). Его размеры в плане составляют 18,0×22,4 м, а глубина – 20 м. Он имеет крутые бесточные склоны, на которых обнажаются глины уржумского яруса биармийского отдела пермской системы.

Исследуемая территория расположена в малонаселенной местности, поэтому широкое распространение в ее пределах форм поверхностного карста сопряжено с ограниченными социальными или экономическими рисками. Тем не менее эти карстопроявления создают значительные трудности для дальнейшего экономического развития района. Например, возникает необходимость прокладывания трасс линейных сооружений в обход карстовых зон.

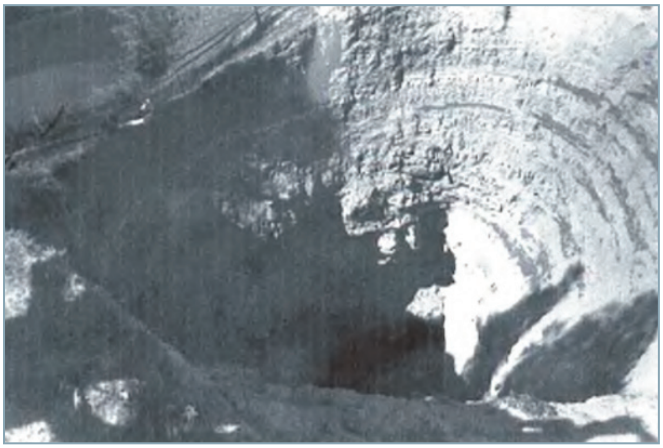


Рис. 1. Архивное изображение карстового провала, возникшего в 1959 году на северо-восточной стороне древнего карстопроявления [33]



Рис. 2. Провал, возникший в 2016 году в результате активизации карстовых процессов на периферии древнего карстопроявления

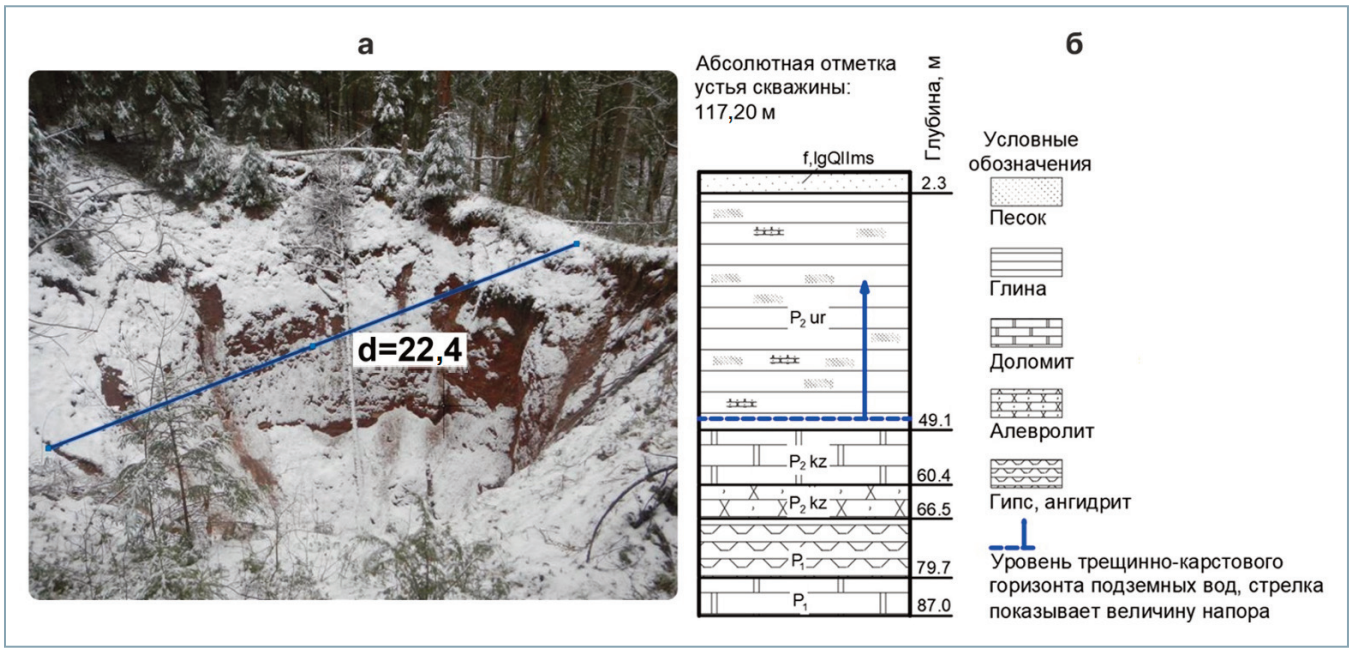


Рис. 3. Карстовый провал, зафиксированный в 2015 году (а) и типичный геологический разрез участка (б)

В структурно-тектоническом отношении исследуемая территория расположена в пределах Окско-Цнинского вала, относящегося к тектоническим структурам четвертого порядка и характеризующегося слабоволнистым рельефом. Коренные породы вала перекрыты ледниковыми отложениями днепровского оледенения, которые впоследствии были модифицированы денудационными процессами, связанными с деятельностью реки Суворощь и ее притоков, в том числе реки Суходол.

Коренные породы представлены слоями гипса, ангидрита, известняка и доломита пермской системы с прослоями глин и алевролитов, падающими в северо-восточном направлении. Эти отложения распространены повсеместно. Растворимые породы перекрыты четвертичными отложениями преимущественно флювиогляциального, ледникового и аллювиального происхождения, реже болотного генезиса (в последнем случае это главным образом слои песков, суглинков и торфов) (рис. 3). В северо-восточной части участка в разрезе под четвертичным покровом отмечаются терригенные триасовые образования.

Карстовый процесс в данном районе развит в пермских сульфатных отложениях. Наиболее распространены карстово-обвальные воронки и провалы, образующиеся при внезапном гравитационном обрушении перекрывающих пород в пустоты в гипсах. Реже встречаются оседания и суффозионные воронки. Такое заключение о генетических типах форм основано на анализе геологического разреза, а также морфологии и размера выявленных отрицательных форм рельефа.

Морфометрический и морфологический анализ позволил выявить различия характеристик карстопроявлений в зави-

симости от их типа и условного возраста, определенного по комплексу вторичных признаков: степени задернованности бортов, характеру их крутизны, а также наличию или отсутствию следов недавней активизации (осыпей, обнажений коренных пород, трещин). Древние карстово-обвальные воронки имеют диаметр от 5,1 до 97,4 м (в среднем 25,5 м) при глубине 1–15 м, тогда как диаметр молодых воронок составляет 2,5–61,5 м (в среднем 18,9 м) при глубине 0,5–20 м. Как можно заметить, межгрупповые различия выражены не столь контрастно, что объясняется особенностями состава перекрывающих отложений: преобладание в их разрезе глинистых слоев обеспечивает устойчивость бортов воронок. Вследствие этого древние формы сохраняют сравнительно четкие очертания и незначительно увеличиваются в размерах, что сближает их по параметрам с молодыми образованиями.

Оседания характеризуются меньшими размерами: диаметр древних форм варьирует от 2,5 до 60,1 м (в среднем составляя 14,2 м) при глубине 0,2–4,5 м; диаметр молодых форм попадает в диапазон 2,5–12 м (в среднем составляя 4,6 м) при глубине 0,5–3 м. Суффозионные воронки представляют собой замкнутые понижения диаметром от полуметра до нескольких метров.

Окончательное установление природы всех типов карстовых форм возможно лишь при проведении выборочных инструментальных исследований. Для этого рекомендуется заложить серию раскопов и буровых скважин непосредственно на участках развития провалов и воронок. Выбор точек исследования должен быть репрезентативным и охватывать основные морфологические разновидности форм. Такой подход позволит значительно повысить достоверность прогнозов и обеспечит наличие надежной доказательной базы.

Векторный набор данных о карстопроявлениях был составлен на основе различных источников. Выявлению и картированию данных форм способствовало использование спутниковых снимков высокого разрешения, дополненное анализом мультиспектральных данных. Полезным инструментом для обнаружения косвенных показателей распределения этих объектов послужили спектральные индексы. Набор геоданных был расширен за счет включения архивных материалов и результатов полевых карстологических исследований.

ОЦЕНКА ПОВЕРХНОСТНОГО КАРСТА

Основы количественной оценки карста были заложены в 1980-х годах, когда В.В. Толмачев предложил статистический метод оценки карстового риска при инженерных изысканиях для строительства. В данном подходе используется закон распределения Пуассона для расчета вероятности образования определенного количества карстовых провалов за фиксированный промежуток времени. В его основе лежит допущение, что такие события происходят с известной постоянной частотой и независимо друг от друга. Ключевым параметром в этой модели является интенсивность провалообразования, которая определяет количество карстовых провалов и воронок на единицу площади, возникших за 100 лет. В.В. Толмачев подчеркивал, что при использовании данного статистического метода необходимо учитывать срок службы инженерных сооружений [34, 35]. Общепринятый срок службы таких объектов – 100 лет. При этом следует учитывать, что корректность расчетов по данной методике ограничена рядом жестких условий, таких как отсутствие техногенного влияния, длительный мониторинг (свыше 20 лет), достаточная площадь распространения воронок (не менее 5 км^2), однородность инженерно-геологических условий исследуемой территории, единый механизм процесса провалообразования. Соблюдение этих условий на практике пока встречается крайне редко.

С.Г. Гордиенко и Ю.Ю. Савельева усовершенствовали этот подход, использовав результаты долговременного мониторинга [36]. З.В. Селина и Т.Г. Ковалева применили данный метод для прогнозирования вероятности образования карстовых провалов [37].

Количественная оценка карстовой опасности обычно основана на таких показателях, как плотность распределения карстовых воронок и провалов и коэффициент поверхностной закарстованности территории [38]. Расчет этих параметров, необходимых для проектирования, требует точных данных о количестве и размерах карстовых форм в пределах исследуемого участка.

Наиболее простым методом визуализации пространственного распределения карстовых форм является создание карты плотности, отражающей их количество на единицу площади. В процессе исследования, представленного в данной статье, такая карта была построена с использованием инструмента «плотность ядер» (Kernel Density) в программе ArcMap 10 (рис. 4). Данным методом, который в литературе иногда классифицируют как полуколичественный (или гибридный) [39], рассчитывается плотность точек для каждой ячейки выходного растра в пределах заданного радиуса поиска (фактически реализуется алгоритм скользящего окна). Альтернативная методика включает наложение сетки заданного размера на исследуемый участок, подсчет количества карстопроявлений в каждой ячейке сетки, интерполяцию данных между центроидами ячеек и их нормализацию по площади каждой ячейки с получением непрерывной карты распределения плотности карстовых форм.

Два типа зонирования территории проектируемого строительства линейного сооружения и их автоматизация

Зонирование территорий проектируемого строительства линейных сооружений в карстовых районах можно разделить

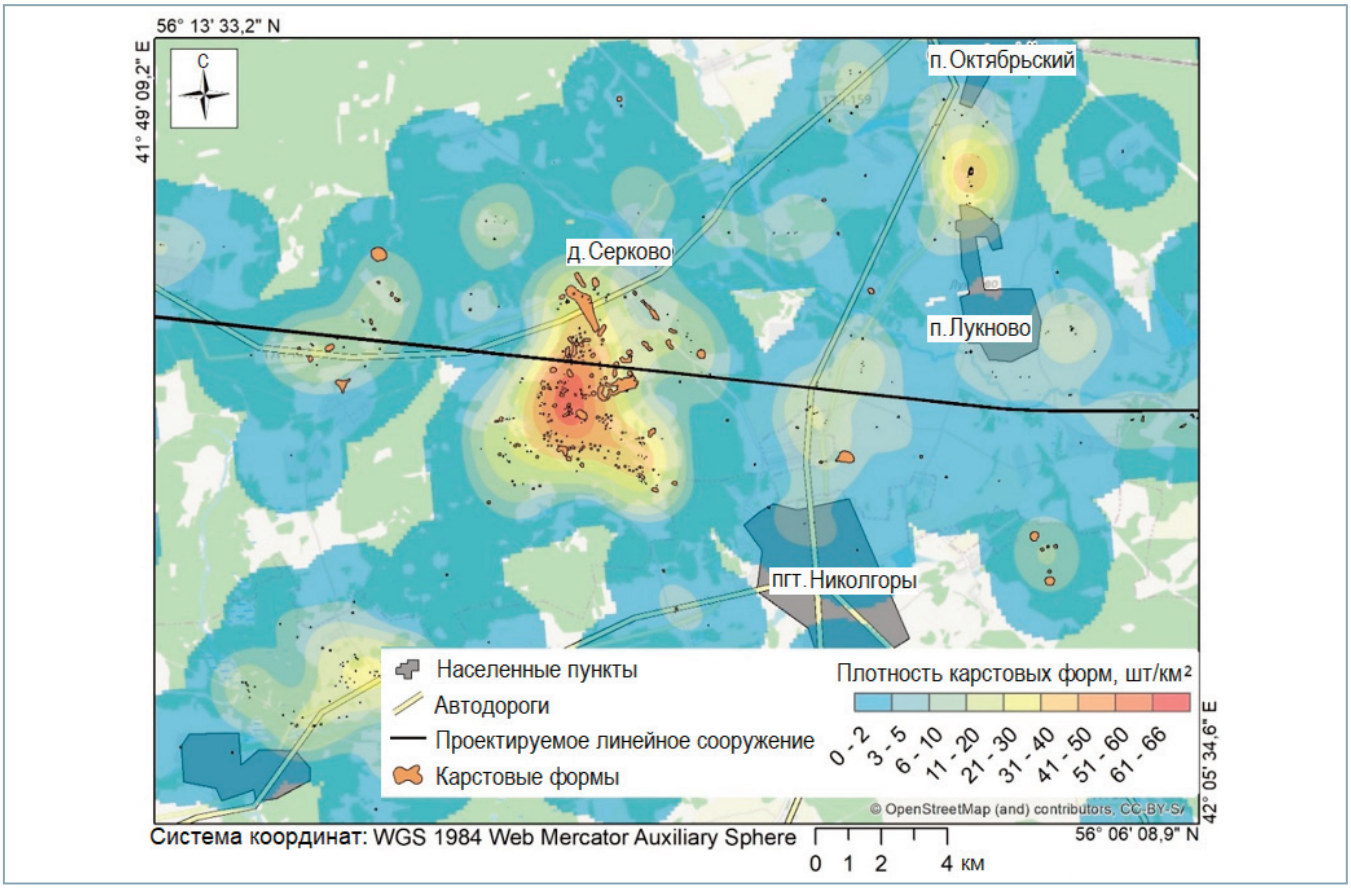


Рис. 4. Карта плотности распределения карстовых форм

на два основных типа. Первый основан на пространственной связи между инженерным объектом и существующими карстовыми формами и носит название «автоматизированное зонирование по степени близости к карстовым формам».

Второй тип связан с условиями окружающей среды, влияющими на развитие карстового процесса на исследуемой территории. Он позволяет выделять условно однородные участки, где карстовая активность проявляется равномерно и формы карста образуются по схожим механизмам. В пределах таких участков значимые природные факторы (состав и мощность перекрывающих отложений, глубина залегания карстующихся пород, гидрогеологический режим, рельеф) остаются практически неизменными, а следовательно, механизм провалообразования будет единым. Этот подход носит название «автоматизированное зонирование на основе условий окружающей среды».

Автоматизированное зонирование по степени близости к карстовым формам

Анализ исторических данных указывает на тенденцию к группированию отрицательных карстовых форм рельефа на определенных участках, называемых карстовыми полями. Кроме того, было показано, что плотность распределения новых карстопроявлений снижается с увеличением расстояния от ранее возникших форм [40]. Этот принцип использовался российскими учеными для прогнозирования карстовой опасности на территориях, прилегающих к известным проявлениям [41], и в свое время был включен в нормативные документы [42].

Такая оценка на основе расстояния выполняется с использованием буферных зон заданных размеров, строящихся от краев или центроидов карстовых форм. Радиусы буферных зон обычно устанавливаются кратными шагу сетки пространственного анализа, определяемому масштабом картирования.

В данном исследовании использовался специализированный ГИС-инструмент, разработанный в программе ArcMap 10 для зонирования территорий вдоль проектируемых линейных сооружений на основе рассматриваемой методики оценки по удаленности карстопроявлений. Этот инструмент применяется для построения буферных зон от краев карстовых форм, что позволяет соответствующим образом зонировать коридор будущего линейного объекта. Результатом является выделение участков трассы различных категорий, характеризующихся разной степенью карстовой опасности (рис. 5).

Категории участков по степени карстовой опасности были приняты в соответствии с классическими рекомендациями Саваренского [40]. К первой категории относятся участки,

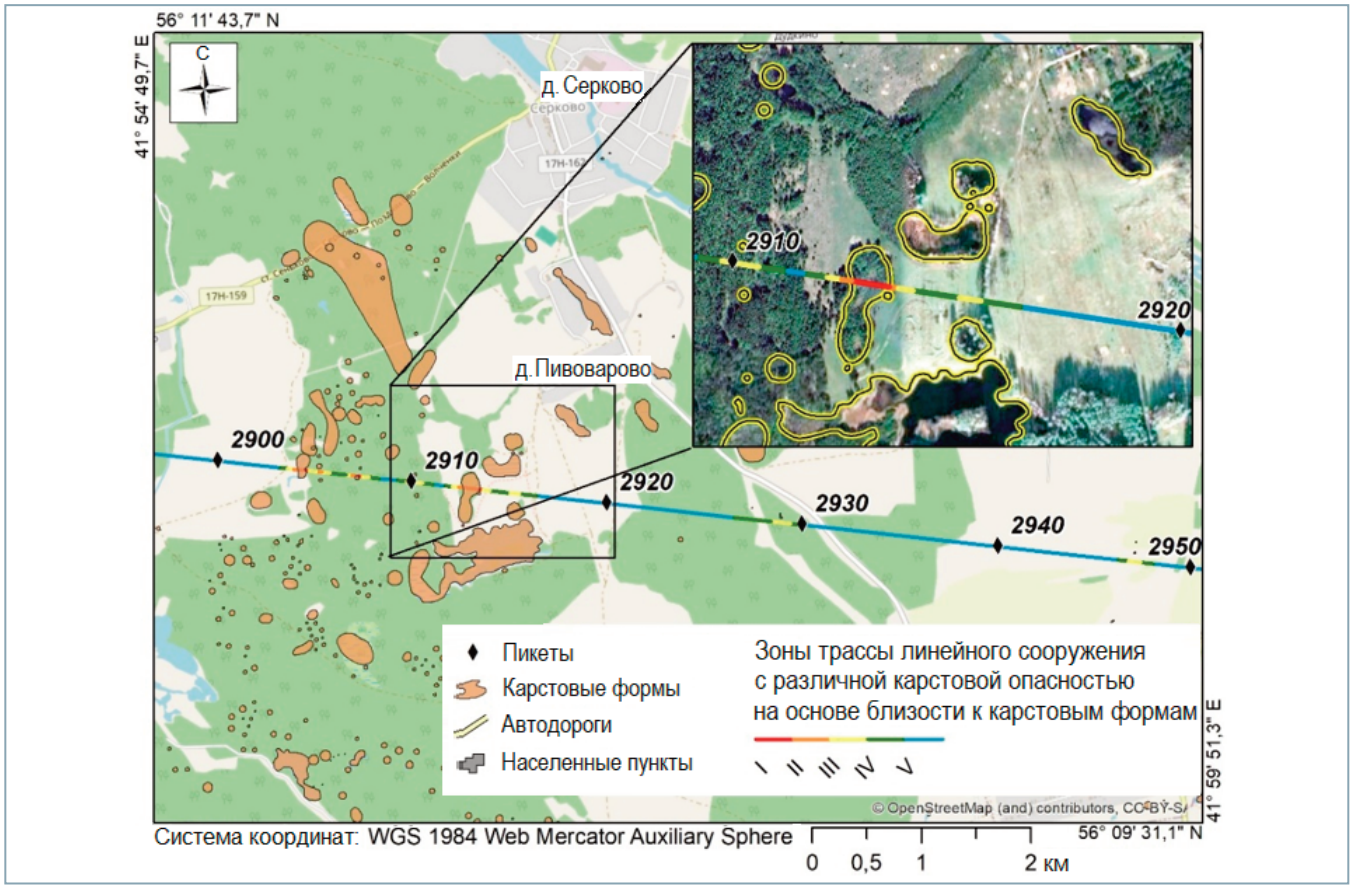


Рис. 5. Карта зонирования трассы проектируемого линейного сооружения по степени близости к карстовым формам

Таблица 1. Распределение участков трассы линейного сооружения по категориям на основе степени удаленности от карстовых проявлений

Категория карстовой опасности	Описание категории	Общая длина участков трассы соответствующей категории, м
I	Участок трассы непосредственно пересекает карстовую форму	354,8
II	Участок трассы находится на расстоянии 0–20 м от карстовой формы	206,2
III	Участок трассы находится на расстоянии 20–50 м от карстовой формы	677,5
IV	Участок трассы находится на расстоянии 50–100 м от карстовой формы	1647,7
V	Участок трассы находится на расстоянии 100 м и более от карстовой формы	169377,5

на которых трасса проектируемого сооружения непосредственно пересекает формы поверхностного карста. Вторая категория охватывает зоны на расстояниях 0–20 м от карстопроявлений, что соответствует минимальному диаметру форм самой высокой опасности [42]. Третья категория – на расстояниях от 20 до 50 м. Четвертая – от 50 до 100 м. Пятая – 100 м и более (см. рис. 5).

Применение рассматриваемого метода зонирования показало, что преобладающая часть проектируемой трассы попадает в пятую категорию с относительно низкой предрасположенностью к образованию новых карстовых форм. А зоны, относящиеся к категориям с четвертой по вторую, характеризуются значительно более высокой опасностью, о чем свидетельствует частое появление новых форм в пределах карстовых полей или в непосредственной близости от них (это объясняется благоприятными условиями для карстообразования в данных зонах: существующие карстовые формы облегчают доступ поверхностных вод к карстующимся породам, еще сильнее активизируя развитие карста).

Разделение трассы линейного сооружения на участки по всем этим категориям подробно представлено в таблице 1.

Совместное использование пространственного анализа и средств автоматизации позволяет оперативно выполнять зонирование территорий по карстовой опасности, сводя к минимуму

ошибки, характерные для ручных методов. Кроме того, дешифрирование данных ДЗЗ или анализ архивных материалов на этапе проектирования дают возможность провести предварительную оценку карстовой опасности, что имеет решающее значение для возможного внесения изменений в проект.

Для повышения достоверности и практической значимости результатов зонирования целесообразно дополнить пространственный анализ установлением количественных закономерностей между плотностью распространения воронок и конкретными типами инженерно-геологических условий. Особого внимания также заслуживает анализ пространственной приуроченности карстовых форм к источникам техногенного воздействия, в первую очередь к действующим водозаборам, вблизи которых изменение режима подземных вод может служить триггером активизации карстово-обвального процесса. Выявление подобных корреляций позволит перейти от констатации опасности к прогнозированию участков потенциальной активизации с учетом конкретных геологических и техногенных факторов.

Автоматизированное зонирование на основе условий окружающей среды

Обязательное условие для крупных проектов линейных сооружений – точная и полная оценка карстовой опасности с учетом естественной неоднородности карстовых массивов.

Выделение относительно однородных зон основывается на условиях окружающей среды, где ключевыми факторами, влияющими на развитие карста, являются геоморфологические особенности и геологическое строение [43]. Такой подход позволяет однозначно определить преобладающие механизмы образования карстовых форм в пределах каждой выделенной зоны.

Успешный опыт зонирования территорий по карстовой опасности на основе факторов окружающей среды отмечен многими учеными. В качестве примера можно привести использование алгоритмов машинного обучения для построения карты карстовой опасности северной части китайской провинции Гуанси (ныне Гуанси-Чжуанского автономного района) с учетом множества геоморфологических и геологических факторов [44]. Аналогичным образом с помощью метода анализа иерархий и метода оценки интегрального показателя (AHP-CIM) была разработана карта опасности для города Ухань с учетом характеристик карста, свойств грунтов, перекрывающих закарстованные породы, и гидродинамических условий [45]. Схожие методические подходы эффективно применяются и при оценке других геологических опасностей, например оползневой, когда пространственное распределение предрасположенности к оползням определяется особым сочетанием природных факторов [46].

Концептуальная основа разработанной авторами методики карстологического зонирования опирается на теоретические положения инженерно-геологического районирования, сформировавшиеся в России в середине XX века. Общепринятая классификация выделяет три типа районирования: региональное, типологическое и смешанное. Концепция *регионального* районирования предполагает использование иерархических таксономических единиц, которые подразделяются на регионы, районы и участки. Эти единицы выделяются по структурно-тектоническим критериям и характеризуются однородностью геологического строения и интенсивностью развития экзогенных процессов соответственно [47]. В основе *типологического* районирования лежит выделение характерных условий по преобладающим инженерно-геологическим особенностям. *Смешанное* районирование сочетает в себе элементы обоих подходов [48].

Классификация закарстованных территорий представляет собой особый тип геологического зонирования, который выходит за рамки традиционных классификационных схем. Исследование, представленное в настоящей статье, в наибольшей степени опиралось на сравнительно-оценочный подход, но при этом сочетало в себе элементы как регионального, так и типологического зонирования. Это особое направление специально адаптировано для определения степени карстовой опасности [49].

Авторами было выполнено многофакторное зонирование с учетом:

- структурно-тектонического плана и неотектонических факторов (плотности распределения линеаментов и узлов их пересечения, рассматриваемых в качестве индикаторов зон повышенной трещиноватости грунтов [50]);
- геологического строения, включая глубину залегания карстующихся пород, а также литологический состав этих пород и перекрывающих их отложений;
- геоморфологических условий, характеризующихся приуроченностью к особым элементам рельефа.

В соответствии с изложенными выше методическими принципами было выполнено последовательное иерархическое зонирование исследуемой территории в ArcMap 10 – приложении в составе пакета геоинформационных программ Esri ArcGIS. Принятая система классификации имела три уровня:

- *регион* (выделяемый на основе структурно-тектонического плана территории и неотектонических факторов);
- *район* (на основе геологического строения);
- *участок* (на основе геоморфологических условий).

Такая многоуровневая система зонирования позволила выполнить комплексную оценку карстовой опасности в различных пространственных масштабах, сохранив при этом со-

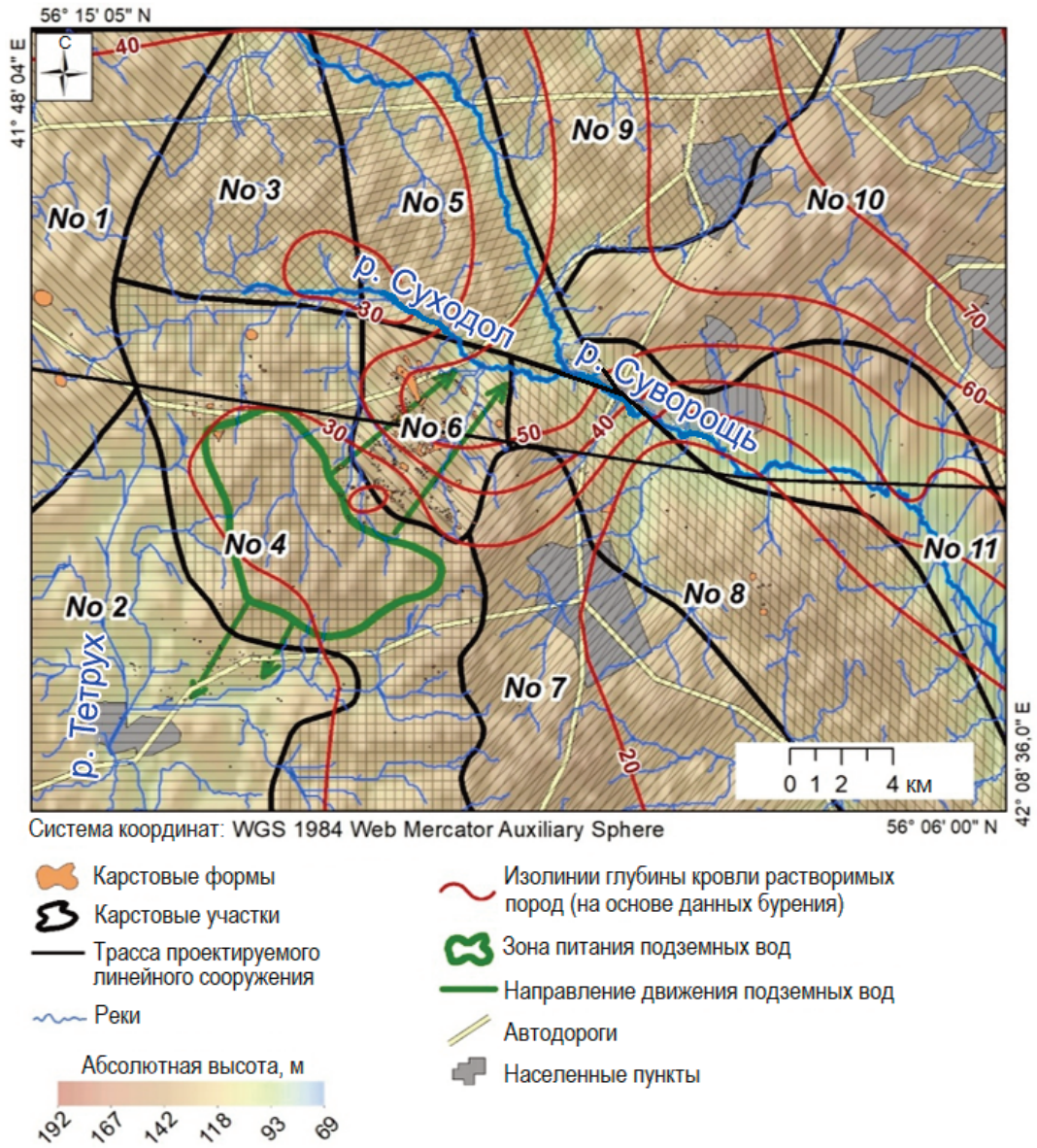


Рис. 6. Карта пространственного распределения квазиоднородных карстовых участков и условий окружающей среды

гласованность с теоретическими основами инженерно-геологического районирования, при условии предварительного подтверждения карстового генезиса воронок и их локализации в пределах развития карстующихся толщ.

При этом факторы окружающей среды применялись не для оценки карстовой опасности напрямую, а для выделения квазиоднородных участков, оценка этой опасности в пределах которых выполнялась на следующем этапе. Выделенные участки показаны на рисунке 6. Конкретные факторы, использованные для такого зонирования, приведены в таблице 2.

Выделенные участки характеризуются различной степенью карстовой опасности. Наибольшая плотность карстовых форм (21,2 шт./км²) зафиксирована в пределах участка № 6, а наименьшая (0,3 шт./км²) – на участке № 3.

Высокая концентрация карстовых форм в пределах участка № 6 обусловлена рядом взаимосвязанных факторов. К ним относится развитое горизонтальное и вертикальное расчленение рельефа на юго-западе сводовой части положительной тектонической структуры, что способствует питанию карстового водоносного горизонта. Это дополняется северо-восточным падением слоев карстующихся пород, обеспечивающим естественное дренирование в сторону долины реки Суворощь.

С целью упрощения зонирования трассы проектируемого линейного сооружения авторы разработали специальный инструмент для оперативного и точного определения границ ее участков (расположения граничных пикетов), характеризующихся разной карстовой опасностью. Результатом является сводная таблица, в которой сопоставлены участки трассы, конкретные пикеты и выделенные карстовые участки (таблица 3). Такое быстрое разделение значительно упрощает разработку противокарстовых мер, стоимость и технические ха-

Таблица 2. Факторы, использованные для выделения квазиоднородных карстовых участков (см. рис. 6)

Условия окружающей среды										№ карстового участка
Тектоническое строение		Геологическое строение				Гидрогеологические условия			Геоморфологические условия	
						Уровень подземных вод, м (установившийся уровень подземных вод, м)				
Тектоническая структура	Неотектоническая активность	Литологический состав перекрывающих отложений	Мощность перекрывающих отложений, м	Мощность отвердевших коренных глин, м	Литологический состав карстующихся пород	четвертичный водоносный горизонт	водоносный горизонт в песчаных прослоях и трещинах в коренных глинах	карстовый водоносный горизонт		
Окско-Цнинский вал	низкая	песок с прослоями суглинка (Q); коренная глина (P_2)	30–32	20–23	известняк и доломит (P_1–P_2)	водоносный горизонт отсутствует	водоносный горизонт отсутствует	30–32 (нет данных)	Водораздел между реками Суворощь и Тара (правыми притоками реки Клязьма бассейна реки Ока). Абсолютные отметки поверхности земли: 110–135 м	1
	средняя								Долина реки Тетрух (левого притока реки Колпь бассейна реки Ока). Абсолютные отметки поверхности земли: 96–130 м	2
	низкая		24–32	21–30	известняк и доломит (P_1–P_2); гипс (P_1)		7–20 (7–20)	24–60 (7–28)	Водораздел между рекой Суворощь и ее правым притоком рекой Суходол. Абсолютные отметки поверхности земли: 110–135 м	3
	высокая								Правый берег реки Суворощь выше впадения в нее реки Суходол. Абсолютные отметки поверхности земли: 95–120 м	5
	средняя								Правый берег реки Суворощь ниже впадения в нее реки Суходол. Абсолютные отметки поверхности земли: 93–144 м	8
	высокая		42–54	40–51			34–46 (21–26)	43–53 (15–26)	Правый берег реки Суходол вблизи ее впадения в реку Суворощь. Абсолютные отметки поверхности земли: 100–138 м	6
	низкая	коренная глина (P_2)	24–26	24–26			водоносный горизонт отсутствует	24–26 (нет данных)	Левый берег реки Тетрух. Абсолютные отметки поверхности земли: 105–144 м	4
	средняя								Водораздел между реками Тетрух и Суходол. Абсолютные отметки поверхности земли: 123–150 м	7
	средняя	суглинок с прослоями песка (Q); коренная глина (P_2)	40–42	36–38			7–8 (7–8)	70–73 (9–10)	Правый берег реки Суворощь выше впадения в нее реки Тюряха (левого притока реки Суворощь). Абсолютные отметки поверхности земли: 103–150 м	9
	низкая								Долина реки Суворощь. Абсолютные отметки поверхности земли: 120–150 м	10
	средняя		60–90	25–90	доломит (P_1); гипс (P_1)	3–13 (3–13)	38–66 (нет данных)	водоносный горизонт отсутствует	Правый берег реки Суворощь, водораздел между рекой Суворощь и ее притоком рекой Тюряха. Абсолютные отметки поверхности земли: 89–120 м	11

Таблица 3. Сегменты трассы линейного сооружения, выделенные на основе условий окружающей среды

№ карстового участка исследуемой территории	Длина сегмента трассы линейного сооружения, проходящего через участок, м	Плотность распределения карстовых форм на участке, шт./км²	Расположение границ сегмента относительно пикетов (ПК), установленных вдоль трассы
1	2398,7	0,4	2824+74,3–2848+73,0*
4	4887,4	1,5	2848+73,0–2897+60,4
6	3312,1	21,2	2897+60,4–2930+72,5
8	4485,8	0,8	2930+72,5–2975+55,1
11	6104,7	1,4	2975+55,1–3036+56,5
10	463,9	1,3	3036+56,5–3041+18,2

* То есть от ПК № 2824 плюс 74,3 м до ПК № 2848 плюс 73,0 м, или от 282474,3 м до 284873,0 м от начала трассы (поскольку шаг пикетов вдоль линейных сооружений обычно составляет 100 м). В следующих строках – аналогично.

рактеристики которых напрямую зависят от локальных условий окружающей среды вдоль линейного сооружения.

Автоматизация оценки размеров карстовых форм

Основными морфологическими параметрами локальных карстовых проявлений являются их горизонтальные размеры, которые до сих пор традиционно измеряли вручную, особенно в случаях проявлений неправильной формы. В этом исследовании авторы использовали автоматизированный подход для измерения диаметра круглых карстовых форм, большой и малой осей вытянутых форм, а также ориентации большой оси последних.

Интерес к изучению ориентации вытянутых карстопроявлений был методологически обоснованным, так как карстовые формы часто контролируются зонами повышенной трещиноватости. Преобладающее направление ориентации карстовых форм позволит сделать вывод об общем направлении системы трещин в массиве. Например, линеаментный анализ карстовых районов Пермского края, где распространены как сульфатные (г. Кунгур, п. Полазна), так и карбонатные (Кизеловская антиклиналь, Уфимское плато) горные породы, показал, что расположение поверхностных и подземных карстовых форм приурочено к осевым зонам линеаментов. Эти зоны характеризуются повышенными трещиноватостью и водопроницаемостью, в то время как в пределах массивов слаботрещиноватых пород плотность распределения карстопроявлений минимальна [51, 52].

Для автоматизированной оценки размеров карстовых форм был разработан специальный инструмент на языке программирования Python. Данный инструмент работает по принципу «черный ящик», выполняя промежуточные расчеты в фоновом режиме (без участия пользователя) и выдавая лишь готовые результаты. Алгоритм определяет геометрический центроид каждой карстовой формы и измеряет длины лучей, проведенных от центроида к контуру с интервалом в 1° начиная с направления на север и далее по часовой стрелке. Максимальный и минимальный радиусы определяются путем последовательного сравнения длин лучей (рис. 7), после чего соответствующие значения и азимуты осей автоматически заносятся в атрибутивную таблицу. Показано, что такой автоматизированный подход существенно сокращает время обработки данных по карстопроявлениям, повышает точность измерений и обеспечивает эффективный и воспроизводимый анализ больших массивов данных.

Автоматизированная оценка морфометрических параметров карстовых форм позволила получить их детальный каталог. После выполнения зонирования на основе условий окружающей среды были построены гистограммы распределения диаметров карстопроявлений (рис. 8) и розы-диаграммы ориентации их больших осей для всей изучаемой территории и для выделенных в ее пределах карстовых участков (например, рис. 9).

Интервал группировки для гистограмм распределения выбран по стандартным правилам статистической обработки в зависимости от объема выборки. При этом воронки диаметром более 80 м формируют обособленный «хвост» распределения, что может свидетельствовать либо об ином механизме образования, либо, вероятнее всего, о последующем слиянии нескольких соседних воронок в единую котловину. Для уточнения генезиса таких форм необходима их раздельная статистическая обработка с учетом приуроченности к конкретным типам инженерно-геологических условий.

Разработанный инструмент показал высокую точность. Это было подтверждено сопоставлением результатов его работы с данными полевых карстологических исследований. Автоматизированно вычисленные длины больших осей совпали с результатами полевых измерений на 85–97%, малых осей – на 80–100%. Отклонения от полевых данных не превышали 3 м.

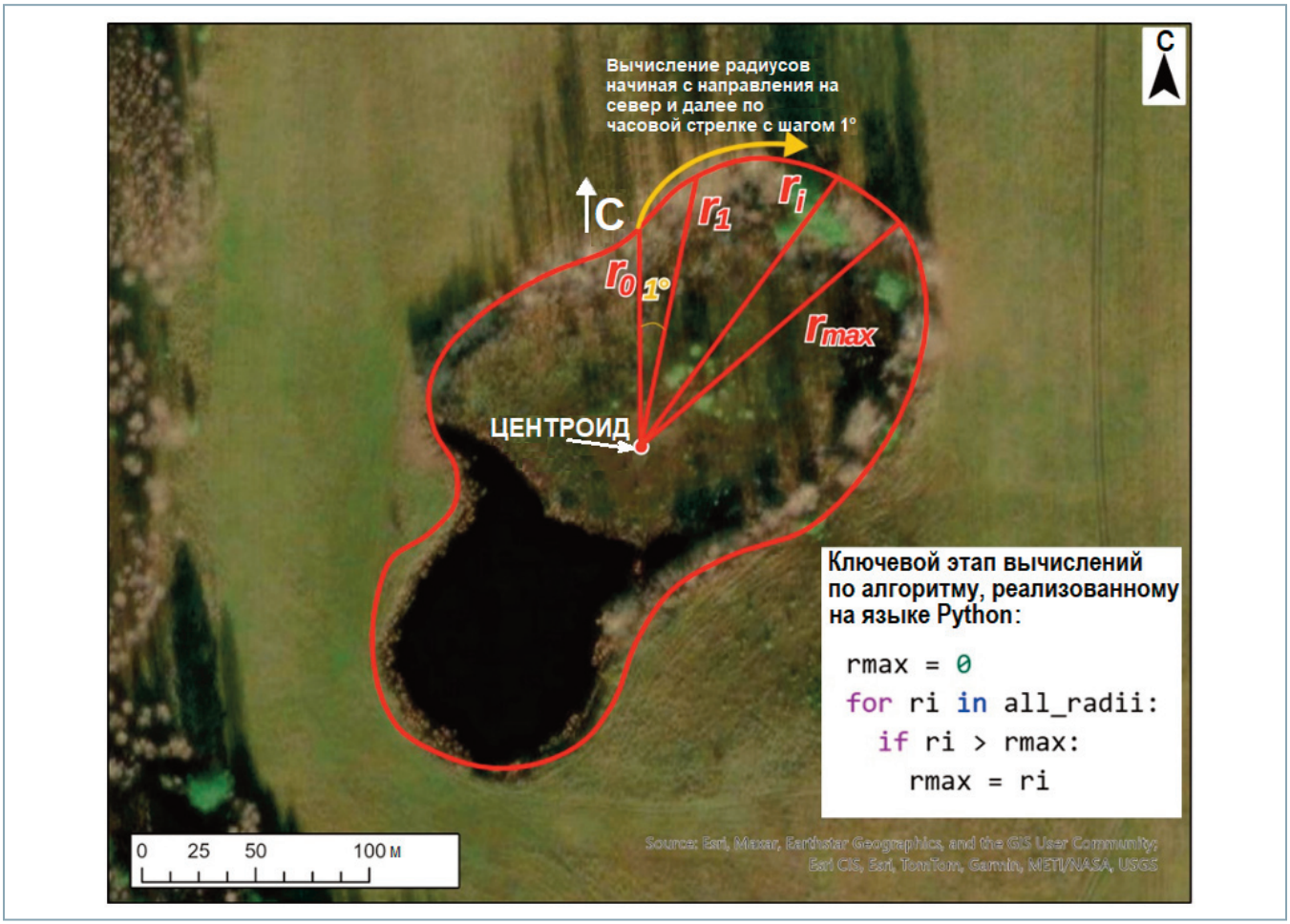


Рис. 7. Схема работы разработанного алгоритма. *Буквенные обозначения:* r0 – первое измеренное значение радиуса; ri – текущее (*i*-е) значение радиуса; rmax – максимальный радиус карстовой формы; С – направление на север (для первого измерения); all_radii – все измеренные радиусы карстовой формы

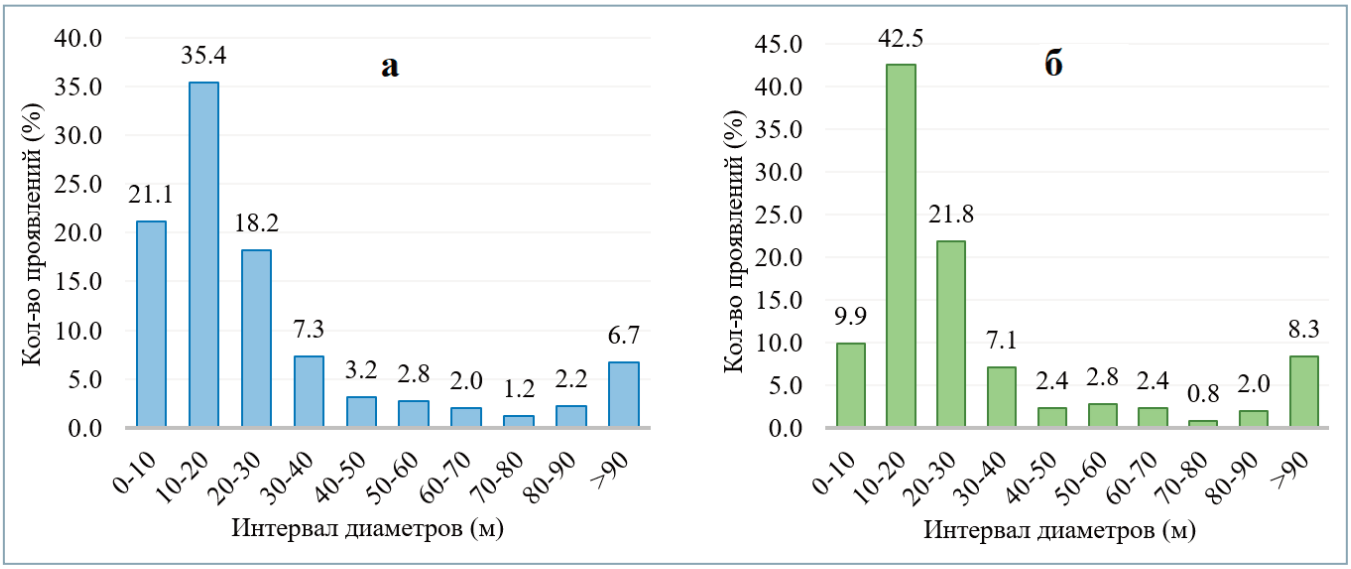


Рис. 8. Распределение карстовых форм по их диаметрам: а – для всей изучаемой территории; б – для участка исследований № 6

Высокоинформативной характеристикой для каждого карстового участка служит распределение карстовых форм по среднему диаметру. Поскольку на размеры карстопроявлений влияет множество факторов, анализ распределения диаметров в пределах конкретного карстового участка позволил определить их значения, которые наиболее типичны (репрезентативны) для него.

Анализ графических данных показал, что средние диаметры карстовых форм на исследуемой территории главным образом

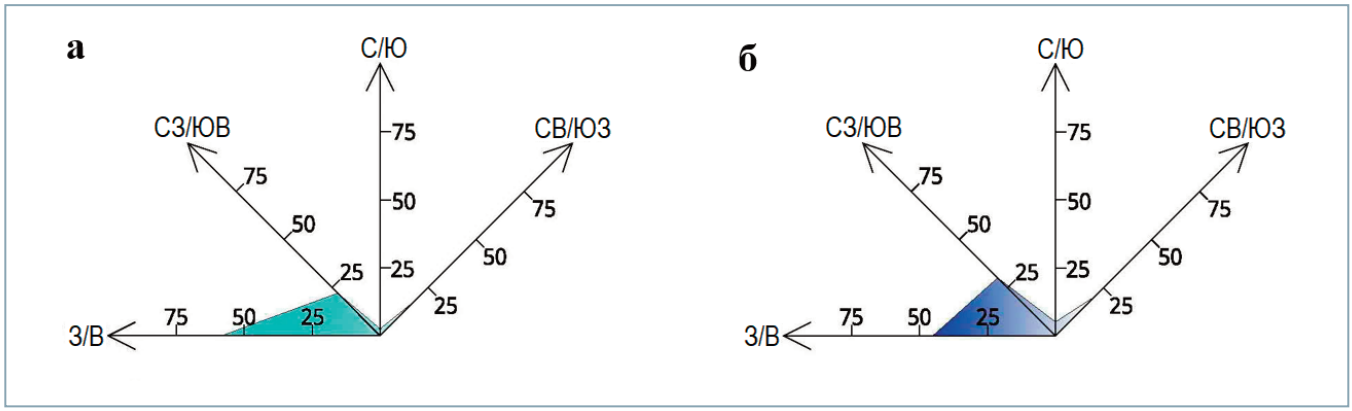


Рис. 9. Розы-диаграммы ориентации карстопроявлений: а – для всей исследуемой территории; б – для карстового участка № 6

попадают в диапазон 10–20 м. При этом средними диаметрами 0–10 и 20–30 м характеризовалось достаточно заметное количество карстопроявлений. Характер распределения карстовых форм по этому параметру для участка № 6 (см. рис. 8, б) в целом аналогичен таковому для всей исследуемой территории (см. рис. 8, а). Это связано с тем, что шестой участок вмещает наибольшее количество карстовых форм и служит источником эталонного набора данных для построения гистограмм распределения карстопроявлений по всей исследуемой территории. Однако сравнительный анализ выявил, что максимум кривой распределения для всей территории смещен в сторону меньших диаметров по сравнению с участком № 6 (см. рис. 8).

Использование разработанного метода автоматизированных вычислений дало множество преимуществ, включая возможность определения размеров локальных понижений рельефа с высокой точностью и ускорение обработки больших объемов данных. Анализ всех 507 карстопроявлений на исследуемой территории позволил провести их морфологическую классификацию на основе отношения их большой оси к малой. Карстовые формы с соотношением осей менее 1,2 были отнесены к круглым (их оказалось около 75%), а формы с соотношением осей 1,2 и более – к овальным (эллипсовидным).

Данная автоматизированная методика позволила включить в оценку форм поверхностного карста новый параметр – их ориентацию. Было показано, что общее направление вытянутости карстопроявлений (больших осей) может отражать преобладающее направление трещиноватости в карстовом массиве. Была подтверждена эффективность построения роз-диаграмм для визуализации пространственной ориентации карстовых форм. На рисунке 9 это проиллюстрировано для всей исследованной территории и для карстового участка № 6.

Примечательно, что ориентация карстопроявлений на шестом участке совпадает с направлением течения реки Суворощь, которая является главным водотоком на исследуемой территории. Такая корреляция позволяет предположить, что системы трещин, влияющие на развитие карста, могут быть параллельны структурным элементам, выраженным в рельефе. Более того, падение слоев карстующихся пород на северо-восток может указывать на наличие систем трещин, ориентированных перпендикулярно направлению падения аналогично трещинам бортового отпора, часто наблюдаемым в массивах пород, слагающих склоны современных речных долин.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Целью представленного исследования была разработка автоматизированного подхода к оценке карстовой опасности для решения ряда важных задач в области инженерных изысканий и прогнозирования соответствующих рисков. Однако успешное применение этого подхода требует соблюдения нескольких ключевых условий.

Основная проблема при оценке карстовой опасности с помощью дистанционного зондирования Земли связана с разрешением анализируемых изображений, которое может затруднить обнаружение мелких карстовых форм. Эта проблема была решена за счет использования спутниковых снимков высокого разрешения, которые позволяют выявлять и картировать даже небольшие карстопроявления с точностью, достаточной для регионального анализа.

Кроме того, зонирование территории вдоль проектируемого линейного сооружения требует точной геопривязки всех закартированных карстовых форм. Поэтому критически важным является обоснованный выбор подходящей системы координат.

Распространенной методологической проблемой при зонировании по природной обстановке является возможная субъективность экспертных оценок. Чтобы минимизировать потенциальные последствия этого, был разработан и в обязательном порядке использовался набор определенных критериев зонирования, учитывающий особенности окружающей среды в пределах исследуемой территории. Применение данного объектив-



Рис. 10. Блок-схема процесса исследования поверхностного карста

ного подхода сыграло ключевую роль в обеспечении воспроизводимости результатов зонирования, тем самым сведя к минимуму ошибки из-за влияния человеческого фактора.

Существенной проблемой при использовании автоматизированных морфометрических расчетов на основе данных ДЗЗ является необходимость надежного подтверждения достоверности полученных результатов. Данная задача была решена путем выбора исследуемой территории (Пивоваровского карстового участка), для которой уже существовал каталог карстопроявлений, составленный на основе полевых измерений. Это позволило выполнить прямое сравнение, которое продемонстрировало высокую точность работы предложенного авторами инструмента: вычисленные длины большой и малой осей совпали с полевыми данными на 85–97 и 99–100% соответственно, а отклонения не превышали 3 м.

Было показано, что внедрение разработанного подхода имеет существенные преимущества. Автоматизированное зонирование коридора будущего линейного объекта по степени близости к карстопроявлениям быстро обеспечивает визуализацию участков, характеризующихся карстовой опасностью. Своевременно выполненный анализ такого рода способствует оперативному внесению изменений в проектные решения. Например, на его основе могут быть выданы рекомендации по выбору альтернативного варианта трассы в обход наиболее карстоопасных зон.

Точность прогнозирования карстовой опасности на таких участках повышается за счет учета неоднородности всей исследуемой территории. Ее зонирование по условиям окружающей среды позволяет выделить квазиоднородные участки, в пределах которых активность развития карста относительно единообразна и карстовые формы рельефа формируются по сходным механизмам. Следовательно, оценки наиболее репрезентативных размеров карстопроявлений становятся более надежными, если они выполняются в рамках этих квазиоднородных участков.

На участках с высокой плотностью форм поверхностного карста ручное измерение их размеров как в полевых условиях, так и по снимкам является трудоемким и времязатратным процессом. Разработанный авторами инструмент предназначен для расчета размеров всех карстопроявлений, выявленных при совместном использовании дешифрирования данных ДЗЗ и результатов полевых наблюдений. Было показано, что он решает эту задачу с высокой точностью и за существенно меньшее время по сравнению с ручным способом. Помимо эффективности автоматизация обеспечивает высокую точность оценки размеров карстовых форм и позволяет быстро обрабатывать большие объемы данных.

Еще одним важным результатом данного исследования является возможность определения ориентации карстовых форм. Их преобладающая ориентация в пределах условно однородного участка может быть использована для установления доминирующего направления трещиноватости карстового массива. Понимание механизмов их корреляции необходимо, поскольку новые карстопроявления действительно чаще всего приурочены к зонам трещиноватости. И такие знания способствуют выявлению участков, характеризующихся высокой степенью карстовой опасности.

Процесс исследования поверхностного карста путем совместного использования данных ДЗЗ, результатов полевых измерений и их пространственного анализа в среде ГИС, наглядно представлен на рисунке 10. На этой блок-схеме отображены ключевые этапы работы на основе предложенного

подхода – от первоначального сбора данных до финального зонирования территории по карстовой опасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование показало, что применение пользовательских инструментов в дополнение к стандартным инструментам ГИС существенно повышает качество оценки карстовой опасности для коридоров проектируемых линейных сооружений. В основе этого подхода лежит разработанный авторами алгоритм, реализованный на языке Python, для автоматизации морфометрического анализа карстовых форм в среде ГИС. Данный инструмент эффективно рассчитывает ключевые параметры, включая максимальные и минимальные горизонтальные размеры карстопроявлений, а также ориентацию их больших осей, обеспечивая высокую скорость и точность обработки больших объемов входных данных, что подтверждается результатами полевой валидации.

Интеграция данных дистанционного зондирования Земли и инструментов геоинформационных систем создает мощную основу для повышения качества и скорости оценки карстовой опасности, обеспечивая оперативное и точное зонирование территории на основе как распределения карстовых форм, так и условий окружающей среды.

Разработанная методика обладает универсальностью и может эффективно использоваться для любого карстового района с четко выраженными формами поверхностного карста. Совместное использование данных ДЗЗ и результатов полевых исследований с точной пространственной привязкой увеличивает эффективность применения данного подхода на территориях различной степени изученности, характеризующихся разными размерами карстопроявлений. Предложенный подход позволяет проводить оперативный анализ на основе фактических данных, облегчая принятие решений на этапах проектирования линейных сооружений. Это, в свою очередь, способствует оптимизации выбора их трасс и минимизации рисков, связанных с развитием карстового процесса.

Внедрение предложенного автоматизированного подхода позволит снизить трудозатраты на этапе предварительной оценки карстовой опасности на 60–70%, а также даст возможность оперативно пересматривать результаты зонирования при поступлении новых данных, что существенно повысит адаптивность методики к изменяющимся условиям проектирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00350, https://rscf.ru/project/24-27-00350/.

Список литературы

1. Budiyanto E., Muzayanah, Prasetyo K. Karst groundwater vulnerability and risk to pollution hazard in the Eastern part of Gunungsewu karst area // IOP Conf. Series. Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 412. № 1. Article 012020. URL: https://doi.org/10.1088/1755-1315/412/1/012020.
2. Sauro U. Dolines and sinkholes: aspects of evolution and problems of classification // Acta Carsologica. 2003. Vol. 32. № 2. P. 41–52.
3. Theilen-Willige B. Overview of circular structures of various origins and sizes in Egypt as a contribution to natural hazard data mining based on remote sensing data and geoinformation systems (GIS) analysis // Prevention and treatment of natural disasters. 2023. Vol. 2. № 2. P. 7–19. URL: https://doi.org/10.54963/ptnd.v2i2.167.
4. Sharma S., Parasar S.S., Singh K. Multi-criteria decision modelling for forest fire risk mapping in protected areas of Mayurbhanj District, Odisha: a case study in a geomorphologically diverse touristic landscape // Ecological Questions. 2025. Vol. 36. № 3. P. 1–38. URL: https://doi.org/10.12775/EQ.2025.030.
5. Singh K., Sharma A., Tiwary A.K., Kaushal M., Nautiyal A., Gupta S.K., Sahoo S., Salem A., El-Hendawy S., Mattar M.A., Randeep, Kansal R.B. A GIS-based study on groundwater level fluctuation and delineation of potential zones // Environmental Earth Sciences. 2025. Vol. 84. Article 233. URL: https://doi.org/10.1007/s12665-025-12197-1.
6. Mahato P., Srivastava S., Pandey S. Integrating AHP decision-making tool for landslide susceptibility zone mapping: insights from Mandi, Himachal Pradesh // Operations Research Forum. 2025. Vol. 6. Article 162. URL: https://doi.org/10.1007/s43069-025-00560-8.
7. Dhakal D., Singh K., Kaur D., Verma S., Alsabhan A.H., Alam S., Al-Sareji O.J., Randeep, Kavita. Landslide-induced vulnerability of road networks in Lahaul and Spiti, India: a geospatial study // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2025. Vol. 84. Article 336. URL: https://doi.org/10.1007/s10064-025-04328-6.
8. Dhakal D., Singh K., Onyelowe K.C., Cazco S.A.S., Sharma A., Alarifi N., Islam F., Randeep, Arunachalam K.P., Youssef M.Y. Enhancing landslide disaster prediction by evaluating non landslide area sampling in machine learning models for Spiti Valley India // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 12242. URL: https://doi.org/10.1038/s41598-025-95087-7.
9. Bigdeli A., Maghsoudi A., Ghezelbash R. A comparative study of the XGBoost ensemble learning and multilayer perceptron in mineral prospectivity modeling: a case study of the Torud-Chahshirin belt, NE Iran // Earth Science Informatics. 2024. Vol. 17. № 1. P. 483–499. URL: https://doi.org/10.1007/s12145-023-01184-4.

10. Bigdeli A., Maghsoudi A., Ghezelbash R. Recognizing geochemical anomalies associated with mineral resources using singularity analysis and random forest models in the Torud-Chahshirin Belt, Northeast Iran // Minerals. 2023. Vol. 13. № 11. Article 1399. URL: https://doi.org/10.3390/min13111399.
11. Dhakal D., Singh K. A geospatial approach to landslide susceptibility mapping of Spiti, India // Journal of Mining and Environment (JME). 2025. Vol. 16. № 1. P. 183–205. URL: https://doi.org/10.22044/jme.2024.14684.2779.
12. Thakur S., Tangri A., Singh K, Sharma S. Assessing Delhi Region's air quality using geospatial technologies: a comparative analysis of pollution trends during the COVID period (2018–2023) // Environmental Monitoring and Assessment. 2025. Vol. 197. Article 722. URL: https://doi.org/10.1007/s10661-025-14177-1.
13. Дробинина Е.В., Китаева М.А., Романова Е.Р. Особенности мониторинга опасных инженерно-геологических процессов с применением геоинформационных систем и данных дистанционного зондирования Земли // Вестник Пермского университета. Геология. 2025. Т. 24. № 1. С. 23–31. DOI: 10.17072/psu.geol.24.1.23.
14. Orhan O., Yakar M., Kırtıloglu O.S. A web-based service application for visual sinkhole inventory information system; case study of Konya closed basin // Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi. 2017. Vol. 5. № 1. P. 72–82. URL: https://doi.org/10.15317/Scitech.2017.71.
15. Ollivier C., Chalikakis K., Mazzilli N., Kazakis N., Lecomte Y., Danquigny Ch., Emblanch Ch. Challenges and limitations of karst aquifer vulnerability mapping based on the PaPRIKa method – application to a Large European Karst Aquifer (Fontaine de Vaucluse, France) // Environments. 2019. Vol. 6. № 3. Article 39. URL: https://doi.org/10.3390/environments6030039.
16. Fiorillo F., Pagnozzi M., Ventafridda G. A model to simulate recharge processes of karst massifs // Hydrological Processes. 2015. Vol. 29. № 10. P. 2301–2314. URL: https://doi.org/10.1002/hyp.10353.
17. Goldscheider N. Delineation of spring protection zones // Groundwater hydrology of springs (edited by N. Kresić, Z. Stevanović). Elsevier, 2010. P. 305–338. URL: https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-502-9.00008-6.
18. Goldscheider N., Meiman J., Pronk M., Smart Ch. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology // International Journal of Speleology. 2008. Vol. 37. № 1. P. 27–40. URL: https://doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.3.
19. Leone G., Catani V., Pagnozzi M., Ginolfi M., Testa G., Esposito L., Fiorillo F. Hydrological features of Matese Karst Massif, focused on endorheic areas, dolines and hydroelectric exploitation // Journal of Maps. 2022. Vol. 19. № 1. P. 1–13. URL: https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2144497.
20. Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б., Беленович Т.Я. Применение глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM v.2 для выделения районов возможной активизации карстовых процессов на территории Архангельской области // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2021. Т. 163. Кн. 2. С. 302–319. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
21. Carvalho Júnior O.A de., Guimarães R.F., Montgomery D.R., Gillespie A.R., Gomes R.A.T., Martins É.d.S., Silva N.C. Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-Derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil // Remote Sensing. 2014. Vol. 6. P. 330–351. URL: https://doi.org/10.3390/rs6010330.
22. Garas K.L., Madrigal M.F.B., Agot R.D.D., Canlas M.C.M., Manzano L.S.J. Karst depression detection using IFSAR-DEM: a tool for subsidence hazard assessment in Panglao, Bohol // Carsologica Sinica. 2020. Vol. 39. № 6. P. 928–936.
23. Hofierka J., Gallay M., Bandura P., Šašak J. Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis // Geomorphology. 2018. Vol. 308. P. 265–277. URL: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.004.
24. Kobal M., Bertoncelj I., Pirotti F., Dakskobler I., Kutnar L. Using lidar data to analyse sinkhole characteristics relevant for understory vegetation under forest cover – case study of a high karst area in the Dinaric Mountains // PLoS One. 2015. Vol. 10. № 3. Article e0122070. URL: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122070.
25. Yu B., Zhang T., Zheng K., Zuo S., Han X., Wang S., Chen S. Enclosed karst depression identification and analysis for the pumped storage power station reservoir construction using DEM // Geofluids. 2023. Vol. 4. Article 4794665. URL: https://doi.org/10.1155/2023/4794665.
26. Gokkaya E., Gutierrez F., Ferk M., Gorum T. Sinkhole development in the Sivas gypsum karst, Turkey // Geomorphology. 2021. Vol. 386. № 5. Article 107746. URL: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107746.
27. Doneus M. Openness as visualization technique for interpretative mapping of airborne lidar derived digital terrain models // Remote Sensing. 2013. Vol. 5. № 12. P. 6427–6442. URL: https://doi.org/10.3390/rs5126427.
28. Дробинина Е.В. Автоматизация оценки поверхностной закарстованности по спутниковым снимкам Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 79–90. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-79-90.
29. Ерофеев Е.А., Катаев В.Н. Идентификация поверхностных форм карста по материалам спутниковых изображений // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: сб. ст. 37-й Всерос. науч.-практ. конф., Пермь, 23–24 мая 2017 г. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2017. С. 193–197.
30. Вахрушев Б.А., Кунов А.А., Кунов В.А. Использование метода дешифрирования спутниковых снимков с целью картирования поверхностных карстовых форм и их пространственного анализа // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2022. Т. 8 (74). № 4. С. 248–263.

31. Oosthuizen A., van Rooy J. Hazard of sinkhole formation in the Centurion CBD using the Simplified Method of Scenario Supposition // Journal of the South African Instiution of Civil Engineering. 2015. Vol. 57. № 2. P. 69–75. URL: https://doi.org/10.17159/2309-8775/2015/v57n2a8.
32. Eduardo O., Manchola P., Morais F. Morphometric characterization of doliniform features in the Araguaia Plain // Sociedade & Natureza. 2023. Vol. 35. Article e67351. URL: https://doi.org/10.14393/SN-v35-2023-67351x.
33. Гантов Б.А. Мониторинг участка активного карстообразования в районе д. Пивоварово Вязниковского района Владимирской области: отчет о научно-исследовательской работе. Дзержинск: Дзержинская карстовая станция, 2005. Архивные материалы.
34. Erofeev E.A., Kataev V.N. Using probabilistic and statistical methods for estimating karst hazard assessment under conditions of anthropogenic influence on karst areas // Engineering Geology World. 2010. Vol. 4. P. 34–46.
35. Tolmachev V.V. Probabilistic approach to the assessment of karst area stability and designing of antikarst constructions // Engineering Geology World. 1980. Vol. 3. P. 98–107.
36. Гордиенко С.Г., Савельева Ю.Ю. Вероятностно-статистический прогноз образования суффозионных воронок в зоне дренажа (на примере Нижегородской ГЭС) // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2001. Т. 239. С. 119–124.
37. Селина З.В., Ковалева Т.Г. Вероятность образования новых карстовых форм вблизи существующих // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: сб. науч. ст. 2023. Вып. 6 (43). С. 295–299.
38. Костарев В.П. О количественных показателях карста и их использовании при инженерно-геологической оценке закарстованных территорий // Инженерно-строительные изыскания. 1979. № 1 (53). С. 49–53.
39. Soltanpour H., Serrhini K., Gill J.C., Fuchs S., Mohadjer S. Multi-hazard susceptibility mapping in the karst context using a machine-learning method (MaxEnt) // EGUsphere. 2024. Preprint. https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1779.
40. Саваренский И.А. Прогноз устойчивости территории методом удаленности от ближайшего проявления карста // Прогноз изменений инженерно-геологических условий при строительстве: сб. науч. тр. (отв. ред.: Р.С. Зиангиров, Н.Л. Шешеня). М.: Наука, 1990. С. 108–118.
41. Щербаков С.В., Золотарев Д.Р. Прогноз устойчивости карстовых территорий (на примере города Кунгура) // Геология в развивающемся мире: материалы конф. студентов, аспирантов и молодых ученых каф. геологии. Пермь: Перм. гос. ун-т, 2008. С. 164–168.
42. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. М.: ПНИИИС, Госстрой России, 2001.
43. Bosák P. Karst processes and time // Geologos. 2008. Vol. 14. P. 19–36.
44. Xingli J., Qingmiao D., Hongzhi Y. Susceptibility zoning of karst geological hazards using machine learning and cloud model // Cluster Computing. 2020. Vol. 22. № 4. P. S8051–S8058. URL: https://doi.org/10.1007/s10586-017-1590-0.
45. Gao L., Shi Y., Qiu Y., Ma C., Zhou A. The analyses of land use and prevention in high-density main urban areas under the constraint of karst ground subsidence: study of Wuhan city, China // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2023. Vol. 12. Article 425. URL: https://doi.org/10.3390/ijgi12100425.
46. Yang Y., Ma X., Ding W., Wen H., Sun D. A novel dataset replenishment strategy integrating time-series INSAR for refined landslide susceptibility mapping in karst regions // Water. 2024. Vol. 16. Article 2414. URL: https://doi.org/10.3390/w16172414.
47. Попов И.В. Инженерная геология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1959. 510 с.
48. Сергеев Е.М. Инженерная геология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 384 с.
49. Катаев В.Н. Методология и практика сравнительно-оценочного карстового районирования. Пермь : Изд-во Перм. ун-та, 2001. 211 с.
50. Китаева М.А., Дробинина Е.В. Опыт карстового зонирования территории проектирования линейного строительства // Спелеология и спелеостология. 2023. № 2. С. 21–26.
51. Золотарев Д.Р. Результаты линеаментного анализа на закарстованных территориях Пермского края // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=7233.
52. Золотарев Д.Р., Катаев В.Н. Воздействие линеаментной тектоники на развитие карстовых процессов на локальном уровне // Геориск. 2013. № 1. С. 34–43.

References

1. Budiyanto E., Muzayanah, Prasetyo K. Karst groundwater vulnerability and risk to pollution hazard in the Eastern part of Gunungsewu karst area // IOP Conf. Series. Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 412. № 1. Article 012020. URL: https://doi.org/10.1088/1755-1315/412/1/012020.
2. Sauro U. Dolines and sinkholes: aspects of evolution and problems of classification // Acta Carsologica. 2003. Vol. 32. № 2. P. 41–52.
3. Theilen-Willige B. Overview of circular structures of various origins and sizes in Egypt as a contribution to natural hazard data mining based on remote sensing data and geoinformation systems (GIS) analysis // Prevention and treatment of natural disasters. 2023. Vol. 2. № 2. P. 7–19. URL: https://doi.org/10.54963/ptnd.v2i2.167.

4. Sharma S., Parasar S.S., Singh K. Multi-criteria decision modelling for forest fire risk mapping in protected areas of Mayurbhanj District, Odisha: a case study in a geomorphologically diverse touristic landscape // Ecological Questions. 2025. Vol. 36. № 3. P. 1–38. URL: https://doi.org/10.12775/EQ.2025.030.
5. Singh K., Sharma A., Tiwary A.K., Kaushal M., Nautiyal A., Gupta S.K., Sahoo S., Salem A., El-Hendawy S., Mattar M.A., Randeep, Kansal R.B. A GIS-based study on groundwater level fluctuation and delineation of potential zones // Environmental Earth Sciences. 2025. Vol. 84. Article 233. URL: https://doi.org/10.1007/s12665-025-12197-1.
6. Mahato P., Srivastava S., Pandey S. Integrating AHP decision-making tool for landslide susceptibility zone mapping: insights from Mandi, Himachal Pradesh // Operations Research Forum. 2025. Vol. 6. Article 162. URL: https://doi.org/10.1007/s43069-025-00560-8.
7. Dhakal D., Singh K., Kaur D., Verma S., Alsabhan A.H., Alam S., Al-Sareji O.J., Randeep, Kavita. Landslide-induced vulnerability of road networks in Lahaul and Spiti, India: a geospatial study // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2025. Vol. 84. Article 336. URL: https://doi.org/10.1007/s10064-025-04328-6.
8. Dhakal D., Singh K., Onyelowe K.C., Cazco S.A.S., Sharma A., Alarifi N., Islam F., Randeep, Arunachalam K.P., Youssef M.Y. Enhancing landslide disaster prediction by evaluating non landslide area sampling in machine learning models for Spiti Valley India // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 12242. URL: https://doi.org/10.1038/s41598-025-95087-7.
9. Bigdeli A., Maghsoudi A., Ghezelbash R. A comparative study of the XGBoost ensemble learning and multilayer perceptron in mineral prospectivity modeling: a case study of the Torud-Chahshirin belt, NE Iran // Earth Science Informatics. 2024. Vol. 17. № 1. P. 483–499. URL: https://doi.org/10.1007/s12145-023-01184-4.
10. Bigdeli A., Maghsoudi A., Ghezelbash R. Recognizing geochemical anomalies associated with mineral resources using singularity analysis and random forest models in the Torud-Chahshirin Belt, Northeast Iran // Minerals. 2023. Vol. 13. № 11. Article 1399. URL: https://doi.org/10.3390/min13111399.
11. Dhakal D., Singh K. A geospatial approach to landslide susceptibility mapping of Spiti, India // Journal of Mining and Environment (JME). 2025. Vol. 16. № 1. P. 183–205. URL: https://doi.org/10.22044/jme.2024.14684.2779.
12. Thakur S., Tangri A., Singh K, Sharma S. Assessing Delhi Region's air quality using geospatial technologies: a comparative analysis of pollution trends during the COVID period (2018–2023) // Environmental Monitoring and Assessment. 2025. Vol. 197. Article 722. URL: https://doi.org/10.1007/s10661-025-14177-1.
13. Drobinina E.V., Kitaeva M.A., Romanova E.R. Osobennosti monitoringa opasnykh inzhenerno-geologicheskikh protsessov s primeneniem geoinformatsionnykh sistem i dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Monitoring of hazardous geotechnical processes using the geoinformation systems and earth remote sensing data] // Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 2025. T. 24. № 1. S. 23–31. DOI: 10.17072/psu.geol.24.1.23 (in Rus.).
14. Orhan O., Yakar M., Kırtıloglu O.S. A web-based service application for visual sinkhole inventory information system; case study of Konya closed basin // Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi. 2017. Vol. 5. № 1. P. 72–82. URL: https://doi.org/10.15317/Scitech.2017.71.
15. Ollivier C., Chalikakis K., Mazzilli N., Kazakis N., Lecomte Y., Danquigny Ch., Emblanch Ch. Challenges and limitations of karst aquifer vulnerability mapping based on the PaPRIKa method – application to a Large European Karst Aquifer (Fontaine de Vaucluse, France) // Environments. 2019. Vol. 6. № 3. Article 39. URL: https://doi.org/10.3390/environments6030039.
16. Fiorillo F., Pagnozzi M., Ventafridda G. A model to simulate recharge processes of karst massifs // Hydrological Processes. 2015. Vol. 29. № 10. P. 2301–2314. URL: https://doi.org/10.1002/hyp.10353.
17. Goldscheider N. Delineation of spring protection zones // Groundwater hydrology of springs (edited by N. Kresić, Z. Stevanović). Elsevier, 2010. P. 305–338. URL: https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-502-9.00008-6.
18. Goldscheider N., Meiman J., Pronk M., Smart Ch. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology // International Journal of Speleology. 2008. Vol. 37. № 1. P. 27–40. URL: https://doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.3.
19. Leone G., Catani V., Pagnozzi M., Ginolfi M., Testa G., Esposito L., Fiorillo F. Hydrological features of Matese Karst Massif, focused on endorheic areas, dolines and hydroelectric exploitation // Journal of Maps. 2022. Vol. 19. № 1. P. 1–13. URL: https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2144497.
20. Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Mineev A.L., Chistova Z.B., Belenovich T.Ya. Primenenie global'noi tsifrovoi modeli rel'efa ASTER GDEM v.2 dlya vydeleniya raionov vozmozhnoi aktivizatsii karstovykh protsessov na territorii Arkhangel'skoi oblasti [Using the ASTER GDEM v.2 global digital elevation model to identify areas of possible activation of karst processes in the Arkhangelsk region (Russia)] // Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. 2021. T. 163. Kn. 2. S. 302–319. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319 (in Rus.).
21. Carvalho Júnior O.A de., Guimarães R.F., Montgomery D.R., Gillespie A.R., Gomes R.A.T., Martins É.d.S., Silva N.C. Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-Derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil // Remote Sensing. 2014. Vol. 6. P. 330–351. URL: https://doi.org/10.3390/rs6010330.
22. Garas K.L., Madrigal M.F.B., Agot R.D.D., Canlas M.C.M., Manzano L.S.J. Karst depression detection using IFSAR-DEM: a tool for subsidence hazard assessment in Panglao, Bohol // Carsologica Sinica. 2020. Vol. 39. № 6. P. 928–936.

23. Hofierka J., Gallay M., Bandura P., Šašak J. Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis // Geomorphology. 2018. Vol. 308. P. 265–277. URL: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.004.
24. Kobal M., Bertoncelj I., Pirotti F., Dakskobler I., Kutnar L. Using lidar data to analyse sinkhole characteristics relevant for understory vegetation under forest cover – case study of a high karst area in the Dinaric Mountains // PLoS One. 2015. Vol. 10. № 3. Article e0122070. URL: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122070.
25. Yu B., Zhang T., Zheng K., Zuo S., Han X., Wang S., Chen S. Enclosed karst depression identification and analysis for the pumped storage power station reservoir construction using DEM // Geofluids. 2023. Vol. 4. Article 4794665. URL: https://doi.org/10.1155/2023/4794665.
26. Gokkaya E., Gutierrez F., Ferk M., Gorum T. Sinkhole development in the Sivas gypsum karst, Turkey // Geomorphology. 2021. Vol. 386. № 5. Article 107746. URL: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107746.
27. Doneus M. Openness as visualization technique for interpretative mapping of airborne lidar derived digital terrain models // Remote Sensing. 2013. Vol. 5. № 12. P. 6427–6442. URL: https://doi.org/10.3390/rs5126427.
28. Drobinina E.V. Avtomatizatsiya otsenki poverkhnostnoi zakarstovannosti po sputnikovym snimkam Sentinel-2 [Automation of surface karst assessment using Sentinel-2 satellite imagery] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. T. 19. № 6. S. 79–90. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-79-90 (in Rus.).
29. Erofeev E.A., Kataev V.N. Identifikatsiya poverkhnostnykh form karsta po materialam sputnikovykh izobrazhenii [Identification of surface karst forms on satellite data] // Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala: sb. st. 37-i Vseros. nauch.-prakt. konf., Perm', 23–24 maya 2017 g. Perm': Perm. gos. nats. issled. un-t, 2017. S. 193–197 (in Rus.).
30. Vakhrushev B.A., Kunov A.A., Kunov V.A. Ispol'zovanie metoda deshifrirovaniya sputnikovykh snimkov s tsel'yu kartirovaniya poverkhnostnykh karstovykh form i ikh prostranstvennogo analiza [Using the method of decoding satellite images in order to map surface karst forms and subsequent spatial analysis of the nature of their placement] // Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2022. T. 8 (74). № 4. S. 248–263 (in Rus.).
31. Oosthuizen A., van Rooy J. Hazard of sinkhole formation in the Centurion CBD using the Simplified Method of Scenario Supposition // Journal of the South African Instiution of Civil Engineering. 2015. Vol. 57. № 2. P. 69–75. URL: https://doi.org/10.17159/2309-8775/2015/v57n2a8.
32. Eduardo O., Manchola P., Morais F. Morphometric characterization of doliniform features in the Araguaia Plain // Sociedade & Natureza. 2023. Vol. 35. Article e67351. URL: https://doi.org/10.14393/SN-v35-2023-67351x.
33. Gantov B. A. Monitoring uchastka aktivnogo karstoobrazovaniya v raione d. Pivovarovo Vyaznikovskogo raiona Vladimirskoi oblasti: otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote [Monitoring of the area of active karst formation near the village of Pivovarovo, Vyaznikovsky district, Vladimir region: report)] Dzerzhinsk: Dzerzhinskaya karstovaya stantsiya, 2005. Arkhivnye materialy (in Rus.).
34. Erofeev E.A., Kataev V.N. Using probabilistic and statistical methods for estimating karst hazard assessment under conditions of anthropogenic influence on karst areas // Engineering Geology World. 2010. Vol. 4. P. 34–46.
35. Tolmachev V.V. Probabilistic approach to the assessment of karst area stability and designing of antikarst constructions // Engineering Geology World. 1980. Vol. 3. P. 98–107.
36. Gordienko S.G., Savel'eva Yu.Yu. Veroyatnostno-statisticheskii prognoz obrazovaniya suffozionnykh voronok v zone drenazha (na primere Nizhegorodskoi GES) [Probabilistically statistical forecast of suffusion sinkholes formation in the drainage zone (by the example of Nizhegorodskaya hydropower station)] // Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva. 2001. T. 239. S. 119–124 (in Rus.).
37. Selina Z.V., Kovaleva T.G. Veroyatnost' obrazovaniya novykh karstovykh form vblizi sushchestvuyushchikh [Probability of formation of new karst forms near existing forms] // Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala: sb. nauch. st. 2023. Vyp. 6 (43). S. 295–299 (in Rus.).
38. Kostarev V.P. O kolichestvennykh pokazatelyakh karsta i ikh ispol'zovanii pri inzhenerno-geologicheskoi otsenke zakarstovannykh territorii [On quantitative indicators of karst and their use in engineering geological assessment of karst territories] // Inzhenerno-stroitel'nye izyskaniya. 1979. № 1 (53). S. 49–53 (in Rus.).
39. Soltanpour H., Serrhini K., Gill J.C., Fuchs S., Mohadjer S. Multi-hazard susceptibility mapping in the karst context using a machine-learning method (MaxEnt) // EGUsphere. 2024. Preprint. https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1779.
40. Savarenskii I.A. Prognoz ustoichivosti territorii metodom udalennosti ot blizhaishego proyavleniya karsta [Forecasting territory stability using the distance-from-nearest-karst-manifestation method] // Prognoz izmenenii inzhenerno-geologicheskikh uslovii pri stroitel'stve : sb. nauch. tr. (otv. red.: R.S. Ziangirov, N.L. Sheshenya). M.: Nauka, 1990. S. 108–118 (in Rus.).
41. Shcherbakov S.V., Zolotarev D.R. Prognoz ustoichivosti karstovykh territorii (na primere goroda Kungura) [Prediction of stability of karst territories (on the example of Kungur city)] // Geologiya v razvivayushchemsya mire: materialy konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh kaf. geologii. Perm': Perm. gos. un-t., 2008. S. 164–168 (in Rus.).
42. SP 11-105-97. Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva [Engineering geological site investigations for construction]. M.: PNIIIS, Gosstroi Rossii, 2001(in Rus.).
43. Bosák P. Karst processes and time // Geologos. 2008. Vol. 14. P. 19–36.
44. Xingli J., Qingmiao D., Hongzhi Y. Susceptibility zoning of karst geological hazards using machine learning and cloud model // Cluster Computing. 2020. Vol. 22. № 4. P. S8051–S8058. URL: https://doi.org/10.1007/s10586-017-1590-0.

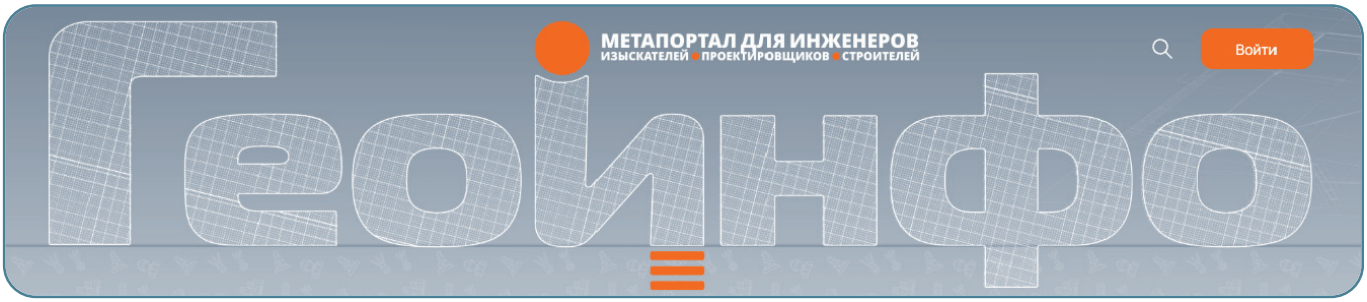
45. Gao L., Shi Y., Qiu Y., Ma C., Zhou A. The analyses of land use and prevention in high-density main urban areas under the constraint of karst ground subsidence: study of Wuhan city, China // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2023. Vol. 12. Article 425. URL: https://doi.org/10.3390/ijgi12100425.
46. Yang Y., Ma X., Ding W., Wen H., Sun D. A novel dataset replenishment strategy integrating time-series INSAR for refined landslide susceptibility mapping in karst regions // Water. 2024. Vol. 16. Article 2414. URL: https://doi.org/10.3390/w16172414.
47. Popov I.V. Inzhenernaya geologiya [Engineering geology]. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1959. 510 s. (in Rus.).
48. Sergeev E.M. Inzhenernaya geologiya [Engineering geology]. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1978. 384 s. (in Rus.).
49. Kataev V.N. Metodologiya i praktika sravnitel'no-otsenochnogo karstovogo raionirovaniya [Methodology and practice of comparative-evaluation karst zoning]. Perm': Izd-vo Perm. un-ta, 2001. 211 s. (in Rus.).
50. Kitaeva M.A., Drobinina E.V. Opyt karstovogo zonirovaniya territorii proektirovaniya lineinogo stroitel'stva [Experience of karst zoning of the linear construction design territory] // Speleologiya i speleostologiya. 2023. № 2. S. 21–26 (in Rus.).
51. Zolotarev D.R. Rezul'taty lineamentnogo analiza na zakarstovannykh territoriyakh Permskogo kraya [The results of lineament analysis on the karst areas of Permsky krai] // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. № 5. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=7233 (in Rus.).
52. Zolotarev D.R., Kataev V.N. Vozdeistvie lineamentnoi tektoniki na razvitie karstovykh protsessov na lokal'nom urovne [Lineament tectonic influence on development of karst processes at the local level] // Georisk. 2013. № 1. S. 34–43 (in Rus.).

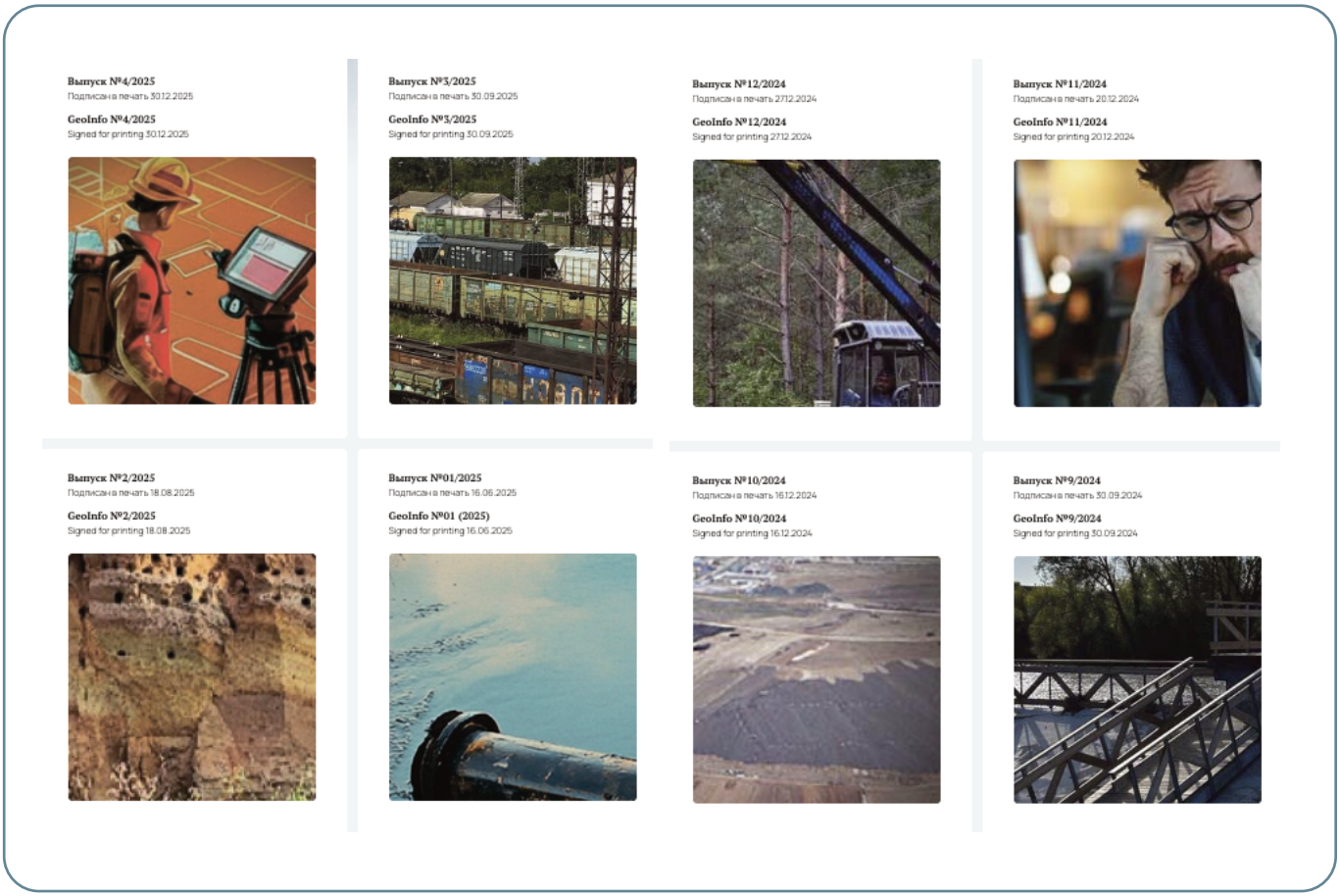
Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
выходит в формате *PDF.
10 выпусков в год.



WWW.GEOINFO.RU





С 2022 года журнал «ГеоИнфо» выходит в формате *PDF.
4 выпуска в 2026 году.

Контакты

Адрес: 119146, Москва, ул. 3-я Фрунзенская, д.10, оф. 12

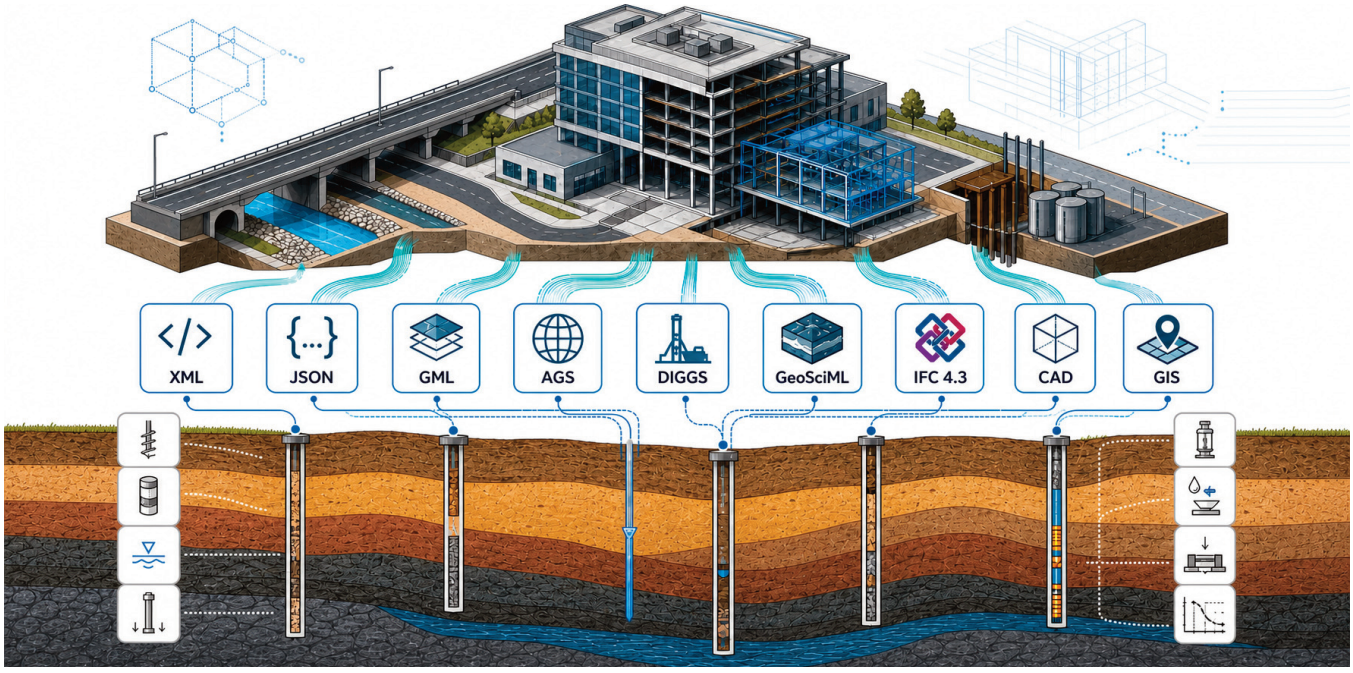
E-mail: info@geoinfo.ru

Тел.: +7 (499) 340-340-9, (916) 240-03-22

Главный редактор: Виктор Ананко

DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-78-97

УДК 624.131:004.9



ОБМЕННЫЕ ФОРМАТЫ ДАННЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Поступила 18.06.2026
Принята к публикации 27.06.2026
Опубликована 27.07.2026

РАКИТИНА Н.Н.
Главный инженер управления цифровой картографии по направлению «Геология» ГБУ «Мосгоргеотрест», г. Москва, Россия
nfrakitina@mggt.ru

БЕРШОВ А.В.
Генеральный директор ГК «Петромоделинг», ассистент кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В Ломоносова, г. Москва, Россия
alexey.bershov@petromodeling.com

ЖИДКОВ Р.Ю.
Директор по науке ГК «Петромоделинг», к. г.-м. н., г. Москва, Россия
rzhidkov@gmail.com

ПАЙШАНБИЕВ С.А.
Главный геолог, руководитель отдела инженерных изысканий ГК «Петромоделинг», г. Москва, Россия
paishanbiev.sino@gmail.ru

РЕКУН В.С.
Руководитель подразделения разработки ПО ООО «ПЕТРОМОДЕЛИНГ», г. Москва, Россия
vitaly.rekun@petromodeling.com

ЛАНЬКО С.В.
Доцент кафедры геотехники Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), к.т.н., г. Санкт-Петербург, Россия
s.v.lanko@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрена проблематика цифрового обмена инженерно-геологическими данными в условиях перехода строительной отрасли к технологиям информационного моделирования. Показано, что действующая практика представления результатов инженерно-геологических изысканий и специальных инженерно-геологических (геотехнических) исследований остается фрагментированной и преимущественно основана на табличных, CAD- и закрытых программно-зависимых форматах, что затрудняет автоматизированное использование данных в расчетных комплексах, ГИС и цифровых информационных моделях объектов капитального строительства (ЦИМ ОКС).

Выполнен сравнительный анализ основных групп обменных форматов, применимых для передачи инженерно-геологической и геопространственной информации (XML, JSON, GML, AGS, DIGGS, GeoSciML, Geo3DML, ГИС-CAD-, IFC 4.3) по критериям машиночитаемости, поддержки 3D-геометрии, семантической полноты, передачи фактических данных и метаданных, открытости спецификации и пригодности для интеграции в ЦИМ ОКС.

Установлено, что ни один из рассмотренных форматов не обеспечивает в полной мере комплексную цифровую передачу инженерно-геологической информации на всех этапах ее формирования – от анализа фондовых материалов и обработки полевых и лабораторных данных до построения верифицированной трехмерной инженерно-геологической модели, отвечающей геологическим закономерностям, принципам типизации

грунтовых массивов и требованиям нормативных документов. Отдельной проблемой остается передача атрибутивных характеристик грунтов и метаданных с сохранением прослеживаемой связи между фактическими результатами изысканий, их интерпретацией и трехмерной моделью.

Обоснована необходимость перехода от разрозненного файлового обмена к многоуровневой архитектуре управления инженерно-геологическими данными, обеспечивающей хранение верифицируемых фактических данных, формирование интерпретированной модели, передачу параметров и расчетных характеристик грунтов в специализированные комплексы, интеграцию информации в ЦИМ ОКС и подготовку цифровых материалов для государственной и негосударственной экспертизы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

инженерно-геологические изыскания; ЦИМ ОКС; обменные форматы данных; XML; JSON; GML; AGS; DIGGS; GeoSciML; Geo3DML; IFC 4.3; инженерно-геологическая модель; ТИМ.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Ракитина Н.Н., Бершов А.В., Жидков Р.Ю., Пайшанбиев С.А., Рекун В.С., Ланько С.В. Обменные форматы данных инженерно-геологических изысканий и исследований: текущее состояние, проблемы, перспективы // Геоинфо. 2026. Т. 8. № 2. С. 78–97. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-78–97.

DATA EXCHANGE FORMATS FOR ENGINEERING GEOLOGICAL SITE INVESTIGATION AND RESEARCH: CURRENT STATE, CHALLENGES, AND PROSPECTS

Received: 18.06.2026
Accepted for publication 27.06.2026
Published 27.07.2026

RAKITINA N.N.
Chief Engineer, Digital Cartography Department, Geology Division, Mosgorgeotrest State-Funded Institution, Moscow, Russia

BERSHOV A.V.
General Director, Petromodeling Group of Companies; Assistant Professor, Department of Engineering and Environmental Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
alexey.bershov@petromodeling.com

ZHIDKOV R.Yu.
Science Director, Petromodeling Group of Companies, Ph.D. in Geology and Mineralogy, Moscow, Russia
rzhidkov@gmail.com

PAISHANBIEV S.A.
Chief Geologist, Head of the Engineering Survey Department, Petromodeling Group of Companies, Moscow, Russia
paishanbiev.sino@gmail.ru

REKUN V.S.
Engineer, Department of Mapping and Maintenance of the Unified State Cartographic Base of Moscow, Mosgorgeotrest State-Funded Institution, Moscow, Russia
vrekun@mggt.ru

LANKO S.V.
Associate Professor, Department of Geotechnics, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), Ph.D. in Engineering, Saint Petersburg, Russia
s.v.lanko@yandex.ru

ABSTRACT

The article addresses the issues of digital exchange of engineering geological data during the transition of the construction industry to building information modeling (BIM) technologies. It is shown that the current practice of presenting the results of engineering geological site investigations and special engineering geological (geotechnical) research remains fragmented and predominantly based on tabular, CAD, and proprietary software-dependent formats. This hinders the automated use of data in computational software packages, GIS, and digital information models of capital construction objects (DIM CCO).

A comparative analysis of the main groups of data exchange formats applicable for transmitting engineering geological and geospatial information (XML, JSON, GML, AGS, DIGGS, GeoSciML, Geo3DML, GIS, CAD, IFC 4.3) was carried out based on the criteria of machine-readability, 3D geometry support, semantic completeness, transmission of factual data and metadata, specification accessibility, and suitability for integration into DIM CCO.

It has been established that none of the considered formats fully ensures the integrated digital transmission of engineering geological information across all stages of its formation (from the analysis of archival materials and processing of field and laboratory data to the construction of a verified 3D engineering geological model that conforms to geological regularities, principles of soil mass typification, and regulatory requirements). A separate issue remains the transmission of soil attribute characteristics and metadata while maintaining a traceable link between actual investigation results, their interpretation, and the 3D model.

The necessity of transitioning from fragmented file exchange to a multi-level architecture for engineering geological data management is substantiated. This architecture should ensure the storage of verifiable factual data, formation of

an interpreted model, transmission of parameters and design characteristics of soils into specialized software packages, information integration into DIM CCO, and preparation of digital materials for state and non-state expertise.

KEYWORDS:

engineering geological site investigation; DIM CCO; data exchange formats; XML; JSON; GML; AGS; DIGGS; GeoSciML; Geo3DML; IFC 4.3; engineering geological model; BIM.

FOR CITATION:

Rakitina N.N., Bershov A.V., Zhidkov R.Yu., Paishanbiev S.A., Rekun V.S., Lan'ko S.V. Obmennye formaty dannykh inzhenerno-geologicheskikh izyskanii i is-sledovanii: tekushchee sostoyanie, problemy, perspektivy [Data exchange formats for engineering geological site investigation and research: current state, challenges, and prospects] // Geoinfo. 2026. T. 8. № 2. S. 78–97. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-78–97 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая трансформация строительной отрасли, начало которой в России приходится на середину 2010-х годов, основана на внедрении технологий информационного моделирования (ТИМ) и требует пересмотра подходов к обмену данными между всеми участниками строительного процесса, в том числе при проведении проектных и изыскательских работ [1, 2]. При этом проблема отсутствия единой технологической линии от изысканий к проектированию и неизбежность ручного ввода данных были сформулированы профессиональным сообществом еще в начале 2010-х годов, на совещании по выбору единого электронного формата обмена данными инженерно-геологических изысканий [3]. В современных условиях инженерно-геологические изыскания, являющиеся основанием для принятия проектных решений, оказались в сложном положении. С одной стороны, инженеры-геологи формируют значительные объемы данных, полученных в результате изыскательских и исследовательских работ и строят по ним инженерно-геологические модели 2D, 2.5D и 3D. С другой – отсутствие единых стандартов обмена приводит к тому, что эти данные и инженерно-геологические модели не могут быть максимально полно интегрированы в цифровые информационные модели объектов капитального строительства (ЦИМ ОКС) и, следовательно, полностью использованы при проектировании [4, 5].

Целью настоящей статьи является анализ существующих обменных форматов инженерно-геологических данных, а также оценка их пригодности для передачи фактических данных, пространственной геометрии геологических тел, их атрибутивной информации и интеграции инженерно-геологических моделей в цифровую информационную модель объекта капитального строительства.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Рассмотрим ключевые особенности российской отрасли цифрового информационного моделирования для инженерно-геологических изысканий.

1. Доминирование форматов с закрытой (не опубликованной официально) спецификацией. Зачастую такие форматы являются текстовыми (XML, INI или форматы на основе собственной разметки вендора). При этом структура и семантика данных нигде формально не задокументированы, что делает невозможной корректную программную интерпретацию результатов изысканий сторонними средствами без обращения к программному обеспечению (ПО) конкретного вендора (например, «КРЕДО», «Топоматик Robur», EngGeo, Geotek BIM, GeoniCS, GEOSimple и др.) [6, 7].

2. Широкое распространение табличного обмена, при котором основными межпрограммными носителями остаются файлы MS Excel (в форматах XLS, XLSX).

3. Преобладание 2D-формата над 3D-форматом: визуализация геологической среды осуществляется в виде карт и разрезов в форматах CAD (DXF, DWG) [5].

4. Нераспространение государственных инициатив в части цифровизации на 3D-модели. XML-схемы, находящиеся в разработке Министерства строительства РФ, предназначены для проведения экспертизы результатов изысканий, охватывают только отчетную часть, состав которой крайне ограничен, и не регламентируют формирование пространственной (геометрической) и атрибутивной составляющих геологического пространства для цифрового информационного моделирования инженерно-геологических массивов как части информационной модели объекта капитального строительства (ИМ ОКС) [5, 8, 9].

Специалистам по проектированию (конструкторам, разработчикам генеральных планов, проектировщикам транспортной инфраструктуры, сметчикам) результаты инженерно-геологических изысканий нужны как цифровая среда для автоматизации моделирования и расчетов, подсчетов объемов и визуализаций. Их главные требования заключаются в прямой интеграции моделей инженерно-геологических массивов в расчетные программные комплексы (такие как «ЛИРА-САПР», SCAD, SiO2D, «Нелинейность» и др.) и ТИМ/BIM-платформы (Revit, Civil 3D, Renga и др.) без потери геометрии геологических тел и их атрибутов [7, 10].

Реализация этой интеграции возможна при соблюдении ряда перечисленных далее ключевых условий, которые в общем виде применимы к любому современному обменному формату инженерно-геологических данных.

1. Машиночитаемость результатов инженерно-геологических изысканий: данные должны быть представлены в структурированном виде в формате, который программные комплексы, применяемые для ЦИМ ОКС, могут интегрировать и использовать без ручного ввода [10, 11].

2. Геометрическая (пространственная) корректность: геометрия всех видов геологических тел, используемых в инженерно-геологическом моделировании, должна быть замкнутой и непротиворечивой (без взаимных пересечений и разрывов между слоями), чтобы ее можно было импортировать в расчетные и ТИМ-комплексы автоматически, без ручной доработки [4].

3. Достаточная семантическая насыщенность: каждая инженерно-геологическая, инженерная или строительная сущность, используемая в построении цифровой информационной модели (ЦИМ), должна обладать атрибутивной информацией в объеме, определяемом уровнем детализации, используемым в ИМ ОКС [10, 12] (под термином «сущность», являющимся буквальным переводом английского слова entity и непривычно звучащим для русскоязычного читателя, в узкой профессиональной ИТ-среде понимается любой логически целостный элемент информационного пространства, имеющий уникальный идентификатор и набор атрибутов. – *Ред.*).

4. Однозначность (каноничность) семантической схематизации: одни и те же данные должны описываться единственным предусмотренным способом. Формат обязан задавать фиксированный словарь сущностей, атрибутов и допустимых значений, исключающий ситуацию, когда одни и те же инженерно-геологические данные можно равноправно закодировать несколькими разными способами. Без выполнения этого условия автоматический обмен и сопоставление данных между программными комплексами становятся неустойчивыми.

5. Пространственная привязка и координатная согласованность: все элементы информационной модели и тем более цифровой информационной модели должны быть сформированы в единой системе координат проекта. При этом возникает существенная проблема бесшовного перехода с достаточной точностью от географических систем координат (устаревшей СК-95, ГСК-2011, WGS-84) к местным системам проекций [12].

Обеспечить выполнение этих условий на практике призваны стандартизированные форматы обмена данными. Именно они определяют, насколько эффективно информация будет транслироваться между различными программными комплексами. Однако на сегодняшний день в мировой и отечественной практике сложились принципиально разные подходы к стандартизации таких форматов (причем последние существенно различаются как по решаемым задачам, так и по уровню абстракции).

ОБМЕННЫЕ ФОРМАТЫ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Многообразие применяемых форматов целесообразно разделить на группы по их назначению, то есть по тому, какой тип инженерно-геологической информации они призваны передавать. Можно выделить шесть групп:

1) базовые сериализационные технологии;

2) специализированные инженерно-геологические форматы фактических данных («западная» школа геотехники называет такие форматы геотехническими, что представляется дискуссионным, поскольку собственно геотехнических расчетов и проектных решений в содержимом таких файлов еще нет);

3) форматы проинтерпретированного геологического строения и 3D-геологического моделирования;

4) GIS/ГИС-форматы общего назначения;

5) CAD/САПР-форматы;

6) интеграционные форматы информационного моделирования зданий – BIM/ТИМ-форматы (рис. 1).

Приведенный порядок групп отражает функциональное назначение форматов, а не строгое возрастание уровня интеграции: группы 1 и 2 описывают преимущественно фактические данные; группы 3 и 4 – проанализированные, проинтерпретированные данные, смоделированное геологическое строение и его пространственное представление; группа 6 – объектно-семантическую модель, пригодную для прямой интеграции в ЦИМ ОКС. Особое положение занимают CAD-форматы (группа 5): несмотря на широкую распространенность, они остаются на низком уровне формализации семантики, атрибутика объектов фиксируется неунифицированно (через слои, блоки и подписи), а геометрия не связана с объектными классами. Поэтому по уровню пространственно-семантической интеграции CAD-форматы стоят не ближе, а дальше от целевой ЦИМ, чем ГИС- и геологические форматы.

Базовые сериализационные технологии (XML, JSON, GML)

Технологии XML и JSON

XML (eXtensible Markup Language) и JSON (JavaScript Object Notation) в инженерно-геологических изысканиях – не самостоятельные прикладные стандарты, а универсальные технические средства, на базе которых создаются специализированные

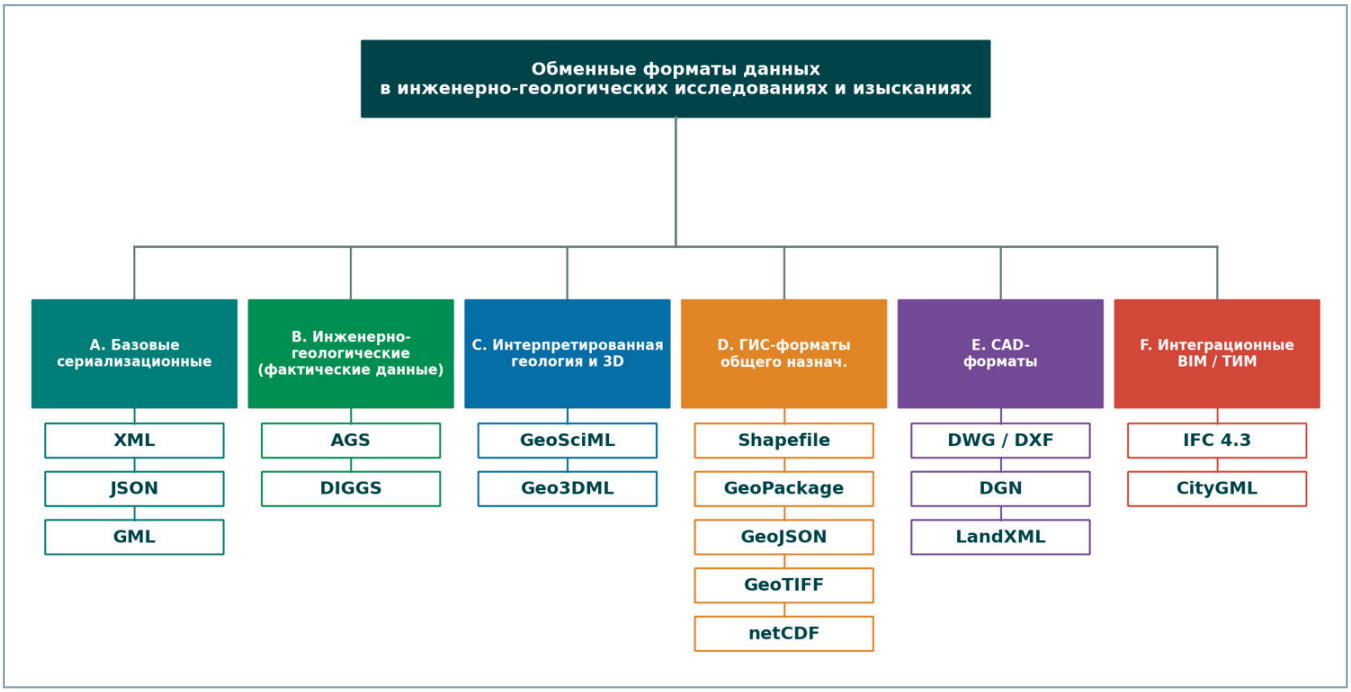


Рис. 1. Классификация обменных форматов данных, применяемых в инженерно-геологических исследованиях и изысканиях, по функциональным группам (1–6)

форматы. На основе XML-схемы можно перевести отчеты по изысканиям и данные полевых и лабораторных исследований в строго структурированный машиночитаемый вид [5, 8].

Назначение: технологии XML и JSON используются для представления информации в соответствующих структурированных машиночитаемых форматах с целью ее хранения и обмена ею между различными системами, приложениями и сервисами.

Как устроены: XML представляет собой иерархию элементов с атрибутами и строгой вложенностью, JSON – структура, состоящая из наборов пар «ключ:значение».

Преимущества: платформонезависимость, иерархическая структура и легкая валидация данных.

Ограничения: XML и JSON являются синтаксическими средствами сериализации и не содержат встроенных механизмов описания геометрии, так как не регламентируют передачу геометрических характеристик как таковых – ни в двумерном, ни в трехмерном варианте; соответствующую семантику вводят уже надстройки (GML – на базе XML; GeoJSON – на базе JSON).

Технология GML

Особое место занимает формат GML (Geography Markup Language) – словарь стандарта OGC (Открытого геопространственного консорциума – Open Geospatial Consortium) на базе XML, специально предназначенный для описания географических объектов и их геометрии. Именно на основе GML построены такие прикладные геологические и геотехнические форматы, как GeoSciML, Geo3DML и DIGGS. Понимание этого важно: значительная часть рассматриваемых далее форматов представляет собой не конкурирующие технологии, а предметные словари и фиксированные схемы на общей основе XML/GML.

Специализированные инженерно-геологические форматы (AGS, DIGGS)

Формат AGS

AGS (Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists) – специализированный текстовый формат, ставший фактическим стандартом обмена инженерно-геологическими данными в Великобритании и ряде стран Содружества наций. История этого стандарта началась в 1991 году, когда ассоциация AGS сформировала метод обмена данными. Его первая редакция (Electronic Transfer of Geotechnical Data, 1st Edition) была опубликована в 1992 году. Формат AGS является эталоном для обмена результатами полевых и лабораторных исследований грунтов [13, 14]. Он фиксирует «сырые» фактологические данные.

Назначение: передача данных с результатами бурения, полевых и лабораторных испытаний, гидрогеологических наблюдений.

Как устроен: задает структуру текстового файла с разделителями (CSV-подобную структуру); данные разбиты на стандартизированные группы (GROUP), каждая из которых отвечает за определенный их тип и имеет фиксированный

набор полей (HEADING) из официального словаря (Data Dictionary); сериализация в XML/JSON реализуется сторонними инструментами и не образует отдельной «версии» формата.

Преимущества: поддержка широким кругом зарубежного ПО для работы с инженерно-геологическими данными, а именно системами управления материалами инженерно-геологических изысканий и построения колонок (gINT, HoleBASE, OpenGround), расчетными пакетами (PLAXIS при импорте в определенных рабочих процессах, GEO5, «Нелинейность») и пакетами геологического моделирования (Leapfrog); высокая точность передачи фактических данных; возможность автоматической валидации файлов готовыми скриптами по правилам формата.

Ограничения: полное отсутствие 3D-геометрии (формат не предназначен для описания трехмерных геологических тел и интерпретированной модели); вложение дополнительных цифровых файлов (фотографий, паспортов, логов) технически возможно через группу FILE и подпапку FILE/, однако сами трехмерные геологические тела и их пространственное взаимное расположение формат AGS передавать не позволяет.

Формат AGS последовательно развивался от редакции четвертого поколения (AGS 4) через промежуточные обновления 2020 и 2022 годов до актуальной редакции AGS 4.2 (2025 года) [13]. В настоящее время ведется разработка новой версии этого формата – AGS 5. В отличие от классического текстового AGS 4.2 (и более ранних), AGS 5 предполагает переход к объектно-ориентированной модели на базе JSON, что должно обеспечить передачу не только фактических, но и интерпретированных данных, включая геометрию геологических тел и их пространственные взаимосвязи.

Формат DIGGS

DIGGS (Data Interchange for Geotechnical and Geoenvironmental Specialists) – международный открытый формат на базе XML/GML, развиваемый специализированной членской организацией Geo-Institute в составе Американского общества инженеров-строителей (American Society of Civil Engineers, ASCE) при участии Федерального управления автомобильных дорог США (Federal Highway Administration, FHWA), Геологической службы США (United States Geological Survey, USGS) и ряда транспортных ведомств США. Актуальная версия (2026 года) – DIGGS 3.0 [15, 16]. В отличие от AGS этот формат построен на геопространственной основе GML, что обеспечивает встроенную геометрию в двух- и трехмерном пространстве и геопривязку точек наблюдений.

Назначение: передача фактических инженерно-геологических данных с геопривязкой (результатов бурения, полевых и лабораторных испытаний, мониторинга, данных геофизических исследований в скважинах).

Как устроен: XML-документ с модульной схемой, разбитой на функциональные модули (Common, Core, Measure Type, Deep foundations, Grouting, Geophysics и др.). Объекты этого формата описывают точки наблюдений и их содержимое – скважины (Borehole), точки пенетрационных испытаний (Sounding в терминологии DIGGS) методом CPT и родственными ему способами, шурфы (TrialPit), образцы грунтов и скальных пород, их описания, процедуры и результаты лабораторных и полевых испытаний, а также описания и характеристики оборудования и метаданные образцов. Базовые сценарии обмена охвачены подмножеством полной схемы «Основной геотехнический профиль» (Core Geotechnical Profile). В версии DIGGS 3.0 добавлены поддержка геофизических исследований, полевых испытаний свай (включая динамический контроль PDA) и измерений в процессе бурения (MWD), а также единая структура временных рядов для мониторинга [17].

Преимущества: встроенная геометрия и геопривязка точек наблюдений благодаря основе GML; поддержка многоуровневой валидации (структура XML, словари кодов, правила Schematron); расширенная работа с единицами измерения и системами координат; признание в качестве одного из наиболее перспективных международных форматов фактических инженерно-геологических данных [18].

Ограничения: этот формат не согласован с отечественной нормативной базой (ГОСТ/СП), не поддерживает классификацию грунтов по ГОСТ 25100, поддержка самого формата в отечественном ПО практически отсутствует (это самые важные и ограничивающие применение факты); как и AGS, ориентирован на фактические данные точек наблюдений и не предназначен для хранения интерпретированной трехмерной инженерно-геологической модели (системы геологических тел, слагающих инженерно-геологический массив); версия DIGGS 3.0 не имеет обратной совместимости с версией DIGGS 2.6.

Форматы интерпретированного геологического строения и 3D-геологического моделирования

Формат GeoSciML

GeoSciML (Geological Sciences Markup Language) – разработка Международного союза геологических наук (IUGS) и Открытого геопространственного консорциума (OGC) [19, 20]. В отличие от AGS, ориентированного на «сырые» данные, GeoSciML описывает интерпретированное геологическое строение подземной среды – геологические тела, структуры, разрезы, тектонические нарушения, в том числе используя и интегрируя их с геологическими картами. Этот формат построен на базе

GML и описывает геологическое строение через концепции GeologicUnit, EarthMaterial, GeologicStructure и др.

Назначение: унификация описания геологических карт, разрезов, горных выработок, образцов горных пород с целью обеспечения совместимости информационных систем разных организаций.

Как устроен: построен как набор взаимосвязанных XML-схем, которые описывают геологические объекты и их свойства; для обеспечения семантической совместимости значения показателей свойств опираются на единые справочники и классификаторы.

Преимущества: имеет встроенную модель, описывающую генезис, возраст и взаимоотношения геологических тел; пригоден для построения крупных ГИС-порталов и национальных фондов геологических данных.

Ограничения: слабо адаптирован для использования при проведении инженерно-геологических и геотехнических изысканий – прежде всего потому, что возможности передачи результатов лабораторных и полевых испытаний конкретного образца и точки испытаний ограниченны [14]

Стандартизированный формат обмена 3D-геологическими моделями Geo3DML

Geo3DML – китайский стандарт обмена 3D-геологическими моделями, утвержденный Геологической службой Китая в 2015 году. Представляет собой открытый язык разметки на базе XML/GML для кодирования и передачи трехмерных геологических моделей [21]. Построен по иерархическому принципу (проект → модель → карты и разрезы → визуализация). Поддерживает поверхности (TIN) и твердотельные модели, объединяя семантическую, геометрическую и визуальную информацию (в том числе стили визуального отображения).

Назначение: обеспечение совместимости и интеграции данных между различными программными продуктами при решении задач в сфере геологии (в том числе инженерной геологии, гидрогеологии, разведки полезных ископаемых, экологической геологии).

Как устроен: этот формат построен как набор взаимосвязанных XML-схем, корневым элементом которых является «трехмерный геологический проект» (Geo3DProject), управляющий двумя основными ветвями, такими как «трехмерные геологические модели» (Geo3DModel), хранящие геометрию, атрибутивные данные и пространственные отношения геологических объектов, и «трехмерные геологические карты» (Geo3DMap), содержащие параметры визуализации (цвета, текстуры, символы) для отображения моделей.

Преимущества: обеспечивает комплексное объединение семантики, 3D-геометрии сложных структур и визуального оформления в единой модели.

Ограничения: Geo3DML ориентирован преимущественно на национальную практику КНР, не поддерживается распространенными платформами (Revit, Civil 3D, Renga, «ЛИРА», SCAD); избыточен для масштаба конкретного объекта капитального строительства (строительной площадки).

ГИС-форматы общего назначения

ГИС-форматы могут использоваться как промежуточные инструменты для передачи пространственной геометрии и атрибутов. Их удобно различать по типу геометрии – это могут быть векторные, растровые и воксельные (объемные) форматы или векторные примитивы – точки, линии, полигоны. Важно подчеркнуть, что круг ГИС-форматов не исчерпывается стандартом Shapefile, а классические векторные форматы по своей природе являются преимущественно двумерными (2D) или так называемыми 2.5D-поверхностями, для которых каждой точке плана соответствует единственная отметка высоты (вследствие чего они ограниченно передают полноценные объемные геологические тела, для отображения которых чаще всего используют твердотельные модели).

Shapefile (.shp) – традиционный векторный стандарт ГИС (разработанный компанией Environmental Systems Research Institute, ESRI). Хранит точки (скважины в плане), линии (профили, линии разрезов, тектонические нарушения) и полигоны (геологические границы) с атрибутами в наборе связанных файлов с единым именем. Эти связанные файлы делятся на обязательные (с расширениями: .shp – геометрия, .shx – индекс геометрии, .dbf – атрибуты в формате dBASE) и необязательные (с расширениями: .prj – система координат и проекция, .cpg – кодировка символов, .sbn/.sbx – пространственный индекс, .shp.xml – метаданные). Преимуществами данного формата являются максимальная совместимость и открытая спецификация. Его ограничения заключаются в том, что он состоит из нескольких файлов, длина имен атрибутов ограничена 10 символами, максимальный размер каждого отдельного файла составляет 2 ГБ, он не хранит растровые представления, плохо работает с полноценным 3D, имеет устаревшую архитектуру без встроенной топологии.

GeoPackage (.gpkg) – современный открытый стандарт OGC. Это, по сути, единый файл локальной базы данных (SQLite-контейнер). Устраняет ключевые ограничения векторного стандарта Shapefile – хранит и векторные, и растровые данные в одном файле, не имеет лимита 2 ГБ и ограничений по длине имен полей, содержит встроенные метаданные и пространственные индексы [22]. Рекомендуется как современная замена стандарта Shapefile для векторного обмена.

GeoJSON – текстовый формат на базе JSON, оптимизированный для веб-картографии. Применяется для отображения

любых картографических материалов в браузерных приложениях и веб-ТИМ. Преимущества: один файл, человекочитаемость, удобство для Python-скриптов. Ограничения: больший размер файла и снижение производительности при работе с очень крупными наборами данных; по спецификации RFC 7946 работает только в системе координат WGS-84, что напрямую конфликтует с требованием координатной согласованности с местными проекциями.

GML/KML, CityGML – XML-словари стандарта OGC для обмена географическими данными и трехмерными моделями городской застройки (зданий, рельефа, инженерных сооружений и транспортной инфраструктуры) [23]. Возможности формата CityGML концептуально близки к решению задач интеграции ГИС и BIM в масштабах города.

Растровые форматы (GeoTIFF) применяются для цифровых моделей рельефа, карт мощностей геологических тел, карт кровли и подошвы геологических тел, поверхностей уровней подземных вод (напорных и безнапорных) и результатов интерполяции геологических параметров (показателей свойств и состояний геологических тел), представленных в виде непрерывных полей.

Воксельные/объемные форматы (netCDF) фактически обеспечивают реализацию способа хранения объемных (volumetric) дискретных геологических моделей. Имеют регулярную 3D-сетку ячеек, в которых хранятся литологические данные и параметры непрерывных полей свойств и состояний геологических тел и сложенных ими инженерно-геологических массивов (такие как пористость, плотность, проницаемость, прочность, теплоемкость, консистенция, температура, напряжения, трещиноватость и др.) [24, 25]. Именно воксельные представления позволяют передавать пространственное распределение свойств и состояний инженерно-геологических массивов, решая одну из основных задач инженерной геологии – выявление пространственных закономерностей, недоступное для классических векторных ГИС-форматов, которые активно применяются в научных процессах построения геологических моделей.

CAD-форматы

CAD-форматы доминируют в практике инженерных изысканий в России при подготовке инженерно-геологических карт и разрезов. Используются как носители геометрии геологических тел, однако имеют *принципиальные ограничения по семантике.*

DWG – проприетарный нативный формат, используемый для файлов программного комплекса AutoCAD, разработанного компанией Autodesk. *DXF* – его открытая обменная версия, применение которой постепенно снижается, поскольку при конвертации в нее утрачивается часть сложных объектных сущностей [26, 27].

DGN – формат, используемый для файлов программного комплекса Bentley MicroStation. По сравнению с DWG он менее распространен в отечественной практике. При экспорте из DGN в DWG трехмерные тела нередко деградируют до полигональной сетки (polyface mesh), которая не редактируется и непригодна для анализа [28].

LandXML – открытый XML-формат, используемый в сферах гражданского строительства и инженерной геодезии для обмена триангуляционными поверхностями (TIN), трассами и точками. Нативно передается между программными комплексами Civil 3D, OpenRoads, Trimble Business Center [5, 29]. Хорошо описывает поверхности (например, кровлю и подошву геологических тел, в том числе многолетнемерзлых, а также рельеф, уровни подземных вод), но не объемные тела и не комплексную инженерно-геологическую атрибутику.

Отдельного пояснения требует вопрос привязки атрибутов к CAD-объектам, поскольку современные CAD-среды формально ее допускают. В частности, программный комплекс *Autodesk Civil 3D* позволяет привязывать атрибутивную информацию к объектам файлов формата DWG с помощью следующих механизмов.

1. Наборы показателей свойств (property sets) – основной механизм Civil 3D (версии 2017 года). Property Set представляет собой контейнер пользовательских данных, привязываемый к объектам или их стилям и не являющийся нативным свойством объекта. Наборы показателей свойств можно применять практически к любому типу объектов (точкам, поверхностям, элементам), а их значения могут задаваться вручную, извлекаться автоматически или вычисляться по формулам, после чего они хранятся внутри файла формата DWG [30, 31].

2. Атрибуты блоков (block attributes) – классический механизм программного комплекса AutoCAD, который представляет собой текстовые поля, встроенные в элементы чертежа, применимые только к блокам (например, к условным знакам скважин), и не распространяется на отдельные (самостоятельные) линии и полигоны.

3. Расширенные данные (XData) и данные объектов (Object Data) – низкоуровневые механизмы программной привязки произвольных данных к сущностям. Раздел XData не отображается в стандартной палитре «Свойства», а его данные извлекаются с использованием команды XDLIST или средств разработки (программных). Раздел Object Data отображается в нижней части палитры «Свойства» при выделении объекта (при условии, что к нему привязана таблица Object Data), а его данные извлекаются с помощью специализированного экспорта либо средств разработки (программных).

Принципиально важно, что все перечисленные механизмы являются проприетарными надстройками над форматом, а не частью открытой спецификации DWG/DXF. При передаче в нейтральный обменный формат или в ПО другого вендора семантическая составляющая, как правило, утрачивается [32]. Кроме того, отсутствует стандартизованная предметная схема инженерно-геологических атрибутов: состав полей произвольно задается исполнителем, что не обеспечивает машиночитаемой межорганизационной совместимости. Таким образом, CAD-форматы могут выступать в качестве носителей геометрии и ограниченной программно-зависимой атрибутики, но не полноценных семантических форматов обмена данными цифровой информационной модели инженерно-геологического массива (ЦИМ ИГМ).

Интеграционные BIM/ТИМ-форматы

IFC (Industry Foundation Classes) – международный открытый стандарт объектно-ориентированных данных для ТИМ, развиваемый консорциумом (ныне альянсом) buildingSMART и опубликованный как ISO 16739 [33, 34]. Предназначен для совместной работы различного ПО и обмена данными как по геометрии, так и по параметрам объектов. В основном применяется для обмена информацией между участниками проекта (архитекторами, конструкторами, проектировщиками, строителями, управленцами, эксплуатантами) [35].

Назначение: интеграция данных об объекте капитального строительства по смежным разделам проектирования в единую ТИМ-среду с возможностью добавления инженерно-геологических данных и моделей инженерно-геологических массивов.

Как устроен: до версии IFC 4 инженерно-геологические данные описывались как часть объекта строительства через универсальный класс строительных элементов IfcBuildingElementProxy. С выходом IFC 4.3 (актуальной официальной версией является IFC 4.3.2.0 в соответствии со стандартом ISO 16739-1:2024) в схеме данных IfcSharedInfrastructureElements появилось семейство следующих геотехнических классов (в понимании авторов статьи – инженерно-геологических классов, но далеко не до конца адаптированных к подходам советско-российской школы инженерной геологии):

- IfcBorehole («скважина»);
- IfcGeotechnicalStratum («геотехнический слой») и его подтипы IfcSolidStratum («твердотельный слой»), IfcVoidStratum («пустотный слой»), IfcWaterStratum («водоносный слой»);
- IfcGeomodel («геотехническая модель»);
- IfcGeoslice («геотехнический разрез»);
- IfcGeotechnicalElement («геотехнический элемент»);
- IfcGeotechnicalAssembly («геотехнические данные и элементы, объединенные в комплексный геотехнический объект») [36, 37].

Это позволяет передавать не только геометрию геологических и инженерно-геологических объектов, но и их атрибуты в единой ТИМ-среде.

Преимущества:

способность воспроизводить иерархичность геологических тел от формаций и стратиграфо-генетических комплексов до инженерно-геологических тел состояния (будет возможность воспроизводить и нормативно признанные инженерно-геологические элементы (ИГЭ), но только после серьезной корректировки ГОСТ 20522-2012 [38]) через связанные ансамбли твердотельных, воксельных или конечноэлементных 3D-тел с привязанными показателями свойств и состояний инженерно-геологического массива, в том числе посредством связи с сущностями типа «образец», «горная выработка», «керн» [4];

- простая интеграция ЦИМ ИГМ в сводную ЦИМ ОКС;
- возможность автоматизированного поиска коллизий;
- автоматическая генерация отчетов в формате XML по модели IFC;
- возможность объединения в «надмодель» территории, то есть использования при построении единой инженерно-геологической модели территории города, завода и пр.;
- автоматизация проведения экспертизы.

Ограничения: отсутствует стандартная возможность сохранения исходных данных (описаний, фотографий, логов и паспортов испытаний и пр.), хотя могут содержаться ссылки на них; программное обеспечение (особенно российское) для поддержки инженерно-геологических классов IFC 4.3 находится в процессе внедрения и отладки.

СВОДНОЕ СОПОСТАВЛЕНИЕ ФОРМАТОВ

Сводное сопоставление рассмотренных форматов по ключевым критериям приведено в таблице. Видно, что ни один из существующих форматов не закрывает одновременно все требования – это и составляет суть рассматриваемой далее проблемы.

Для наглядности те же форматы удобно расположить в координатах «открытость спецификации – поддержка 3D-геометрии и семантики» (рис. 2). Такое представление показывает, что наиболее перспективными для сквозного цифрового инженерно-геологического моделирования являются форматы из правого верхнего квадранта (IFC 4.3, Geo3DML), которые сочетают открытость спецификации с поддержкой трехмерной семантики, тогда как распростра-

Таблица. Сопоставление обменных форматов по ключевым критериям пригодности для цифрового инженерно-геологического моделирования

Форматы	Класс форматов	Геометрия	Семантика (атрибуты)	Классы данных (по умолчанию)	Расширяемость	Степень открытости спецификации
XML, JSON	базовые	нет	зависит от схемы	Нет (зависит от схемы)	полная	открытая
AGS	инженерно-геологические (по фактическим данным)	нет	низкая	скважины, полевые данные, лабораторные данные, метаданные	ограниченная	открытая
DIGGS	инженерно-геологические (по фактическим данным)	2D/3D (точки)	высокая	скважины, полевые (CPT и др.), лабораторные, геофизические, метаданные	полная (модульная)	открытая
GeoSciML	геологические (интерпретационные)	2.5D	высокая	стратиграфия, геологическая интерпретация, метаданные	ограниченная	открытая
Geo3DML	геологические 3D	полная 3D	высокая	3D-геологическая модель, стратиграфия, метаданные	ограниченная	открытая
Shapefile	ГИС векторные	2.5D	низкая	карты/геометрия (без отраслевой модели)	через поля	открытая
GeoPackage	ГИС векторные и растровые	2.5D	высокая	карты / геометрия + растр (без отраслевой модели)	через таблицы	открытая
GeoJSON	ГИС векторные	2D	средняя	карты / геометрия (без отраслевой модели)	через поля	открытая
GeoTIFF	ГИС растровые	растр	нет	растры / ЦМР (без отраслевой модели)	нет	открытая
netCDF (для воксельных данных)	ГИС 3D	полная 3D	средняя	объемные сетки свойств (без отраслевой модели)	через переменные	открытая
LandXML	CAD (Civil), то есть форматы САПР инфраструктурного направления	2.5D	низкая	поверхности, трассы (civil)	ограниченная	открытая
DWG/DXF, DGN	CAD, то есть форматы САПР общего назначения	3D	низкая	карты / разрезы (графика, без отраслевой модели)	слабая (слои/блоки)	закрытая/полуоткрытая
IFC 4.3	BIM (интеграционный), то есть форматы ТИМ интеграционного направления	полная 3D	средняя	скважины, геологические тела, образцы, керн, метаданные (лабораторные данные / полевые данные ограниченно)	полная (PSets, MVD/IDS)	открытая (согласно ISO)

Примечания (пояснения к таблице)

- *Геометрия* – максимальная размерность пространственного описания, которое формат способен переносить: *нет* – пространственная привязка отсутствует; *2D* – плоские контуры; *2.5D* – поверхности (рельеф, кровля/подошва тел) с одной отметкой высоты на точку; *3D* – произвольные трехмерные тела; *полная 3D* – полноценные объемные (твердотельные/воксельные) модели; *растр* – регулярная ячеистая плоская сетка.
- *Семантика (атрибуты)* – богатство встроенной модели свойств объектов: *нет* – атрибуты не предусмотрены; *низкая* – произвольные пары «ключ – значение» без отраслевой типизации; *средняя* – структурированные атрибуты без специализированной геологической онтологии; *высокая* – развитая предметная модель с типами объектов, свойств и связей.
- *Классы данных (по умолчанию)* – категории инженерно-геологических сущностей, которые формат поддерживает штатно, собственной предметной схемой, без разработки пользовательских структур. Пометка «*без отраслевой модели*» означает, что формат переносит лишь геометрию и произвольные атрибуты, но не содержит готовых инженерно-геологических типов объектов.
- *Расширяемость* – штатные средства добавления новых типов данных без правки ядра формата: *полная* – предусмотрен официальный механизм (модульные схемы, наборы свойств PSets, MVD (Model View Definition)); *ограниченная* – расширение возможно, но в узких рамках или через внешние словари; *через поля/таблицы/переменные* – расширение возможно только путем самостоятельного проектирования структур без отраслевой стандартизации; *слабая* – лишь через слои/блоки без семантики; *нет* – формат не расширяется.



Рис. 2. Позиционирование обменных форматов в координатах открытости спецификации и поддержки 3D-геометрии и семантики. Положение форматов определено по сводным оценкам таблицы 1: по горизонтали – степень открытости спецификации (от закрытых проприетарных до открытых международных стандартов), по вертикали – интегральная оценка размерности переносимой геометрии и семантической насыщенности модели данных. Штриховыми линиями показаны условные границы квадрантов

ненные CAD-форматы (DWG/DXF, DGN) остаются в области закрытых решений.

ПРОБЛЕМЫ

Отсутствие универсального формата, который одновременно передавал бы геометрию, атрибутику и метаданные

Ключевой проблемой действующей системы обмена инженерно-геологическими данными является отсутствие единого формата, который одновременно обеспечивал бы корректную передачу трехмерной геометрии иерархической системы геологических тел, слагающих инженерно-геологические массивы, атрибутивного описания их свойств и состояний, исходных фактических данных (результатов наблюдений, замеров, испытаний, фотосъемки и т.д.), а также полных метаданных о происхождении и качестве исходной информации [4, 5, 10]. Как показывает таблица, используемые форматы ориентированы, как правило, на один из этих аспектов – либо на табличное представление результатов испытаний (AGS, DIGGS), либо на картографическое отображение интерпретированного геологического строения (GeoSciML), либо на геометрию объектов строительной части (CAD-форматы, частично IFC). В результате пространственно сложная, семантически насыщенная и сопровождаемая большим объемом фактического материала инженерно-геологическая информация оказывается фрагментированной и распределенной между несколькими несогласованными представлениями.

Следует подчеркнуть, что наиболее полно к роли «сквозного» формата приближается IFC 4.3, объединяющий геометрию и атрибутику. Однако и он обладает ограниченными встроенными возможностями описания геологических сущностей на основе исходного фактического материала и мета-

данных о происхождении информации, а его поддержка в отечественном ПО еще не завершена. Поэтому корректнее говорить не об абсолютном отсутствии подходящего формата, а об отсутствии единого формата, охватывающего весь жизненный цикл данных «от точки наблюдения до расчетной модели». Наличие множества частичных форматов приводит к потере связей между элементами этой цепочки и снижает прозрачность инженерно-геологического обоснования проектных решений или научных выводов о пространственно-временных инженерно-геологических закономерностях.

Отсутствие единых требований к цифровой выдаче результатов изысканий в российской нормативной базе

Второй блок проблем связан с несоответствием между развивающейся практикой цифрового инженерно-геологического моделирования и существующей нормативной базой, ориентированной преимущественно на традиционную отчетную форму представления результатов изысканий [39, 40]. Разрабатываемые XML-схемы федерального и регионального уровня [41] структурируют состав текстовых разделов и табличных приложений отчетов, но не содержат требований к цифровым информационным моделям инженерно-геологических массивов, их структуре, уровням детализации, правилам формирования, ведения и использования в расчетных и ТИМ-комплексах, а также при управлении строительством и эксплуатацией объектов капитального строительства [5]. Кроме того, на данном этапе внедрения XML-схем недостаточно проработан формат представления результатов полевых и лабораторных испытаний. Их цифровая передача должна обеспечивать не только выгрузку числовых значений, но и сохранение структуры унифицированных форм, предусмотренных действующими нормативными документами (паспортов, журналов испытаний и иных форм первичной и итоговой отчетной документации).

На практике это приводит к тому, что исполнители инженерно-геологических изысканий (и/или специальных инженерно-геологических исследований) вынуждены, с одной стороны, выполнять построение 3D-моделей для нужд проектировщиков и инженеров-расчетчиков во внутренних форматах применяемых ими программных комплексов, а с другой – подготавливать цифровую выдачу строго в рамках нормативно регламентированных XML-структур, которые с этими моделями формально не связаны [5, 9]. В результате цифровая инженерно-геологическая модель не становится юридически значимым документом, что снижает мотивацию заказчиков и исполнителей вкладываться в развитие ЦИМ ИГМ [1, 2].

Фрагментация программного обеспечения

Третья группа проблем связана с фрагментацией ПО, используемого для моделирования результатов инженерно-геологических изысканий и исследований [6, 7]. На рынке доминируют проприетарные комплексы, ориентированные на отдельные задачи (камеральную обработку результатов буровых работ и испытаний грунтов, построение разрезов и 3D-моделей, подготовку отчетов), каждый из которых использует собственные внутренние форматы и лишь частично поддерживает экспорт в открытые стандарты. Выход за пределы такой цифровой экосистемы требует множества ручных операций, конвертаций, является чрезвычайно сложным, трудоемким и практически всегда сопровождается серьезной потерей информации [14]. Это особенно критично при развитии длительных проектов с использованием разных цифровых платформ изыскателями, проектировщиками, сотрудниками экспертизы, строителями, заказчиками, а также при передаче данных в государственные фонды [8, 41]. В итоге выбор инструмента моделирования определяет не только форматы хранения, но и саму возможность повторного использования данных, что полностью противоречит целям цифровой трансформации, а на деле и противодействует ей [1].

Фрагментация усугубляется тем, что внутренние форматы большинства программных комплексов имеют закрытую, официально не опубликованную схему. Даже будучи текстовыми, они не задают единого для разных производителей фиксированного словаря сущностей. Это относится к собственно инженерно-геологическим (инженерно-геологическим массивам и инженерным сущностям, необходимым для получения инженерно-геологических данных) и информационным (логам испытаний, результатам интерпретаций) сущностям, к инженерным конструкциям (фундаментам, коммуникациям и др.), грунтовым сооружениям (насыпям и др.), а также к определению состава их атрибутов и классификаторам их характеристик (показателей состава, структуры, свойств, состояний компонентов инженерно-геологической среды и др.). В результате нарушается требование однозначности (каноничности) семантической схематизации: одни и те же инженерно-геологические данные (например, описание геологического тела, результат испытания или граница геологического тела состояния) в разных программных комплексах кодируются по-разному – разными наборами полей, единицами измерения и классификаторами. Именно поэтому конвертация между форматами требует ручного сопоставления (mapping) полей и не может быть полностью автоматизирована. Решением являются форматы с открытой формально заданной схемой и фиксированным словарем терминов (прежде всего на базе AGS и DIGGS с их безусловной адап-

тацией к российским нормам), в которых способ представления каждой сущности регламентирован и единствен. Что касается IFC, то единого словаря инженерно-геологических сущностей в нем пока нет: текущая версия IFC дает возможность использования лишь небольшого набора подходящих классов данных.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФОРМАТОВ ДАННЫХ

Ключевым направлением развития цифровых инженерно-геологических моделей представляется формирование сквозной цепочки обмена данными, в которой специализированные инженерно-геологические форматы, формат IFC 4.3 и национальные XML-схемы Минстроя РФ рассматриваются не как конкурирующие, а как взаимодополняющие элементы единой модели данных [5, 34]. При этом IFC 4.3 отвечает за объектно-пространственное представление инженерно-геологических массивов (ЦИМ ИГМ) в составе ИМ ОКС [35, 36] как независимой подсистемы геологического пространства (инженерной цифровой модели геологического пространства (ИЦМГП)). Надо отметить, что на сегодня в соответствии с нормативной документацией [11, 42] данные инженерно-геологических изысканий являются частью инженерной цифровой модели местности (ИЦММ), что в целом нарушает логическую картину, в которой объекты реального мира располагаются над поверхностью рельефа (составляя собственно местность) и под ней (составляя геологическое пространство).

Формат XML отвечает за машиночитаемое представление результатов изысканий и проектной документации преимущественно для целей экспертизы, а также межведомственного обмена. Отчетные документы в этом формате формируются на основе опубликованных в интернете XML-схем в полуавтоматическом или полностью автоматическом режиме [8, 9].

Анализ современных тенденций цифровой трансформации инженерно-геологических изысканий позволяет выделить несколько ключевых направлений ее развития.

Во-первых, ожидается дальнейшее развитие и практическое закрепление схемы данных IFC 4.3 для инженерно-геологических задач. Появление специализированных классов объектов (IfcGeotechnicalStratum, IfcBorehole и др.) уже позволяет описывать 3D-геометрию геологических тел, их стратиграфические и инженерно-геологические характеристики, а также привязку к расчетным схемам и элементам конструкций [36, 37]. Однако необходимо учитывать, что IFC изначально создавался как формат для цифрового моделирования зданий и сооружений, а не геологического пространства, и даже расширенная геотехническая схема версии 4.3 не охватывает всего многообразия инженерно-геологических сущностей, характеризующихся собственными признаками (строением, составом, свойствами, состоянием). Поэтому само по себе наличие геологических классов в IFC еще не обеспечивает однозначности: при отсутствии жестких правил разные вендоры и пользователи будут по-разному выполнять информационное наполнение классов объектов (например, IfcGeotechnicalStratum), и проблема неоднозначности кодирования возникнет уже внутри самого IFC. Именно поэтому необходима разработка национальных или отраслевых профилей обмена – определений представления модели (Model View Definition, MVD) и спецификаций информационных требований (Information Delivery Specification, IDS). То есть это должны быть открытые и официально опубликованные спецификации, которые жестко формализуют состав, структуру и качество данных в IFC-моделях инженерно-геологических массивов и тем самым задают требуемую каноничность для последующего использования в расчетных комплексах и на ТИМ-платформах [12, 43]. В содержательном плане в каждом таком профиле должны быть заданы как минимум:

- обязательный перечень применяемых IFC-классов для инженерно-геологических сущностей – IfcBorehole, IfcGeotechnicalStratum, зон специфических грунтов и процессов, поверхностей подземных вод;
- правила заполнения обязательных наборов свойств (PSets) с указанием типов данных, единиц измерения и допустимых значений показателей согласно классификаторам;
- машиночитаемые правила проверки (IDS), задающие требования к составу, полноте и качеству модели и допускающие автоматическую валидацию перед передачей данных.

Разработка и апробация конкретной структуры такого профиля будут предметами дальнейших исследований авторов.

Во-вторых, будет усиливаться роль национальных XML-схем как нормативного слоя цифровой среды строительства. Минстрой России публикует и регулярно обновляет XML-схемы для сметных расчетов, проектной документации, заключений экспертизы и исполнительной документации, а также анонсирует схемы для отчетов по инженерным изысканиям [8, 9, 44]. Перспективным является интеграционный сценарий, в котором 3D-модель инженерно-геологического массива формируется и развивается в формате IFC 4.3, а необходимая для экспертизы атрибутивная информация автоматически транслируется в XML-документы, соответствующие национальным XML-схемам. Аналогичный подход уже реализуется, например в Москве, где для архитектурно-градостроительных решений вместе с IFC-моделью требуется предоставлять ведомости в формате XML [12, 41].

В-третьих, важным направлением станет методологическая и технологическая проработка сквозного потока данных от полевых и лабораторных наблюдений до ЦИМ ИГМ и ве-

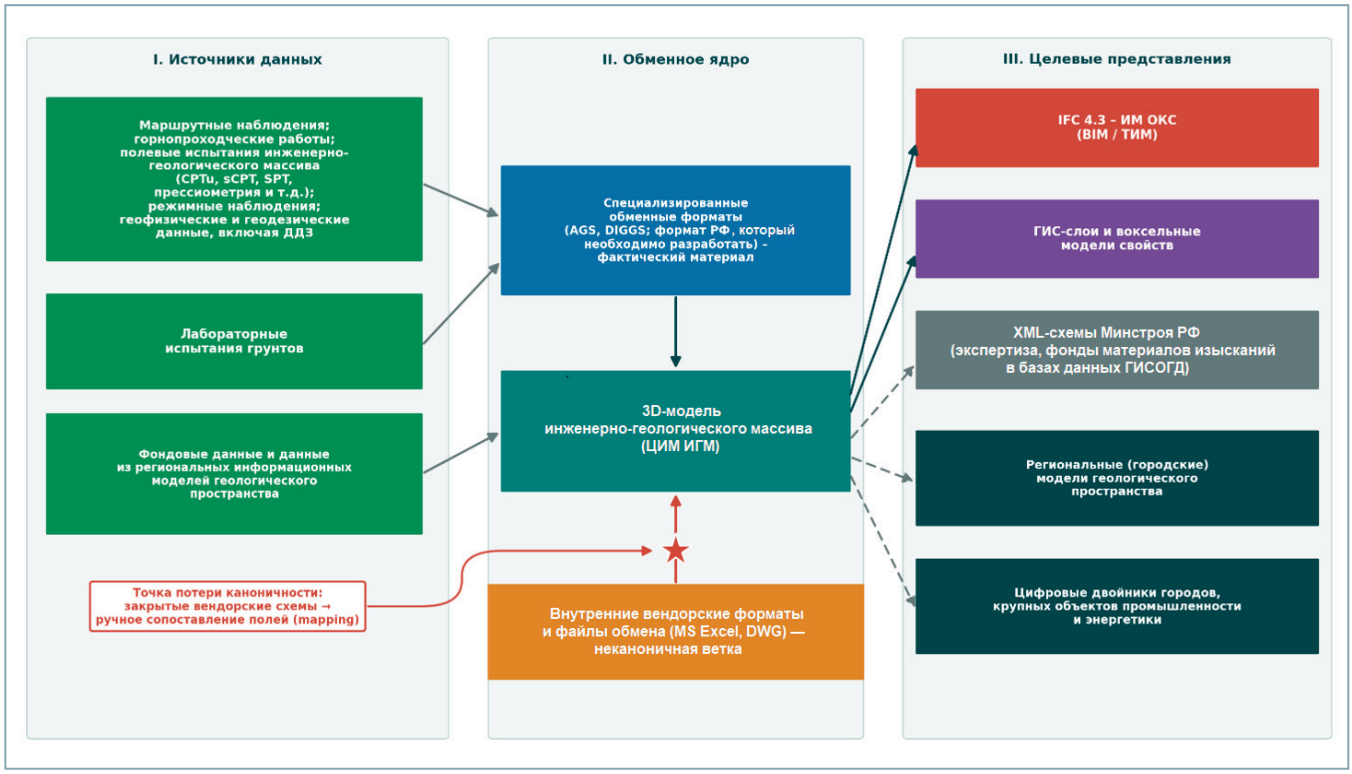


Рис. 3. Схема сквозного потока данных от результатов инженерно-геологических изысканий до ЦИМ ИГМ и ИМ ОКС с обозначением точки потери каноничности. *Примечания:* сплошные стрелки – основной поток данных к цифровой модели; штриховые стрелки – нормативная/региональная выдача данных; ДДЗ – данные дистанционного зондирования Земли; ГИСОГД – Государственная информационная система обеспечения градостроительной деятельности (остальные аббревиатуры были раскрыты в тексте статьи); точкой потери каноничности выступает этап перехода от закрытых вендорских схем данных к вынужденному ручному сопоставлению полей данных (Data Mapping), что нарушает автоматизацию сквозного потока и вносит риск ошибок из-за человеческого фактора

домственных хранилищ [4, 7] (рис. 3). Речь идет о выработке согласованных правил трансформации данных из специализированных инженерно-геологических форматов (AGS, DIGGS) [13–15] и внутренних форматов отечественных комплексов в набор согласованных представлений – ГИС-слоев (включая воксельные модели свойств), 3D-геологических моделей, IFC-объектов и XML-документов. В рамках этого потока табличные форматы фактических данных (AGS/DIGGS) служат источниками атрибутики и метаданных точек наблюдений, которые при построении 3D-модели привязываются к геометрии геологических тел и далее экспортируются в виде файлов в форматах IFC и XML. Реализация такого подхода потребует создания отраслевых конвертеров и сервисов, поддерживающих единые классификаторы, системы координат и идентификаторы объектов. При этом обязательным требованием к таким сервисам должно стать наличие автоматизированного механизма для перехода между географическими и местными системами координат [12]. На рисунке 3 приведена обобщенная схема такого сквозного потока данных (от результатов полевых и лабораторных наблюдений до интеграции в ИМ ОКС) с обозначением ключевой точки потери каноничности.

В-четвертых, важной перспективой представляется апробация предлагаемой архитектуры в пилотных проектах по созданию ЦИМ ИГМ для крупных инфраструктурных и градостроительных объектов. Такие проекты позволят оценить технологическую реализуемость связки форматов (AGS / DIGGS / внутриотраслевые форматы → IFC 4.3 → XML-документы Минстроя РФ) и количественно показать эффекты от перехода к ЦИМ ИГМ (снижение доли ручного ввода; уменьшение числа ошибок; повышение сопоставимости результатов изысканий и проектных решений; быстрая количественная оценка геологических и инженерно-геологических рисков, особенно на стадиях финансового планирования).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что используемые форматы представления инженерно-геологической информации и обмена ею формируются как совокупность разнородных решений, ориентированных на отдельные стадии изысканий, и в целом не обеспечивают сквозной прослеживаемости данных от этапа полевых и лабораторных наблюдений до построения трехмерных моделей, используемых при расчетах оснований, оценке устойчивости склонов и прогнозе последствий строительства [4, 7]. Специализированные инженерно-геологические форматы (AGS, DIGGS) достаточно полно описывают

фактический материал, но практически не отражают пространственную структуру инженерно-геологических массивов. Геологические и ГИС-ориентированные форматы (GeoSciML, Geo3DML) адекватно описывают геологическое строение, но слабо приспособлены к решению задач на уровне конкретных объектов капитального строительства (строительной площадки). CAD-форматы передают геометрию, но лишены открытой семантики [13, 14, 19, 20]. При этом важнейшей задачей становится разработка национальных классификаторов инженерно-геологических сущностей и адаптация или полная переработка форматов AGS и (или) DIGGS под требования и терминологическую базу российской школы инженерно-геологических исследований, а также под российские нормативные требования, включая ГОСТ 25100, но не ограничиваясь им.

В этих условиях формат IFC 4.3 целесообразно рассматривать как ключевой элемент объектно-пространственного описания инженерно-геологических массивов в составе ИМ ОКС [34, 35]. Введение специализированных геотехнических классов создает возможность формализованного представления геометрии геологических тел, зон техногенно нарушенных грунтов, поверхностей кровли и подошвы стратиграфических подразделений, а также возможность привязки данных к точкам наблюдений и местам отбора образцов [36, 37]. Это позволяет описывать инженерно-геологические условия и параметры грунтов (прочностные, деформационные, фильтрационные) непосредственно в структуре 3D-модели, ориентированной на расчеты напряженно-деформированного состояния оснований, анализ фильтрационного режима и оценку геологических рисков. Вместе с тем IFC 4.3 не подменяет собой национальные регламенты представления результатов изысканий [39, 40].

Принципиально важно, что IFC изначально разрабатывался как формат описания строительных объектов, а не геологического пространства, поэтому его структура (даже в последней версии с геотехническими классами) не позволяет полностью описать все многообразие инженерно-геологических данных и сущностей. Следовательно, само по себе применение IFC 4.3 не гарантирует однозначности представления данных: без открытой и официально опубликованной спецификации (профиля MVD/IDS), жестко задающей каноничность семантической схематизации, одни и те же сущности будут кодироваться разными способами – и проблема несовместимости данных воспроизведется уже на уровне самого IFC. Таким образом, ключевым условием пригодности формата для сквозного обмена является не столько наличие в нем инженерно-геологических сущностей, сколько наличие открытой, формально заданной и официально опубликованной спецификации, гарантирующей единый способ представления каждой сущности [12, 43]. Разработку и применение такой спецификации планируется продемонстрировать в результатах дальнейших исследований.

Наиболее обоснованной представляется концепция двухуровневого (двухконтурного) представления инженерно-геологической информации. В рамках этой концепции IFC 4.3 и национальные XML-схемы функционируют как взаимодополняющие компоненты единой цифровой среды. На объектно-пространственном уровне формируется трехмерная цифровая информационная модель инженерно-геологического массива, включающая иерархически соподчиненные геологические тела (стратиграфические, генетические, литологические и состояния), зоны специфических грунтов и процессов, поверхности подземных вод и пространственное распределение расчетных характеристик в формате IFC 4.3 [34, 36, 37]. На нормативно-отчетном уровне из этой модели и исходного фактического материала формируются машиночитаемые XML-документы, соответствующие действующим схемам и предназначенные для государственной экспертизы и ведения фондов [8, 9, 44].

Отдельно необходимо констатировать, что цифровая информационная модель инженерно-геологического массива в рамках формирования информационной модели объекта капитального строительства является подсистемой инженерной цифровой модели геологического пространства как независимой части ИМ ОКС, а никак не инженерной цифровой модели местности. Речь идет о принципиально разных сущностях – геологическом пространстве, расположенном ниже дневной поверхности, и объектах местности, расположенных на дневной поверхности и выше нее. В этой связи представляется необходимой незначительная корректировка ГОСТ Р 10.00.00.01 [42] с добавлением нескольких определений, одним из которых является следующее: «Цифровая информационная модель инженерно-геологического массива (ЦИМ ИГМ) – объектно-ориентированная параметрическая трехмерная модель геологического пространства, являющаяся независимой неотъемлемой частью информационной модели объекта капитального строительства (ИМ ОКС). Представляет собой иерархическую систему геологических тел, в том числе инженерно-геологических тел состояния, насыщенных атрибутивными инженерно-геологическими данными, выраженную в объемно-блочном/конечноэлементном или твердотельном виде».

Реализация указанной выше концепции предполагает решение ряда научно-методических и технологических задач:

- разработку национального профиля IFC 4.3 для инженерно-геологических моделей [12, 43];
- формализацию требований к составу и качеству данных в виде машиночитаемых спецификаций, согласованных с XML-схемами [8, 9];

- разработку типовых сценариев трансформации данных от полевых наблюдений и лабораторных испытаний (AGS/DIGGS) до ЦИМ ИГМ и XML-документов [4, 7, 14, 15].

Еще одним важным направлением является апробация подхода на пилотных объектах, в том числе в сложных инженерно-геологических условиях, с оценкой влияния внедрения ЦИМ ИГМ на качество прогнозирования, надежность расчетов и эффективность государственной экспертизы. Результаты такой апробации могут стать основой для последующей стандартизации цифрового инженерно-геологического моделирования в контексте обеспечения экологической безопасности, управления строительной деятельностью на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства (включая их эксплуатацию и снос), а также в контексте устойчивого развития территорий.

Список литературы

1. Постановление Правительства РФ от 05.03.2021 № 331 «Об установлении случаев, при которых застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства» (в ред. от 20.12.2022 № 2357). URL: https://base.garant.ru/400424628/ (дата обращения: 07.06.2026).
2. Постановление Правительства РФ от 17.05.2024 № 614 «Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства, состава сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель объекта капитального строительства и представляемых в форме электронных документов, и требований к форматам указанных электронных документов». URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=471103 (дата обращения: 07.06.2026).
3. Барвашов В.А., Болдырев Г.Г., Даянов С.Н., Грицкив Ю.И., Карпов А.А., Полидовец В.В., Мелихова Т.Ю. О выборе единого электронного формата обмена данными инженерно-геологических изысканий // Проектирование и инженерные изыскания. 2012. № 3 (17). С. 1–10.
4. Жидков Р.Ю., Абакумова Н.В., Ракитина Н.Н., Лесников Г.А., Рекун В.С., Петров А.К. Оценка точности и достоверности инженерно-геологических моделей на основе принципов машинного обучения // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2023. № 6. С. 4–15. DOI: 10.31857/S0869780923060115.
5. Ракитина Н.Н., Жидков Р.Ю. Цифровизация данных инженерно-геологических изысканий. Взгляд изнутри // Геоинфо. 2024. Т. 6, № 11. С. 6–16. DOI: 10.58339/2949-0677-2024-6-11-6-16.
6. Обмен данными 3D-модели. Обрезка и учет отдельных 3D-тел // КРЕДО Диалог. 2025. 17 марта. URL: https://credo-dialogue.ru/stati/obmen-dannymi-3d-modeli-obrezka-i-uchet-otdelnyh-3d-tel.html (дата обращения: 07.06.2026).
7. Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х. Информационное моделирование в геотехнике. Пенза: ООО НПП «Геотек», 2020. URL: https://npp-geotek.com/upload/iblock/b55/p8g6ob3rqow8ao1ehhks48q2jjq3q2le.pdf (дата обращения: 07.06.2026).
8. XML-схемы для информационного моделирования объектов капитального строительства // Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации [официальный сайт]. URL: https://minstroyrf.gov.ru/tim/xml-skhemy/ (дата обращения: 07.06.2026).
9. Минстрой России опубликовал обновленные XML-схемы для этапа инженерных изысканий и проектирования // Госэкспертиза Республики Татарстан [официальный сайт]. 2025. 9 января. URL: https://www.gosekspertiza-rt.ru/press-center/news/minstroy-rossii-opublikoval-obnovlennye-xml-skhemy-dlya-etapa-inzhenernykh-izyskaniy-i-proektirovani/ (дата обращения: 07.06.2026).
10. ГОСТ Р 57563-2017/ISO/TS 12911:2012. Моделирование информационное в строительстве. Основные положения по разработке стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2017. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200146763 (дата обращения: 07.06.2026).
11. СП 333.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла. М.: Минстрой России, 2020. URL: https://docs.cntd.ru/document/573514520 (дата обращения: 07.06.2026).
12. Требования к IFC-модели для согласования архитектурно-градостроительных решений в г. Москве. М.: ООО «РЕКРО», 2026. URL: https://rekro.ru/articles/trebovaniya-k-materialam-v-formate-ifc/ (дата обращения: 07.06.2026).
13. AGS Data Format // Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists [официальный сайт]. URL: https://www.ags.org.uk/data-format/ (дата обращения: 07.06.2026).
14. Toll D.G., Walthall S., Sharma S. Format for geotechnical data exchange in the United Kingdom // Transportation Research Record. 2001. Vol. 1755. № 1. P. 19–24. DOI: 10.3141/1755-03.
15. Welcome to DIGGS // Geo-Institute of ASCE [официальный сайт]. URL: https://www.geoinstitute.org/special-projects/diggs (дата обращения: 07.06.2026).
16. Weaver S.D., Lefchik T., Hoit M., Beach K. Geoenvironmental and geotechnical data exchange: setting the standard // GeoCongress 2008. Reston: ASCE, 2008. DOI: 10.1061/40972(311)70.

17. DIGGS Version 3.0 Released: Enhanced Capabilities for Geotechnical Data Exchange // Geo-Institute of ASCE [официальный сайт]. 2024. URL: https://www.geoinstitute.org/news/diggs3release (дата обращения: 07.06.2026).
18. Cutts R. MWD Data Exchange using the DIGGS Schema // Proc. of the Deep Foundations Institute. 2025. DOI: 10.37308/mwd.160309.
19. OGC GeoSciML Standard // Open Geospatial Consortium [официальный сайт]. URL: https://www.ogc.org/standards/geosciml/ (дата обращения: 07.06.2026).
20. GeoSciML data standard becomes official // British Geological Survey [официальный сайт]. 2024. URL: https://www.bgs.ac.uk/news/geosciml-data-standard-becomes-official/ (дата обращения: 07.06.2026).
21. Wang Z., Qu H., Wu Z., Wang X. Geo3DML: a standard-based exchange format for 3D geological models // Computers & Geosciences. 2018. Vol. 110. P. 54–64. DOI: 10.1016/j.cageo.2017.09.008.
22. OGC GeoPackage Encoding Standard // Open Geospatial Consortium [официальный сайт]. URL: https://www.ogc.org/standards/geopackage/ (дата обращения: 07.06.2026).
23. OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard // Open Geospatial Consortium [официальный сайт]. URL: https://www.ogc.org/standards/citygml/ (дата обращения: 07.06.2026).
24. Subsurface and geological features – 3D Workflows // Esri ArcGIS Pro Documentation [электронный ресурс]. URL: https://doc.arcgis.com/en/3d/workflows/visualization/subsurface-geological-layers.htm (дата обращения: 07.06.2026).
25. Micić K., Bui H.-G., Ninić J. Computer-aided ground modelling incorporating soil variability for geotechnical applications // SETC Proceedings. 2025. DOI: 10.5937/setc25026m.
26. Introduction to CAD data // Esri ArcGIS Pro Documentation [электронный ресурс]. URL: https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/help/data/cad/what-is-cad-data.html (дата обращения: 07.06.2026).
27. DWG vs DXF: What's the Difference? // ZWSOFT [электронный ресурс]. 2026. URL: https://www.zwsoft.com/blog/dwg-vs-dxf (дата обращения: 07.06.2026).
28. Save As DWG/DXF Options Dialog. Entity Mapping // Bentley MicroStation Help [электронный ресурс]. URL: https://docs.bentley.com/LiveContent/web/MicroStation%20Help-v21/en/GUID-DB5E6FD2-F729-A796-180F-791DE8639209.html (дата обращения: 07.06.2026).
29. How To: Convert TIN Surfaces from a LandXML File to a Raster Dataset // Esri Knowledge Base [электронный ресурс]. 2024. URL: https://support.esri.com/en-us/knowledge-base/how-to-convert-tin-surfaces-from-a-landxml-file-to-a-ra-000032967 (дата обращения: 07.06.2026).
30. Using Property Sets in Civil 3D for Field Inspection Data // ZenTek Consultants [электронный ресурс]. 2024. URL: https://zentekconsultants.net/using-property-sets-in-civil-3d-for-field-inspection-data/ (дата обращения: 07.06.2026).
31. Automated Property Set Data. Part 1 // IMAGINiT Technologies [электронный ресурс]. 2025. URL: https://resources.imaginit.com/civil-solutions-blog/automated-property-set-data-part-1 (дата обращения: 07.06.2026).
32. Wu J., Chen J., Chen G. et al. Development of data integration and sharing for geotechnical engineering information modeling based on IFC // Advances in Civil Engineering. 2021. Article 8884864. DOI: 10.1155/2021/8884864.
33. ISO 16739-1:2024. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. Part 1: Data schema. Geneva: ISO, 2024. URL: https://www.iso.org/standard/84123.html (дата обращения: 07.06.2026).
34. ГОСТ Р 10.0.02-2019/ИСО 16739-1:2018. Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Отраслевые базовые классы (IFC) для обмена и управления данными об объектах строительства. Часть 1. Схема данных. М.: Стандартинформ, 2019. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200164870 (дата обращения: 07.06.2026).
35. Infrastructure Domain // buildingSMART International [электронный ресурс]. URL: https://www.buildingsmart.org/standards/domains/infrastructure/ (дата обращения: 07.06.2026).
36. IfcBorehole // IFC 4.3. IFC 4.3.2.20260630 (IFC4X3_ADD2) under development [электронный ресурс]. URL: https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IfcBorehole.htm (дата обращения: 07.06.2026).
37. IfcGeotechnicalStratum // IFC 4.3. IFC 4.3.2.20260630 (IFC4X3_ADD2) under development [электронный ресурс]. URL: https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IfcGeotechnicalStratum.htm (дата обращения: 07.06.2026).
38. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний (с изменением № 1). М.: Стандартинформ, 2013. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200096130 (дата обращения: 13.06.2026).
39. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 (с изменением № 1). М.: Минстрой России, 2016. URL: https://docs.cntd.ru/document/456045544 (дата обращения: 07.06.2026).
40. Новые требования к информационному моделированию в строительстве: что нужно знать застройщикам // Госэкспертиза Республики Татарстан [официальный сайт]. 2025. 22 мая. URL: https://gosekspertiza-rt.ru/press-center/news/novye-trebovaniya-k-informatsionnomu-modelirovaniyu-v-stroitelstve-chto-nuzhno-znat-zastroyshchikam/ (дата обращения: 07.06.2026).
41. Требования к материалам и результатам инженерных изысканий, представляемым для прохождения экспертизы в электронном виде. М.: государственное автономное учреждение города Москвы «Московская государственная экспертиза»,

2020. URL: https://www.mos.ru/upload/documents/files/6083/06_TrebovaniyakrezyltatamII_11v2.pdf (дата обращения: 07.06.2026).

42. ГОСТ Р 10.00.00.01-2025. Единая система информационного моделирования. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации, 2025. URL: https://docs.cntd.ru/document/1312255804 (дата обращения: 13.06.2026).
43. Смирнов Д. Стандарты ISO 19650 как основа информационного менеджмента в строительстве // Айбим [официальный сайт компании]. 18.01.2024 (обновл. 16.03.2026). URL: https://bim-info.ru/articles/standarty-iso-19650-kak-osnova-informatsionnogo-menedzhmenta-v-stroitelstve/ (дата обращения: 07.06.2026).
44. Лесников Н.А. Технологии информационного моделирования в инженерных изысканиях. М.: ГБУ «Мосгоргеотрест», 2023. URL: https://vladimir-resin.ru/wp-content/uploads/Лесников-Н.А.pdf (дата обращения: 07.06.2026).

References

1. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 05.03.2021 № 331 “Ob ustanovlenii sluchaev, pri kotorykh zastroishchikom, tekhnicheskim zakazchikom, litsom, obespechivayushchim ili osushchestvlyayushchim podgotovku obosnovaniya investitsii, i (ili) litsom, otvetstvennym za ekspluatatsiyu ob"ekta kapital'nogo stroitel'stva, obespechivayutsya formirovanie i vedenie informatsionnoi modeli ob"ekta kapital'nogo stroitel'stva” (v red. ot 20.12.2022 № 2357) [Decree of the Government of the Russian Federation № 331 of 05.03.2021 “On establishing cases in which the developer, technical customer, person ensuring or carrying out the preparation of the investment justification, and (or) the person responsible for the operation of a capital construction facility shall ensure the creation and maintenance of the building information model” (as amended on 20.12.2022, № 2357)]. URL: https://base.garant.ru/400424628/ (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).
2. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 17.05.2024 № 614 “Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 17.05.2024 № 614 «Ob utverzhdenii Pravil formirovaniya i vedeniya informatsionnoi modeli ob"ekta kapital'nogo stroitel'stva, sostava svedenii, dokumentov i materialov, vklyuchaemykh v informatsionnuyu model' ob"ekta kapital'nogo stroitel'stva i predstavlyaemykh v forme elektronnykh dokumentov, i trebovanii k formatam ukazannykh elektronnykh dokumentov” [Decree of the Government of the Russian Federation № 614 of 17.05.2024 “On approval of the Rules for the creation and maintenance of the building information model, and the composition of information, documents, and materials included in the building information model and Submitted in the Form of Electronic Documents, and the Requirements for the Formats of the Specified Electronic Documents”]. URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=471103 (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).
3. Barvashov V.A., Boldyrev G.G., Dayanov S.N., Gritskiv Yu.I., Karpov A.A., Polidovets V.V., Melikhova T.Yu. O vybore edinogo elektronnogo formata obmena dannymi inzhenerno-geologicheskikh izyskanii [On the selection of a unified electronic data exchange format for engineering-geological investigations] // Proektirovanie i inzhenernye izyskaniya. 2012. № 3 (17). S. 1–10 (in Rus.).
4. Zhidkov R.Yu., Abakumova N.V., Rakitina N.N., Lesnikov G.A., Rekun V.S., Petrov A.K. Otsenka tochnosti i dostovernosti inzhenerno-geologicheskikh modelei na osnove printsipov mashinnogo obucheniya [Assessment of the accuracy and reliability of engineering-geological models based on machine learning principles] // Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. 2023. № 6. S. 4–15. DOI: 10.31857/S0869780923060115 (in Rus.).
5. Rakitina N.N., Zhidkov R.Yu. Tsifrovizatsiya dannykh inzhenerno-geologicheskikh izyskanii. Vzglyad iznutri [Digitalization of engineering-geological survey data. A look from the inside] // Geoinfo. 2024. T. 6, № 11. S. 6–16. DOI: 10.58339/2949-0677-2024-6-11-6-16 (in Rus.).
6. Obmen dannymi 3D-modeli. Obrezka i uchet otdel'nykh 3D-tel [3D model data exchange. Clipping and accounting for individual 3D bodies] // KREDO Dialog. 2025. 17 marta. URL: https://credo-dialogue.ru/stati/obmen-dannymi-3d-modeli-obrezka-i-uchet-otdelnyh-3d-tel.html (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).
7. Boldyrev G.G., Idrisov I.Kh. Informatsionnoe modelirovanie v geotekhnike [Information Modeling in Geotechnics]. Penza: OOO NPP «Geotek», 2020. URL: https://npp-geotek.com/upload/iblock/b55/p8g6ob3rqow8ao1ehhks48q2jjq3q2le.pdf (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).
8. XML-skhemy dlya informatsionnogo modelirovaniya ob"ektov kapital'nogo stroitel'stva [XML Schemas for Information Modeling of Capital Construction Facilities] // Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaistva Rossiiskoi Federatsii [ofitsial'nyi sait]. URL: https://minstroyrf.gov.ru/tim/xml-skhemy/ (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).
9. Minstroi Rossii opublikoval obnovlennye XML-skhemy dlya etapa inzhenernykh izyskanii i proektirovaniya [The Ministry of Construction of Russia Published Updated XML Schemas for the Engineering Survey and Design Stages] // Gosekspertiza Respubliki Tatarstan [ofitsial'nyi sait]. 2025. 9 yanvarya. URL: https://www.gosekspertiza-rt.ru/press-center/news/minstroy-rossii-opublikoval-obnovlennye-xml-skhemy-dlya-etapa-inzhenernykh-izyskaniy-i-proektirovani/ (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).
10. GOST R 57563-2017/ISO/TS 12911:2012. Modelirovanie informatsionnoe v stroitel'stve. Osnovnye polozheniya po razrabotke standartov informatsionnogo modelirovaniya zdanii i sooruzhenii [Information Modeling in Construction. General Principles for the Development of Building Information Modeling Standards]. M.: Standartinform, 2017. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200146763 (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).

11. SP 333.1325800.2020. Informatsionnoe modelirovanie v stroitel'stve. Pravila formirovaniya informatsionnoi modeli ob"ektov na razlichnykh stadiyakh zhiznennogo tsikla [Information Modeling in Construction. Rules for the Formation of an Information Model of Facilities at Different Life Cycle Stages]. M.: Minstroi Rossii, 2020. URL: https://docs.cntd.ru/document/573514520 (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).
12. Trebovaniya k IFC-modeli dlya soglasovaniya arkhitekturno-gradostroitel'nykh reshenii v g. Moskve [Requirements for IFC Models for Approval of Architectural and Urban Planning Solutions in Moscow]. M.: OOO «REKRO», 2026. URL: https://rekro.ru/articles/trebovaniya-k-materialam-v-formate-ifc/ (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).
13. AGS Data Format // Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists [Official Website]. URL: https://www.ags.org.uk/data-format/ (data obrashcheniya: 07.06.2026).
14. Toll D.G., Walthall S., Sharma S. Format for geotechnical data exchange in the United Kingdom // Transportation Research Record. 2001. Vol. 1755. № 1. P. 19–24. DOI: 10.3141/1755-03.
15. Welcome to DIGGS // Geo-Institute of ASCE [Official Website]. URL: https://www.geoinstitute.org/special-projects/diggs (data obrashcheniya: 07.06.2026).
16. Weaver S.D., Lefchik T., Hoit M., Beach K. Geoenvironmental and geotechnical data exchange: setting the standard // GeoCongress 2008. Reston: ASCE, 2008. DOI: 10.1061/40972(311)70.
17. DIGGS Version 3.0 Released: Enhanced Capabilities for Geotechnical Data Exchange // Geo-Institute of ASCE [Official Website]. 2024. URL: https://www.geoinstitute.org/news/diggs3release (data obrashcheniya: 07.06.2026).
18. Cutts R. MWD Data Exchange using the DIGGS Schema // Proc. of the Deep Foundations Institute. 2025. DOI: 10.37308/mwd.160309.
19. OGC GeoSciML Standard // Open Geospatial Consortium [Official Website]. URL: https://www.ogc.org/standards/geosciml/ (data obrashcheniya: 07.06.2026).
20. GeoSciML data standard becomes official // British Geological Survey [Official Website]. 2024. URL: https://www.bgs.ac.uk/news/geosciml-data-standard-becomes-official/ (data obrashcheniya: 07.06.2026).
21. Wang Z., Qu H., Wu Z., Wang X. Geo3DML: a standard-based exchange format for 3D geological models // Computers & Geosciences. 2018. Vol. 110. P. 54–64. DOI: 10.1016/j.cageo.2017.09.008.
22. OGC GeoPackage Encoding Standard // Open Geospatial Consortium [Official Website]. URL: https://www.ogc.org/standards/geopackage/ (data obrashcheniya: 07.06.2026).
23. OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard // Open Geospatial Consortium [Official Website]. URL: https://www.ogc.org/standards/citygml/ (data obrashcheniya: 07.06.2026).
24. Subsurface and geological features – 3D Workflows // Esri ArcGIS Pro Documentation [Electronic Resource]. URL: https://doc.arcgis.com/en/3d/workflows/visualization/subsurface-geological-layers.htm (data obrashcheniya: 07.06.2026).
25. Mićić K., Bui H.-G., Ninić J. Computer-aided ground modelling incorporating soil variability for geotechnical applications // SETC Proceedings. 2025. DOI: 10.5937/setc25026m.
26. Introduction to CAD data // Esri ArcGIS Pro Documentation [Electronic Resource]. URL: https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/help/data/cad/what-is-cad-data.html (data obrashcheniya: 07.06.2026).
27. DWG vs DXF: What's the Difference? // ZWSOFT [Electronic Resource]. 2026. URL: https://www.zwsoft.com/blog/dwg-vs-dxf (data obrashcheniya: 07.06.2026).
28. Save As DWG/DXF Options Dialog. Entity Mapping // Bentley MicroStation Help [Electronic Resource]. URL: https://docs.bentley.com/LiveContent/web/MicroStation%20Help-v21/en/GUID-DB5E6FD2-F729-A796-180F-791DE8639209.html (data obrashcheniya: 07.06.2026).
29. How To: Convert TIN Surfaces from a LandXML File to a Raster Dataset // Esri Knowledge Base [Electronic Resource]. 2024. URL: https://support.esri.com/en-us/knowledge-base/how-to-convert-tin-surfaces-from-a-landxml-file-to-a-ra-000032967 (data obrashcheniya: 07.06.2026).
30. Using Property Sets in Civil 3D for Field Inspection Data // ZenTek Consultants [Electronic Resource]. 2024. URL: https://zentekconsultants.net/using-property-sets-in-civil-3d-for-field-inspection-data/ (data obrashcheniya: 07.06.2026).
31. Automated Property Set Data. Part 1 // IMAGINiT Technologies [Electronic Resource]. 2025. URL: https://resources.imaginit.com/civil-solutions-blog/automated-property-set-data-part-1 (data obrashcheniya: 07.06.2026).
32. Wu J., Chen J., Chen G. et al. Development of data integration and sharing for geotechnical engineering information modeling based on IFC // Advances in Civil Engineering. 2021. Article 8884864. DOI: 10.1155/2021/8884864.
33. ISO 16739-1:2024. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. Part 1: Data schema. Geneva: ISO, 2024. URL: https://www.iso.org/standard/84123.html (data obrashcheniya: 07.06.2026).
34. GOST R 10.0.02-2019/ISO 16739-1:2018. Sistema standartov informatsionnogo modelirovaniya zdanii i sooruzhenii. Otraslevye bazovye klassy (IFC) dlya obmena i upravleniya dannymi ob ob"ektakh stroitel'stva. Chast' 1. Skhema dannykh [System of Standards for Information Modeling of Buildings and Structures. Industry Foundation Classes (IFC) for Data Exchange and Management of Information on Construction Facilities. Part 1: Data Schema]. M.: Standartinform, 2019. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200164870 (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).

35. Infrastructure Domain // buildingSMART International [Electronic Resource]. URL: https://www.buildingsmart.org/standards/domains/infrastructure/ (data obrashcheniya: 07.06.2026).
36. IfcBorehole // IFC 4.3. IFC 4.3.2.20260630 (IFC4X3_ADD2) under development [Electronic Resource]. URL: https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IfcBorehole.htm (data obrashcheniya: 07.06.2026).
37. IfcGeotechnicalStratum // IFC 4.3. IFC 4.3.2.20260630 (IFC4X3_ADD2) under development [Electronic Resource]. URL: https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IfcGeotechnicalStratum.htm (data obrashcheniya: 07.06.2026).
38. GOST 20522-2012. Grunty. Metody statisticheskoi obrabotki rezul'tatov ispytanii (s izmeneniem № 1) [Soils. Methods of Statistical Processing of Test Results (with Amendment № 1).]. M.: Standartinform, 2013. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200096130 (data obrashcheniya: 13.06.2026) (in Rus.).
39. SP 47.13330.2016. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 11-02-96 (s izmeneniem № 1) [Engineering Surveys for Construction. General Provisions. Updated Edition of SNiP 11-02-96 (with Amendment № 1)]. M.: Minstroi Rossii, 2016. URL: https://docs.cntd.ru/document/456045544 (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).
40. Novye trebovaniya k informatsionnomu modelirovaniyu v stroitel'stve: chto nuzhno znat' zastroishchikam [New Requirements for Information Modeling in Construction: What Developers Need to Know] // Gosekspertiza Respubliki Tatarstan [ofitsial'nyi sait]. 2025. 22 maya. URL: https://gosekspertiza-rt.ru/press-center/news/novye-trebovaniya-k-informatsionnomu-modelirovaniyu-v-stroitelstve-chto-nuzhno-znat-zastroyshchikam/ (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).
41. Trebovaniya k materialam i rezul'tatam inzhenernykh izyskanii, predstavlyaemym dlya prokhozhdeniya ekspertizy v elektronnom vide [Requirements for Materials and Results of Engineering Surveys Submitted for Expert Review in Electronic Form]. M.: gosudarstvennoe avtonomnoe uchrezhdenie goroda Moskvy «Moskovskaya gosudarstvennaya ekspertiza», 2020. URL: https://www.mos.ru/upload/documents/files/6083/06_TrebovaniyakrezyltatamII_11v2.pdf (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).
42. GOST R 10.00.00.01-2025. Edinaya sistema informatsionnogo modelirovaniya. Terminy i opredeleniya [Unified Information Modeling System. Terms and Definitions]. M.: Rossiiskii institut standartizatsii, 2025. URL: https://docs.cntd.ru/document/1312255804 (data obrashcheniya: 13.06.2026) (in Rus.).
43. Smirnov D. Standarty ISO 19650 kak osnova informatsionnogo menedzhmenta v stroitel'stve [ISO 19650 Standards as the Basis for Information Management in Construction] // Aibim [ofitsial'nyi sait kompanii]. 18.01.2024 (obnovl. 16.03.2026). URL: https://bim-info.ru/articles/standarty-iso-19650-kak-osnova-informatsionnogo-menedzhmenta-v-stroitelstve/ (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).
44. Lesnikov N.A. Tekhnologii informatsionnogo modelirovaniya v inzhenernykh izyskaniyakh [Information Modeling Technologies in Engineering Surveys]. M.: GBU «Mosgorgeotrest», 2023. URL: https://vladimir-resin.ru/wp-content/uploads/Lesnikov-N.A.pdf (data obrashcheniya: 07.06.2026) (in Rus.).

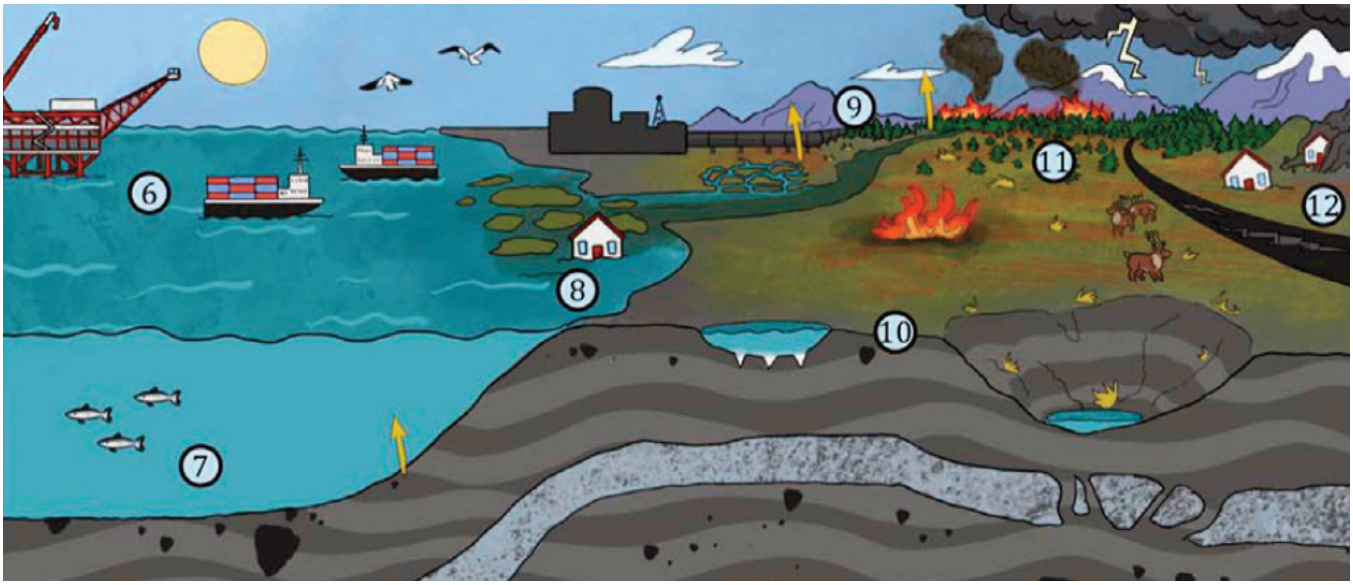
Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо» выходит в формате *PDF. 4 выпуска в 2026 году.

WWW.GEOINFO.RU

DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-98-119

УДК 502; 504; 551.34; 551.588; 574; 620.9



НЕОБХОДИМО СВЕСТИ К НУЛЮ ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ПРИ СЖИГАНИИ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ, ЧТОБЫ ЗАЩИТИТЬ ЭКОСИСТЕМЫ КРИОЛИТОЗОНЫ

Поступила 2.03.2026
Принята к публикации 2.03.2026
Опубликована 27.07.2026

ЭББОТТ Б.У.
Кафедра прикладной ботаники и наук о дикой природе, Университет Бригама Янга, г. Прово, штат Юта, США
benabbott@byu.edu

БРАУН М.
Компания Innovative Breakthrough Energy Technology («Инновационные передовые энергетические технологии»), Рабочая группа по изучению обратной связи между циклом углерода и многолетней мерзлотой, Институт «Каскад» (Cascade), г. Колвуд, пров. Британская Колумбия, Канада

КЭРИ Дж.К.
Отделение математики и естественных наук, Колледж Бабсона, г. Уэллсли, штат Массачусетс, США

ЭРНАКОВИЧ Дж.
Кафедра природных ресурсов и окружающей среды, Университет Нью-Гэмпшира, г. Дарем, штат Нью-Гэмпшир, США

ФРЕДЕРИК Дж.М.
Сандийские национальные лаборатории, г. Альбукерке, штат Нью-Мексико, США

ГО Л.
Школа (факультет) гидрологии и экосистем пресных вод, Университет Висконсина в Милуоки, г. Милуоки, штат Висконсин, США

ХУГЕЛИУС Г.
Центр климатических исследований Болина и кафедра физической географии, Стокгольмский университет, г. Стокгольм, Швеция

ЛИ Р.М.
Кафедра прикладной ботаники и наук о дикой природе, Университет Бригама Янга, г. Прово, штат Юта, США

ЛОРАНТИ М.М.
Кафедра географии, Университет Колгейта, г. Гамильтон, штат Нью-Йорк, США

МАКДОНАЛЬД Р.
Институт океанологии, г. Сидни, пров. Британская Колумбия, Канада

МАНН П.Дж.
Факультет (школа) географии и наук об окружающей среде, Университет Нортумбрии, г. Ньюкасл-апон-Тайн, Великобритания

НАТАЛИ С.М.
Центр климатических исследований Вудвелла, г. Фалмут, штат Массачусетс, США

ОЛЕФЕЛЬДТ Д.
Кафедра возобновляемых ресурсов, Университет Альберты, г. Эдмонтон, пров. Альберта, Канада

ПИРСОН П.
Международная инициатива (организация) по климату криосферы, г. Полет, штат Вермонт, Соединенные Штаты

РЕК А.
Школа окружающей среды и природных ресурсов имени Рубенштейна, Вермонтский университет, г. Берлингтон, штат Вермонт, США

РОБАРДС М.
Общество охраны дикой природы, программа «Арктическая Берингия», г. Фэрбенкс, штат Аляска, США

СЭЛМОН В.Г.
Отдел наук об окружающей среде и Институт изучения изменений климата, Окриджская национальная лаборатория, г. Ок-Ридж, штат Теннесси, США

САЙЕДИ С.С.
Кафедра прикладной ботаники и наук о дикой природе, Университет Бригама Янга, г. Прово, штат Юта, США

ШЕДЕЛЬ К.
Университет Северной Аризоны, г. Флагстафф, штат Аризона, США

ШУУР Э.А.Г.
Университет Северной Аризоны, г. Флагстафф, штат Аризона, США

ШАКИЛ С.
Кафедра биологии, Университет Альберты, г. Эдмонтон, пров. Альберта, Канада

ШОГРЕН А.Дж.
Кафедра биологии, Университет Алабамы, г. Таскалуса, штат Алабама, США

ШТРАУСС Й.
Отдел исследований многолетней мерзлоты, Центр полярных и морских исследований «Институт Альфреда Вегенера» имени Гельмгольца, г. Потсдам, Германия

ТАНК С.Э.
Кафедра биологии, Университет Альберты, г. Эдмонтон, пров. Альберта, Канада

ТОРНТОН Б.Ф.
Кафедра геологии и Центр климатических исследований имени Болина, Стокгольмский университет, г. Стокгольм, Швеция

ТРЕХАРН Р.
Центр климатических исследований Вудвелла, г. Фалмут, штат Массачусетс, США

ТУРЕЦКИ М.
Институт арктических и альпийских исследований, Колорадский университет в Боулдере, г. Боулдер, штат Колорадо, США

ФОЙГТ К.
Отделение биологии и наук об окружающей среде, Университет Восточной Финляндии, г. Куопио, Финляндия

РАЙТ Н.
Рабочая группа по изучению обратных связей в системе «углеродный цикл – многолетняя мерзлота», Институт «Каскад» (Cascade), г. Колвуд, пров. Британская Колумбия, Канада

ЯН Ю.
Государственная ведущая лаборатория по изучению изменений окружающей среды и растительного покрова, Институт ботаники Академии наук Китая, Университет Академии наук Китая, г. Пекин, Китай

ЗАРНЕЦКЕ Дж.П.
Кафедра наук о Земле и окружающей среде, Университет штата Мичиган, г. Ист-Лансинг, штат Мичиган, США

ЧЖАН Ц.
Кафедра прикладной ботаники и наук о дикой природе, Университет Бригама Янга, г. Прово, штат Юта, США

ЗОЛКОС С.
Гарвардский университет, г. Кембридж, штат Массачусетс, США; Центр климатических исследований Вудвелла, г. Фалмут, штат Массачусетс, США

АННОТАЦИЯ

Предлагаем вниманию читателей немного сокращенный адаптированный перевод обзорной статьи «Необходимо свести к нулю выбросы парниковых газов при сжигании ископаемых углеводородов, чтобы защитить экосистемы криолитозоны» (Abbott et al., 2022). Она была подготовлена большой международной группой исследователей и опубликована в рецензируемом журнале Frontiers in Environmental Science («Передовые рубежи наук об окружающей среде»), который выпускается швейцарским издательством Frontiers Media SA. Данная работа находится в открытом доступе на сайте указанного издательства (frontiersin.org) по лицензии CC BY 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять статью при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Abbott et al., 2022) приведена в конце.

Изменения климата представляют собой экзистенциальную угрозу для многолетней мерзлоты, широко распространенной по всему миру. Разнообразные человеческие сообщества, экологические системы и биогеохимические циклы этой десятой части планеты зависят от сохранения мерзлого состояния грунтов. Сложность, масштабность и удаленность экосистем криолитозоны затрудняют понимание того, насколько быстро происходят изменения и какие меры могут быть приняты в этом отношении. В данной работе мы обобщаем информацию о трансформациях на суше и в акваториях этой зоны с учетом их значения для глобальной политики.

Хотя многие вопросы остаются открытыми, уже известно, что продолжение сжигания ископаемого топлива несовместимо с дальнейшим существованием криолитозоны в ее нынешнем виде. Если мы не сумеем защитить ее экосистемы, то последствия для прав и возможностей человека, целостности биосферы и глобального климата будут крайне серьезными. Политические выводы очевидны: чем быстрее мы сократим антропогенные выбросы и снизим концентрацию углекислого газа в атмосфере, тем бОльшую часть

многолетней мерзлоты сможем сохранить. Целевые показатели по сокращению выбросов должны быть пересмотрены в сторону ужесточения и должны сопровождаться мерами по поддержке местного населения в целях защиты нетронутых экосистем и природных поглотителей углерода в криолитозоне.

Некоторые предлагаемые геоинженерные меры, такие как создание солнцезащитных экранов, изменение альбедо поверхности и манипуляции с растительностью, остаются непроверенными и могут усугублять экологическую несправедливость для сообществ, проживающих в этой зоне, не обеспечивая при этом долгосрочной защиты многолетнемерзлых пород. В то же время поразительные успехи в области возобновляемой энергетики (возобновляемых источников энергии) открыли реальные возможности сокращения антропогенных выбросов парниковых газов вдвое к 2030 году и их практически полного прекращения задолго до 2050 года.

Авторы статьи призывают лидеров, корпорации, исследователей и граждан всего мира признать глобальную значимость криолитозоны и работать над восстановлением климата и расширением прав и возможностей сообществ коренных народов и мигрантов в регионах распространения многолетней мерзлоты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

мерзлотно-климатические обратные связи; Арктика; бореальная зона; климатическая политика; возобновляемая энергетика, обратные связи в экосистемах; глобальное сохранение экосистем; криолитозона.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Эбботт Б.У., Браун М., Кэри Дж.К., Эрнакович Дж., Фредерик Дж.М., Го Л., Хугелиус Г., Ли Р.М., Лоранти М.М., Макдональд Р., Манн П.Дж., Натали С.М., Олефельдт Д., Пирсон П., Рек А., Робардс М., Сэлмон В.Г., Сайеди С.С., Шедель К., Шуур Э.А.Г., Шакил С., Шогрен А.Дж., Штраусс Й., Танк С.Э., Торнтон Б.Ф., Трехарн Р., Турецки М., Фойгт К., Райт Н., Ян Ю., Зарнецке Дж.П., Чжан Ц., Золкос С. Необходимо свести к нулю выбросы парниковых газов при сжигании ископаемых углеводородов, чтобы защитить экосистемы криолитозоны (пер. с англ.) // Геоинфо. 2026. Т. 8. № 1. С. 98–119. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-98–119 (in Rus.).

WE MUST STOP FOSSIL FUEL EMISSIONS TO PROTECT PERMAFROST ECOSYSTEMS

Received: 2.03.2026
Accepted for publication 2.03.2026
Published 27.07.2026

ABBOTT B.W.
Department of Plant and Wildlife Sciences, Brigham Young University, Provo, UT, United States
benabbott@byu.edu

BROWN M.
Innovative Breakthrough Energy Technology Ltd., Permafrost Carbon Feedback Action Group, Cascade Institute, Colwood, BC, Canada

CAREY J.C.
Division of Math and Science, Babson College, Wellesley, MA, United States

ERNAKOVICH J.
Department of Natural Resources and the Environment, University of New Hampshire, Durham, NH, United States

FREDERICK J.M.
Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, United States

GUO L.
School of Freshwater Sciences, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, WI, United States

HUGELIUS G.
Department of Physical Geography, Bolin Centre for Climate Research, Stockholm University, Stockholm, Sweden

LEE R.M.
Department of Plant and Wildlife Sciences, Brigham Young University, Provo, UT, United States

LORANTY M.M.
Department of Geography, Colgate University, Hamilton, NY, United States

MACDONALD R.
Institute of Ocean Science (IOS), Sidney, BC, Canada

MANN P.J.
Department of Geography and Environmental Sciences, Northumbria University, Newcastle-Upon-Tyne, United Kingdom

NATALI S.M.
Woodwell Climate Research Center, Falmouth, MA, United States

OLEFELDT D.
Department of Renewable Resources, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada

PEARSON P.
International Cryosphere Climate Initiative, Pawlet, VT, United States

REC A.
Rubenstein School of Environment and Natural Resources, University of Vermont, Burlington, VT, United States

ROBARDS M.
Wildlife Conservation Society, Arctic Beringia Program, Fairbanks, AK, United States

SALMON V.G.
Environmental Science Division and Climate Change Science Institute, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, United States

SAYEDI S.S.
Department of Plant and Wildlife Sciences, Brigham Young University, Provo, UT, United States

SCHADEL C.
Northern Arizona University, Flagstaff, AZ, United States

SCHUUR E.A.G.
Northern Arizona University, Flagstaff, AZ, United States

SHAKIL S.
Department of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada

SHOGREN A.J.
Department of Biological Sciences, The University of Alabama, Tuscaloosa, AL, United States

STRAUSS J.
Permafrost Research Section, Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Potsdam, Germany

TANK S.E.
Department of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada

THORNTON B.F.
Department of Geological Sciences and Bolin Centre for Climate Research, Stockholm University, Stockholm, Sweden

TREHARNE R.
Woodwell Climate Research Center, Falmouth, MA, United States

TURETSKY M.
University of Colorado Boulder, Institute of Arctic and Alpine Research (INSTAAR), Boulder, CO, United States

VOIGT C.
Department of Environmental and Biological Sciences, University of Eastern Finland, Kuopio, Finland

WRIGHT N.
Permafrost Carbon Feedback Action Group, Cascade Institute, Colwood, BC, Canada

YANG Yu.
State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

ZARNETSKE J.P.
Department of Earth and Environmental Sciences, Michigan State University, East Lansing, MI, United States

ZHANG Q.
Department of Plant and Wildlife Sciences, Brigham Young University, Provo, UT, United States

ZOLKOS S.
Harvard University, Cambridge, MA, United States; Woodwell Climate Research Center, Falmouth, MA, United States

ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the review article "We must stop fossil fuel emissions to protect permafrost ecosystems" (Abbott et al., 2022). The paper was prepared by a large international group of researchers and published in the peer-reviewed journal "Frontiers in Environmental Science", issued by the Swiss publisher "Frontiers Media SA". The article is available in open access on the publisher's website (frontiersin.org) under the CC BY 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits sharing, translating, adapting, and building upon the material, provided that the types of changes are indicated and the original source is properly cited. In our case, the full reference to the original publication (Abbott et al., 2022) for the translation is provided at the end.

Climate change is an existential threat to the vast global permafrost domain. The diverse human cultures, ecological communities, and biogeochemical cycles of this tenth of the planet depend on the persistence of frozen conditions. The complexity, immensity, and remoteness of permafrost ecosystems make it difficult to grasp how quickly things are changing and what can be done about it. Here, we summarize terrestrial and marine changes in the permafrost domain with an eye toward global policy.

While many questions remain, we know that continued fossil fuel burning is incompatible with the continued existence of the permafrost domain as we know it. If we fail to protect permafrost ecosystems, the consequences for human rights, biosphere integrity, and global climate will be severe. The policy implications are clear: the faster we reduce human emissions and draw down atmospheric CO_2, the more of the permafrost domain we can save. Emissions reduction targets must be strengthened and accompanied by support for local peoples to protect intact ecological communities and natural carbon sinks within the permafrost domain.

Some proposed geoengineering interventions such as solar shading, surface albedo modification, and vegetation manipulations are unproven and may exacerbate environmental injustice without providing lasting protection. Conversely, astounding advances in renewable energy have reopened viable pathways to halve human greenhouse gas emissions by 2030 and effectively stop them well before 2050.

The authors call on leaders, corporations, researchers, and citizens everywhere to acknowledge the global importance of the permafrost domain and work towards climate restoration and empowerment of Indigenous and immigrant communities in these regions.

KEYWORDS:

permafrost climate feedback; Arctic; Boreal; climate policy; renewable energy; ecosystem feedback; Earth stewardship; permafrost domain.

FOR CITATION:

Abbott B.W., Brown M., Carey J.C., Ernakovich J., Frederick J.M., Guo L., Hugelius G., Lee R.M., Loranty M.M., Macdonald R., Mann P.J., Natali S.M., Olefeldt D., Pearson P., Rec A., Robards M., Salmon V.G., Sayedi S.S., SchKdel C., Schuur E.A.G., Shakil S., Shogren A.J., Strauss J., Tank S.E., Thornton B.F., Treharne R., Turetsky M., Voigt C., Wright N., Yang Y., Zarnetske J.P., Zhang Q., Zolkos S. Neobkhodimo svesti k nulyu vybrosy parnikovykh gazov pri szhiganii iskopaemykh uglevodorodov, chtoby zashchitit' ekosistemy kriolitozony (per. s angl.) [We must stop fossil fuel emissions to protect permafrost ecosystems (translation from English into Russian)] // Geoinfo. 2026. T. 8. № 1. S. 98–119. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-2-98–119 (in Rus.).

Введение

Хотя регионы распространения многолетней мерзлоты занимают лишь около 10% поверхности Земли, на них приходится более половины всей наземной и морской дикой природы [1], что делает их критически важными для поддержания целостности биосферы в условиях быстро меняющегося мира. В этих регионах, которые мы называем криолитозоной (см. рис.), содержится от 2,5 до 3 трлн тонн органического углерода – больше, чем во всех остальных грунтах, биоте и атмосфере Земли вместе взятых [2–7]. Криолитозона является домом для десятков миллионов людей, включая разнообразные сообщества коренных народов и пришлого населения, которые не только зависят от соответствующих экосистем глобальной значимости, но и поддерживают их [8–15]. Единство трех аспектов значимости криолитозоны – биоразнообразие, климат и население – означает, что правительства, корпорации и человеческие сообщества как внутри этих регионов, так и за их пределами должны взять на себя ответственность за предотвращение опасных изменений окружающей среды [16–22].

Криолитозона особенно уязвима к изменениям климата из-за ускоренного потепления на фоне широкого распространения льда. Температура воздуха в ней над сушей и морскими акваториями росла в 2–4 раза быстрее, чем в среднем по миру, что в значительной степени связано с таянием льда и снега, с изменениями в океанической и атмосферной циркуляции, а также с воздействиями озоноразрушающих газов [21–25]. Лед во всех его формах составляет фундамент и покров криолитозоны, и его потеря нарушает энергетический баланс, структуру экосистем и деятельность человека [26–31]. Поэтому изменения климата ведут к усилению динамики нарушений в этих частях Земли и к перестройке социально-экологических процессов (отражающих взаимодействия между обществом и окружающей средой) в континентальном масштабе [32–35]. Во многих регионах такие изменения происходят на десятилетия быстрее, чем ожидалось [36–38], что, вероятно, предвещает переход к беспрецедентным биофизическим и социально-экологическим условиям [39–42].

Широкие и взаимосвязанные изменения в криолитозоне вызывают сложные локальные биогеохимические реакции с глобальными последствиями. Продолжающееся выделение большого количества парниковых газов из многолетнемерзлых грунтов, донных отложений и водотоков обусловило существенный рост числа научных исследований и привлекло внимание общественности [35, 43–46].

Образование и выделение углекислого газа, метана и закиси азота происходят при сгорании или разложении органических веществ в наземных и водных экосистемах [47–50]. Кроме того, метан может высвобождаться из подводных или подземных скоплений ископаемых углеводородов или газогидратов, особенно при нарушениях, вызванных таянием многолетней мерзлоты или разведкой и добычей ископаемого топлива [4, 46, 51–53].

Выбросы парниковых газов, а также сокращение площади снежно-ледяного покрова в криолитозоне являются одними из самых мощных дестабилизирующих климатических обратных связей в глобальном масштабе [43, 54, 55]. Эти обратные связи, по всей вероятности, носят нелинейный характер: объем выделения парниковых газов и изменение альбедо часто находятся в экспоненциальной зависимости от температуры [3, 25, 29, 56]. Потенциальный масштаб и динамика проявления во времени таких усиливающих мерзлотно-климатических обратных связей остаются крайне неопределенными, но они могут привести к тому, что за ближайшие 200 лет суммарные выбросы парниковых газов составят несколько сотен гигатонн в CO_2-эквиваленте [4, 7, 41, 43, 57, 58]. Эмиссия парниковых газов из криолитозоны уже стала сопоставимой с их ежегодными выбросами, например, во всей Японии [55].

До недавнего времени выбросы парниковых газов в криолитозоне не принимались во внимание в моделях земных систем, используемых для прогнозирования траекторий изменений климата и обоснования целевых показателей международных климатических соглашений [19, 58]. В новых моделях земных систем ученые начали принимать в расчет обратные связи,

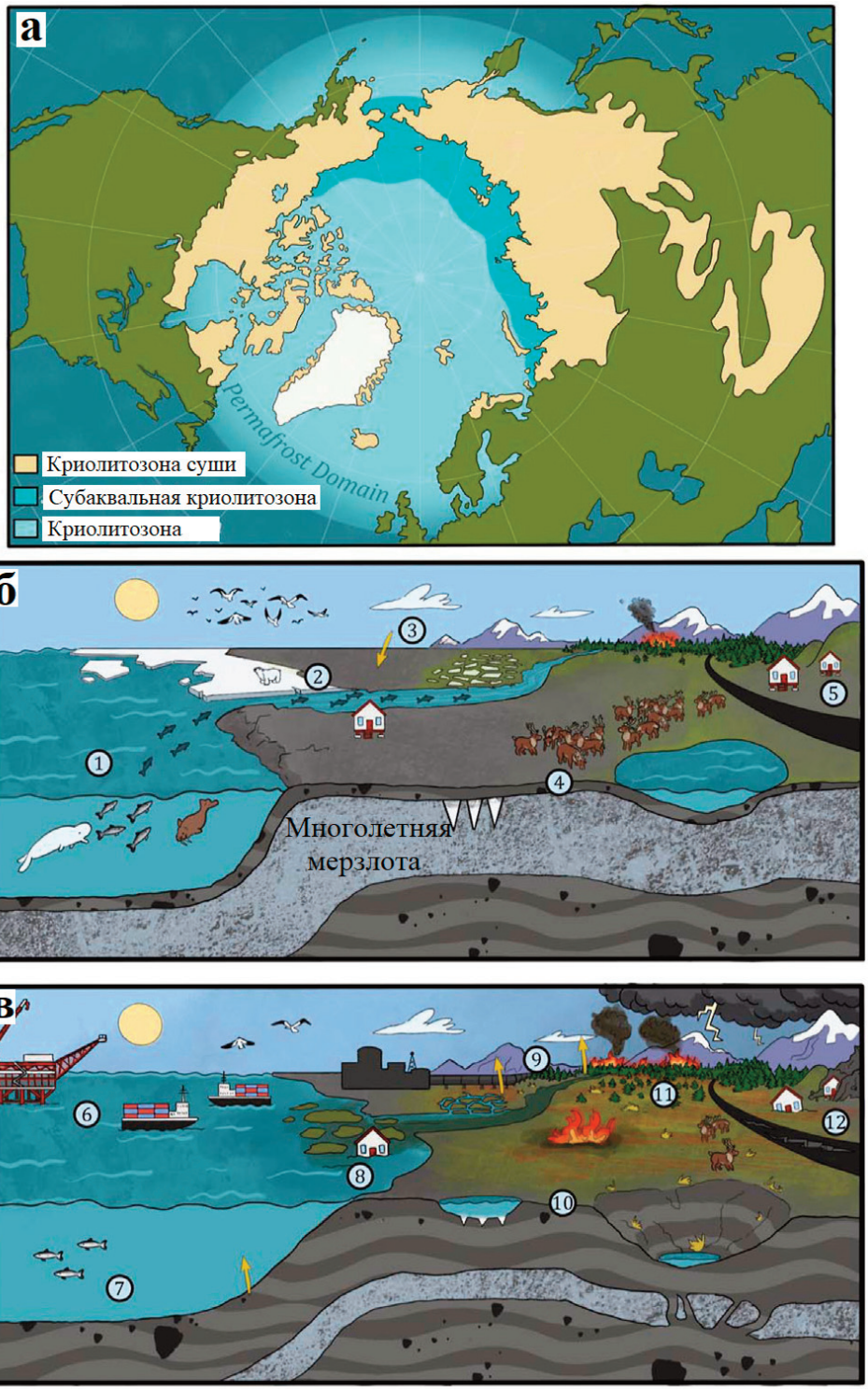


Рис. Криолитозона и возможные сценарии ее будущего: **а** – наше определение криолитозоны включает наземные и морские регионы со значительным распространением многолетней мерзлоты, включая океаны и моря к северу от 50°с.ш., подводную многолетнюю мерзлоту на континентальных шельфах, арктическую тундру, бореальные леса и высокогорную многолетнюю мерзлоту; **б** – возможный сценарий будущего криолитозоны с ускоренным сокращением выбросов парниковых газов (1 – устойчивые биологические сообщества в морских, прибрежных и наземных экосистемах; 2 – сохранение морского льда, особенно многолетнего и прибрежного; 3 – сохранение в криолитозоне отрицательного баланса парниковых газов, то есть когда их поглощение превышает их выбросы; 4 – восстановление многолетней мерзлоты и уменьшение глубины сезонного протаивания; 5 – сохранение социокультурной среды и инфраструктуры); **в** – возможный сценарий будущего криолитозоны с продолжением использования ископаемого топлива (6 – расширение добычи ископаемого топлива и морской навигации; 7 – нарушение пищевых цепей, миграций и биологических сообществ в наземных и морских регионах; 8 – ускорение береговой эрозии, усиление изменений первичной продуктивности пресноводных и морских экосистем, закисления океана, эрозии грунтов на суше, в том числе выноса загрязняющих веществ; 9 – переход в криолитозоне к положительному балансу парниковых газов, то есть когда их выбросы превышают их поглощение; 10 – широкомасштабная деградация многолетней мерзлоты, в том числе увеличение глубины сезонного протаивания, образование и осушение озер; 11 – интенсификация деструктивных процессов на суше, в том числе лесных пожаров, экстремальных гидрологических явлений, термокарста, трансформации растительных сообществ и экспансии инвазивных видов; 12 – кардинальные нарушения социокультурной среды и инфраструктуры)

связанные с выбросами соединений углерода из многолетней мерзлоты, однако эти оценки остаются предварительными и не учитывают ряд важных процессов [3, 19, 57, 59, 60].

Сочетание растущего внимания со стороны научного сообщества и сохраняющейся сложности социально-экологических процессов привело к формированию полярных и неполных представлений о многолетней мерзлоте в общественных и политических кругах (см. таблицу).

В данной статье мы рассмотрим реакции криолитозоны на изменения климата с акцентом на меры по смягчению этих трансформаций. Далее будет показано, как изменения климата и другие антропогенные воздействия влияют на физическую, биологическую и социальную структуру криолитозоны. Примеры, которые будут приведены, не являются исчерпывающими. Мы напомним читателям, что регионы распространения многолетней мерзлоты включают разнообразные экосистемы и

Таблица. Распространенные ошибочные представления о взаимодействиях многолетней мерзлоты и климата и современное понимание этих процессов

Предмет обсуждения	Ошибочные представления	Современные научные представления
«Бомба замедленного действия»	«Фитиль уже подожжен»: масштабное таяние многолетней мерзлоты с выбросами парниковых газов неизбежно произойдет в течение нескольких лет или десятилетий. Интенсивная эмиссия метана из газогидратов, воронок (кратеров) газового выброса и озер уже запущена – и теперь ее невозможно остановить	Эта точка зрения противоречит современным и палеоклиматическим данным, а также результатам моделирования. Они показывают, что обратные связи между многолетней мерзлотой и климатом в криолитозоне зависят от степени и продолжительности потепления (то есть чем меньше антропогенные выбросы, тем слабее мерзлотно-климатические обратные связи). Поскольку аномальные явления легко становятся поводом для громких заголовков (например, «пузырящийся метан в море у побережья», «взрывы с образованием кратеров в тундре» или «зомби-пожары»), в обществе широко распространилось ошибочное представление о «бомбе замедленного действия»
Нет проблем	Многолетняя мерзлота может когда-нибудь высвободить некоторое количество парниковых газов, но не в тех масштабах, о которых стоит беспокоиться. Эта система настолько инертна, что до начала серьезных изменений пройдут столетия, а поглощение углекислого газа растениями компенсирует любые выбросы, превращая взаимодействия между мерзлотой и климатом в своего рода механизм саморегуляции	Эта точка зрения не согласуется с фактами, свидетельствующими о высокой чувствительности криолитозоны к изменениям климата. Площадь морского льда и снежного покрова стремительно сокращается, штормовая активность усиливается, грунты и в том числе береговые линии подвергаются эрозии, а многие районы, возможно, уже начали выделять больше парниковых газов, чем поглощать. Эти изменения наносят ущерб людям и экосистемам, от которых они зависят. Эмиссия парниковых газов из-за таяния многолетней мерзлоты уже сопоставима по масштабам с их выбросами, например, во всей Японии. Поскольку в климатической политике обсуждения часто сосредоточены на выбросах к 2100 году или до 2100 года, в соответствующих кругах широко распространено заблуждение, заключающееся в том, что поводов для беспокойства нет
Вопрос лишь в углероде	Многолетнюю мерзлоту правильнее всего рассматривать как скопление предшественников парниковых газов. Как и в случае с нетронутым месторождением угля, нам просто нужно сделать так, чтобы этот углерод оставался в земле, – и тогда все будет хорошо	Эта точка зрения игнорирует культурную и экосистемную значимость многолетней мерзлоты, динамическую природу запасов и потоков углерода, а также критически важные взаимодействия между углеродом, питательными веществами, водой и деструктивными процессами. В отличие от месторождений с высокой концентрацией ископаемого топлива, органические вещества многолетней мерзлоты распределены по десятой части общей площади планеты, причем наибольшая их часть сосредоточена в нескольких метрах от поверхности. Техногенные объекты, природная среда обитания живых организмов, климат и баланс парниковых газов находятся в состоянии хрупкого и динамического равновесия
Существуют чудодейственные средства	Если потепление продолжится, у нас есть множество инструментов для защиты местообитаний живых организмов в криолитозоне и контроля глобальных климатических обратных связей. Мы можем высаживать деревья, распределять шарики для пинг-понга по поверхности Северного Ледовитого океана, восстанавливать торфяные болота, распылять аэрозоли в атмосфере и возвращать в дикую природу представителей мегафауны, например первобытных степных бизонов (зубров) и мамонтов для накопления углерода в грунтах	Эта точка зрения недооценивает масштабы антропогенных выбросов и размеры криолитозоны. Кроме того, она переоценивает наши технические возможности и игнорирует непредвиденные последствия, неизбежные при непроверенных экологических вмешательствах такого масштаба. Хотя усилия по сокращению выбросов парниковых газов на локальном и региональном уровнях важны сами по себе и по своим последствиям, не существует известных «климатических решений» для криолитозоны в самых разных масштабах, которые волшебным образом позволили бы нам продолжать сжигать ископаемое топливо, сохраняя при этом многолетнюю мерзлоту в глобальном масштабе. Стремительное сокращение антропогенных выбросов и удаление парниковых газов из атмосферы – единственные обоснованные способы защиты криолитозоны

человеческие сообщества с уникальной историей и особыми природно-географическими условиями жизни [20, 29, 61–63].

Потеря устойчивости грунтовых оснований: деградация многолетней мерзлоты на суше

Многолетняя мерзлота, или постоянно замерзший грунт, сформировалась в холодных регионах преимущественно Северного полушария (см. рис.). Ее образование и деградация зависят от комплекса взаимодействий между локальным климатом и характеристиками экосистем, причем особенно большое влияние кроме климата оказывают растительный покров, гидрологические и гидрогеологические условия, история оледенения [64–66]. Из-за специфических процессов в грунтах криолитозоны в глобальных масштабах накопилось много пресной воды, соединений углерода, азота, фосфора, а также загрязняющих веществ, в том числе ртути, которая переносится атмосферой и реками из более низких широт [2, 49, 67–71]. Например, холодные и переувлажненные грунты замедляют микробное разложение, а перигляциальные процессы могут способствовать перемещению материалов, образовавшихся или отложившихся на поверхности, на гораздо большую глубину, чем в других регионах [65, 72, 73].

В криолитозоне по всему миру наблюдается потепление грунтов [74–77] из-за повышения температуры воздуха, смены растительного покрова, сокращения снежного и ледового покрова, нарушений земной поверхности и интенсификации круговорота воды [66, 78–82]. Более глубокое и продолжительное протаивание стимулирует микробное разложение – главный фактор выбросов парниковых газов в криолитозоне [35, 47, 49, 83, 84]. При потеплении грунтов также высвобождаются питательные вещества, микроэлементы и загрязняющие вещества, что влияет на рост растений, активность микроорганизмов и здоровье человека [85–92]. Хотя долгое время прогнозировалось, что повышение доступности питательных веществ и эффект «углеродного (CO_2) удобрения» увеличат поглощение атмосферного углекислого газа растениями, наблюдаемые тенденции их первичной продуктивности в криолитозоне остаются неоднозначными из-за засух, смены растительных покровов, и других нарушений [3, 57, 93–100].

В криолитозоне усиливаются нарушения геоэкосистем суши, в том числе из-за природных пожаров, просадок поверхности (термокарста) и прямых антропогенных воздействий, связанных с добычей ресурсов, выпасом скота и развитием инфраструктуры. Увеличение продолжительности засушливых периодов, числа ударов молний и трансформации растительного покрова ведут к росту количества лесных и тундровых пожаров, что сказывается на локальных условиях обитания живых организмов, качестве воздуха, а также на региональных круговоротах углерода и питательных веществ [39, 42, 98, 101–103]. При пожарах не только происходит непосредственное выделение углекислого газа и метана в результате горения, но вследствие уничтожения теплоизолирующего растительного покрова и изменений альбедо поверхности продолжается прогрев грунтов и в дальнейшем. Это может стимулировать разложение органики и вынос веществ потоками воды течение десятилетий после пожара [41, 88, 97, 103–105]. Зона пожаров в районах распространения многолетней мерзлоты расширяется на север, при этом фиксируются случаи даже зимнего горения [34, 106–109].

В районах с наличием подземного льда потепление грунтов часто вызывает резкие просадки поверхности, гравитационные склоновые процессы и береговую эрозию [37, 110–112]. Последствия таких термокарстовых процессов варьируют в широком диапазоне в зависимости от ландшафтных условий и характеристик грунтов [23, 29, 91]. Это в том числе могут быть: прогревание грунта, выброс или поглощение парниковых газов, вынос осадков и растворенных веществ в водные экосистемы [36, 91, 113–116]. Проседание поверхности может приводить к сложным изменениям во влажности грунта, влияя на типы и объемы образующихся парниковых газов, что дополнительно затрудняет оценку мерзлотно-климатических обратных связей [7, 117–119]. Примерно 20% северных территорий криолитозоны уязвимы в отношении термокарста, который может вызывать быстрое высвобождение парниковых газов и наносить ущерб созданной человеком инфраструктуре и среде обитания живых организмов [29, 32, 111, 120].

Несмотря на то что криолитозона в целом характеризуется низкой плотностью населения, прямое антропогенное воздействие на нее широко распространено и продолжает расти. Добыча ископаемого топлива, лесозаготовки, добыча торфа, а также строительство дорог, линий электропередачи и зданий могут приводить к прогреванию или просадкам грунтов вследствие нарушения растительного покрова и изменения поверхностных условий, в том числе влажности и альбедо [72, 121–125]. Некоторые виды деятельности человека, например выпас скота, могут приводить к охлаждению или нагреванию грунтов в зависимости от интенсивности нарушений и особенностей локальных геоэкосистем, в том числе структуры почв и подпочвенных грунтов и характера растительных сообществ [72, 81, 126].

Многие из крупномасштабных видов человеческой деятельности обусловлены спросом на энергоносители, древесное волокно и туризм за пределами криолитозоны, что добавляет еще один аспект к проблеме экологической несправедливости (неравенства) в условиях изменений климата [18, 127].

Проблемы с водными объектами от водотоков до морей: гидрохимические изменения

Хотя наземные, пресноводные и морские среды часто рассматриваются по отдельности, они тесно взаимосвязаны на климатическом, биогеохимическом и культурном уровнях [11, 80, 128–130]. Это особенно характерно для криолитозоны, где устойчивость грунтов часто обеспечивается замерзшей водой. Обширные гидрографические сети делают границы весьма условными, а морской лед регулирует обмен энергией и веществами между сушей, морем и атмосферой [40, 131–133]. Более того, значительная часть морских мест обитания живых организмов в Северном Ледовитом океане до сих пор сохраняет термическое и биогеохимическое наследие того периода, когда во время последнего ледникового максимума эти участки были сушей (см. рис., *а*) [4, 134–136]. Следовательно, нарушения в наземных и морских геоэкосистемах сильно взаимосвязаны. Например, вынос осадков, органических и загрязняющих веществ при деградации многолетней мерзлоты может изменять водные пищевые цепи, влиять на миграцию морских животных и подвергать человеческие сообщества воздействию биоаккумулированных загрязнителей [89, 137]. Исчезновение морского льда увеличивает содержание влаги в атмосфере и доступность энергии, что приводит к изменениям в наземной растительности и повышает вероятность экстремальных атмосферных осадков [80, 128].

Северный Ледовитый океан и окружающие его моря (мы все это вместе называем в статье Северным Ледовитым океаном) играют ключевую роль в формировании глобального климата, циркуляции вод Мирового океана, морского и наземного биоразнообразия, а также в международной политике и торговле [20, 33, 138, 139]. Как и в районах распространения многолетней мерзлоты на суше, в Северном Ледовитом океане многие изменения происходят на десятилетия быстрее, чем прогнозировалось ранее [38, 138, 140]. Площадь и толщина морского льда резко сократились, и ожидается, что к середине этого столетия исчезнет летний лед [40]. Из-за таяния ледников и ледяных щитов, а также вследствие увеличения речного стока вырос приток пресной воды [26, 141, 142]. В то же время деградация многолетней мерзлоты на суше и загрязнение криолитозоны извне существенно меняют поступление в океан углерода, питательных и взвешенных веществ, а также загрязнителей за счет разрушения берегов, речного стока, разгрузки подземных вод и атмосферного переноса [67, 116, 143–148].

Особенно быстро меняются береговая эрозия и вынос веществ реками [63, 145]. Разрушение берегов резко ускорилось под воздействием трех факторов: деградации многолетней мерзлоты, увеличения волновой активности из-за исчезновения морского льда, а также проникновения соленых вод [149–152]. В настоящее время скорость береговой эрозии в некоторых районах превышает 20 м/год, хотя различия в локальных условиях обуславливают высокую пространственную изменчивость [145, 150, 153]. Трансформации в переносе веществ реками вызваны усилением гидрологических процессов, увеличением мощности сезонно-талого слоя, широким развитием термокарста, а также изменениями в поглощении воды и питательных веществ растениями [63, 88, 144, 154–156]. Взаимодействующие нарушения, такие как природные пожары, термокарст и экстремальные гидрологические явления, могут приводить к массивным выбросам материала в речные сети и арктические эстуарии [102, 103, 157, 158]. Например, в западной части Канадской Арктики интенсивность гравитационных процессов в речных долинах с 1986 по 2018 год выросла на два порядка, что привело к образованию осадочных отложений, которые будут переноситься через реки и озера в Северный Ледовитый океан в течение десятилетий и даже тысячелетий [115].

Стоит отметить, что понимание и предотвращение изменений гидрохимических показателей и речного стока особенно важны для Тибетского нагорья, которое обеспечивает питьевой и поливной водой 1,4 млрд человек [90, 120, 158].

Речная и береговая эрозия также приводит к высвобождению микроэлементов и полулетучих загрязняющих веществ из многолетней мерзлоты и грунтов сезонно-талого слоя [70, 92, 158, 160, 161]. К ним относятся ртуть, хлорорганические соединения, полициклические ароматические углеводороды и другие токсичные вещества, которые накапливаются естественным путем или в результате антропогенного загрязнения, например при сжигании угля и добыче полезных ископаемых [67, 25]. Водные экосистемы криолитозоны особенно уязвимы к этим глобальным загрязнителям – главным образом из-за эффективных путей их переноса, а также процессов биоаккумуляции и биомагнификации [162]. Особую обеспокоенность вызывает ртуть, так как одна из ее нейротоксичных форм – метилртуть – накапливается в пищевых цепях и обнаруживается в повышенных концентрациях в живых организмах дикой природы и у населения по всему циркумполярному Северу [92, 163]. Кроме того, вследствие значительного влияния на окислительно-восстановительные условия и биодоступность металлов вынос органических веществ суши в водные экосистемы может способствовать образованию и переносу там метилртути [162, 164, 165].

Глобальное потепление не только приводит к изменениям в выносе веществ из геоэкосистем суши, но и оказывает прямое воздействие на Северный Ледовитый океан. Из-за своих особенностей он крайне уязвим в отношении закисления

вод, что является другой проблемой, связанной с углекислым газом [137, 166, 167]. Повышение кислотности снижает доступность карбоната кальция, нарушая первичную и вторичную продуктивность морских экосистем [168, 169]. В биогеохимии этого океана доминирует сток с суши: он получает около 11% мирового речного стока, хотя сам составляет лишь 1% объема Мирового океана [170]. В результате холодные и малобуферные поверхностные воды Северного Ледовитого океана поглощают огромные количества углекислого газа [97, 166]. Разложение выносимых с суши органических веществ приводит к дополнительному выделению CO_2, что еще сильнее снижает pH [171–173]. Сильная вертикальная стратификация и морской лед препятствуют перемешиванию водной толщи и газообмену с атмосферой, что приводит к быстрому закислению в некоторых наиболее уязвимых частях океана [166, 168, 174, 175].

Совокупный эффект увеличения количества углекислого газа, роста притока талых вод и изменений в циркуляции может привести к тому, что к середине XXI века содержание карбоната кальция в поверхностных водах Северного Ледовитого океана опустится ниже критических значений [138, 169]. В сочетании с усиливающимся тепловым стрессом это может спровоцировать масштабные нарушения в планктонных и бентосных пищевых цепях [168, 169, 176]. Например, по оценкам, сочетание роста освещенности из-за исчезновения морского льда и изменений в поступлении воды и питательных веществ из наземных геоэкосистем за последние 20 лет привело к увеличению первичной продуктивности экосистем в Северном Ледовитом океане примерно на 60% [177, 178]. Такая смена условий может привести к утрате экологических ниш и снижению биоразнообразия в пищевых цепях этого океана.

Прогнозирование и формирование будущего многолетней мерзлоты

С учетом сложности криолитозоны и беспрецедентной скорости изменений климата, нам не известны точные сроки и степень серьезности нарушений, которые затронут ее население, биоразнообразие и биогеохимические процессы [13, 58, 97, 148, 179, 180]. Например, в рамках самого всеобъемлющего проекта по сравнению между собой моделей углеродного баланса многолетней мерзлоты (MIP – Model Intercomparison Project) диапазон оценок варьировал от выброса около 600 Гт углерода до его поглощения в объеме около 200 Гт к 2300 году [57]. Хотя расхождения в результатах моделирования, безусловно, являются проблемой, эталонным показателем для сравнений стало мультимодельное среднее, полученное в рамках указанного проекта [19, 29, 60]. Однако рассмотренные тогда модели были передовыми 7–10 лет назад, а с тех пор моделирование криолитозоны значительно продвинулось вперед [181–185]. Это подчеркивает более общую проблему – продолжающееся отсутствие учета многолетней мерзлоты в моделях земной системы. Этот фактор учитывался только в 4 из 11 моделей 6-го этапа Проекта взаимного сравнения объединенных моделей (CMIP6 – Coupled Model Intercomparison Project, Phase 6), использованных для подготовки 6-го оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) [40, 186]. И лишь 2 из 18 моделей в рамках Проекта взаимного сравнения моделей реакции климата на прекращение эмиссии парниковых газов (ZEC-MIP – Zero Emissions Commitment Model Intercomparison Project) учитывали инерционную динамику процессов в криолитозоне [187].

Поскольку последствия изменений окружающей среды в криолитозоне чрезвычайно значимы как для человеческих сообществ, так и для природных экосистем, необходимо использовать все доступные инструменты для мониторинга и прогнозирования. Например, признавая указанные выше недостатки моделей земной системы, первая рабочая группа 6-го оценочного доклада МГЭИК (IPCC AR6 WG1) оценивала мерзлотно-климатические обратные связи с помощью целого ряда различных методов, в том числе эмпирических исследований [58].

При исследованиях, управлении и принятии политических решений необходимо обеспечить комплексный учет традиционных экологических знаний, эмпирических и модельных данных, экспертных оценок и результатов палеоисследований, принимая во внимание весь спектр социально-экологических последствий [4, 18, 20, 188]. В частности, необходимо учитывать нарушения и факторы устойчивости, которые каскадно распространяются через границы экосистем (например, наземных, пресноводных, морских) и их различные составляющие (такие как благополучие человека, целостность биосферы, биогеохимические циклы).

Выявленные приоритеты в сферах исследований и управления выходят далеко за рамки вопросов углеродного баланса и включают: циркуляцию вод Северного Ледовитого океана, состояние морских и прибрежных сред обитания, дестабилизацию органических веществ и гидратов метана на континентальном шельфе, развитие термокарста, протаивание грунтов вследствие пожаров, взаимодействия питательных веществ, динамику торфяников, а также социально-экологическую адаптацию и устойчивость [15, 49, 72, 73, 177].

Что можно предпринять?

Сохраняющаяся неопределенность в отношении процессов, происходящих в многолетней мерзлоте, не ограничивает

нашу способность действовать для защиты криолитозоны уже сейчас. В рамках традиционных, модельных и эмпирических подходов ученые приходят к общему мнению о том, что сроки и степень ущерба для криолитозоны напрямую связаны с масштабами антропогенного потепления [6, 58, 179, 189]. Поэтому вопрос заключается в том, как наиболее эффективно ограничить техногенное влияние на климат?

В самом общем виде можно выделить три взаимодополняющих подхода к сдерживанию изменений климата:

1) сокращение антропогенных выбросов парниковых газов;

2) охрана экосистем для сохранения природных поглотителей парниковых газов;

3) попытки управления энергетическим балансом Земли с помощью геоинженерии.

Первые два подхода реализуемы, экономически эффективны и имеют широкий спектр сопутствующих преимуществ [190–192]. Например, отказ от сжигания ископаемого топлива мог бы ежегодно предотвращать 10,2 млн преждевременных смертей и приносить 10 трлн долларов США в виде экономических выгод за счет улучшения качества воздуха [50, 193–196]. Кроме того, совместные усилия по расширению охраны ненарушенных экосистем способствуют сохранению целостности биосферы и могут помочь в восстановлении прав коренного и пришлого населения криолитозоны [1, 12, 192, 197, 198].

Третий подход (геоинженерный), к сожалению, менее проверен и в большей степени чреват непредвиденными последствиями [15, 180, 199, 200]. Для криолитозоны был предложен широкий спектр геоинженерных мер, в том числе управление солнечной радиацией, повышение альбедо (осветление) океана, искусственное создание морского льда, фертилизация («удобрение») океана, получение энергии из биомассы с улавливанием и хранением соединений углерода (биоэнергетика), а также биоманипуляции, например посадка деревьев и интродукция травоядных животных [15, 59, 126, 180, 200–204]. Хотя продолжение исследований некоторых из этих мер является оправданным, все они имеют серьезные побочные эффекты, а также известные этические и практические ограничения [15, 199, 205]. Например, управление солнечной радиацией теоретически могло бы снизить температуру настолько, чтобы защитить часть криолитозоны [59]. Однако это не решит проблему закисления Северного Ледовитого океана и с высокой вероятностью приведет к нарушениям в мировом сельском хозяйстве, одновременно усилив разрушение озонового слоя над Арктикой [200, 206, 207]. Кроме того, использование частей бореальных лесов для реализации биоэнергетических технологий может привести к снижению запасов углерода в локальных экосистемах и вызвать загрязнение, вредное для здоровья населения, а также привести к существенному региональному потеплению из-за осаждения черного и бурого углерода [208–210]. К тому же многие из предложенных решений могут оказаться неэффективными или иметь обратный эффект в новых условиях, созданных антропогенным изменением климата. Например, на выживаемость крупных стад травоядных могут негативно повлиять перемены в кормовой базе и экстремальные погодные явления [80, 200], а эффект поглощения углерода в результате посадки деревьев может быть сведен на нет массовой гибелью лесов из-за повышения температуры и интенсификации лесных пожаров [110, 211]. Даже если бы эти вмешательства позволили достичь климатических целей, они поставили бы под угрозу более половины ненарушенных экосистем, оставшихся на планете [1, 12].

Таким образом, можно сделать вывод, что для сохранения экосистем криолитозоны необходимы быстрое сокращение выбросов парниковых газов из-за сжигания ископаемого топлива и расширение прав и возможностей местного населения. Хотя и остаются открытыми многие научные вопросы, касающиеся сложности взаимосвязей между многолетней мерзлотой и климатом, известно, что чем быстрее удастся снизить концентрацию парниковых газов в атмосфере, тем бОльшую часть криолитозоны удастся сохранить [6, 50, 58].

Из-за колоссальных масштабов и инерционности процессов в криолитозоне [4, 43, 60, 65, 74] решения, которые будут приняты в отношении выбросов парниковых газов в ближайшее десятилетие, могут либо открыть пути восстановления и сохранения многолетней мерзлоты, либо закрепить сценарий утрат и деградации (см. рис.) [6, 50, 141, 212]. Следовательно, будущее криолитозоны зависит от выбора мер в сфере энергетики, предпринятых далеко за пределами регионов распространения многолетней мерзлоты.

К счастью, недавние прорывы в производстве, передаче и хранении возобновляемой энергии теперь позволяют осуществлять декарбонизацию гораздо быстрее, чем считалось возможным ранее [213–215]. С 2009 года стоимость солнечных фотоэлектрических систем и ветряных турбин упала на 91 и 71% соответственно, что сделало их источниками самой дешевой и чистой электроэнергии в истории человечества [6, 50, 191, 196]. Мировые рынки уже отреагировали на это: возобновляемые источники энергии составили 90% всех новых мощностей по производству электроэнергии, введенных в 2021 году [216], и, по прогнозам, обеспечат 95% всего прироста в период до конца 2025 года [217].

При периодах удвоения мощностей, равных 3,7 года для ветроэнергетики и 1,9 года для солнечной энергетики, возобновляемые источники способны удовлетворить мировой спрос на электроэнергию не позднее чем через 10 лет, а весь спрос на первичную энергию – не позднее чем через 25 лет [6, 50, 196, 213, 218, 219]. Отработанные и проверенные временем

технологии таких типов уже сейчас позволяют электрифицировать почти всю экономику (транспорт, промышленность, сельское хозяйство и т.д.), а разрабатываемые методы открывают путь к ее полной декарбонизации до 2040 года [191, 215].

Если мировое сообщество продолжит поддерживать этот переход, то изобилие чистой и доступной энергии позволит также снизить стоимость одного из немногих методов геоинженерии, пригодных для масштабного применения и обеспечивающих устойчивый эффект в долгосрочной перспективе. Данный метод заключается в улавливании углерода непосредственно из атмосферного воздуха и его последующем хранении [220]. Сочетание очень быстрой глобальной декарбонизации и использования возобновляемой энергии для реализации указанного геоинженерного метода может позволить к концу этого века вернуться к климатическим условиям, похожим на голоценовые [6, 50, 191].

Теперь, когда уже есть технологические и экономические условия для ускоренной декарбонизации энергетики и снижения концентрации углекислого газа в атмосфере, выполнение нашего долга по восстановлению климата Земли стало возможным. Вместо того чтобы принимать в качестве целевого ориентира потепление климата только на 1,5–2 °C (уровне изменений, который все равно вызвал бы радикальные трансформации и широкомасштабные нарушения во всей криолитозоне [36, 142, 212]), мы должны стремиться к восстановлению климатических условий, близких к голоценовым. Этого можно достичь, если больше не сжигать ископаемое топливо при одновременной поддержке естественных поглотителей парниковых газов и развитии технологий с отрицательным балансом выбросов (технологий, при работе которых из атмосферы забирается больше соединений углерода, чем выделяется) [6, 50].

Предпринимая меры по ускоренному снижению концентрации парниковых газов в атмосфере в глобальном масштабе, необходимо поддерживать и расширять права и возможности населения криолитозоны, которое вынуждено адаптироваться к беспрецедентным экологическим и экономическим изменениям и чье участие имеет большое значение для устойчивого сохранения экосистем соответствующих регионов, а значит и для глобального сохранения экосистем [12, 13, 15, 192]. По соображениям как практического, так и этического характера обязательно надо следовать рекомендациям коренных народов и других людей, проживающих в криолитозоне, интересы которых затронуты больше всего и которые обладают наиболее глубокими знаниями о сложных экологических последствиях на населенных ими территориях [13, 18, 188]. Достижению обозначенных целей могло бы поспособствовать повышение авторитета и усиление роли таких форумов, как «Арктический совет» (Arctic Council) и Приполярный совет инуитов (Inuit Circumpolar Council) [20, 127, 221–223].

У нас есть все инструменты, чтобы обратить изменение климата вспять и защитить незаменимую криолитозону. Мы призываем людей повсюду распространять и поддерживать эту обоснованную и вдохновляющую оценку.

-

Концепцию статьи разработали Бенджамин Эбботт и Лаодун Го. Совместное участие в подготовке и редактировании рукописи принимал весь коллектив авторов.

-

Мнения авторов, приведенные в публикации, не обязательно отражают официальную позицию Министерства энергетики США, Правительства Соединенных Штатов, организаций, аффилированных с авторским коллективом, издателя, редакторов или рецензентов.

-

Данная работа была выполнена при поддержке Национального научного фонда США (в рамках грантов № 1916565, 1916567, 1916576, 1906381, 1931333). Верити Сэлмон получила поддержку в рамках проекта NGEE Arctic (Next-Generation Ecosystem Experiments – Arctic, «Экосистемные эксперименты следующего поколения в Арктике»), реализуемого за счет средств, выделенных по Программе биологических и экологических исследований Министерства энергетики США (по контракту ORNL № DE-AC05-00OR22725, заключенному с компанией UT-Battelle, LLC). Дженнифер Фредерик получила поддержку в рамках Программы внутренних научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок в Сандийских национальных лабораториях. Сандийские национальные лаборатории – это многоцелевая лаборатория, управление и эксплуатация которой осуществляются компанией National Technology and Engineering Solutions of Sandia LLC («Национальные технологические и инженерные решения Сандии»), которая является дочерним предприятием, полностью принадлежащим корпорации Honeywell International Inc. и работающим в интересах Национального управления по ядерной безопасности Министерства энергетики США в соответствии с контрактом DE-NA0003525. Графическое оформление рисунка было выполнено иллюстратором Бренной Килпатрик. Мы выражаем благодарность участникам форума «Диалоги по мерзлотно-климатическим обратным связям», в том числе Натану Обеду, Дане Тизья-Трамм и Элизабет Мэй, за их предложения и замечания.

-

Мы посвящаем эту работу памяти известного канадского специалиста по сохранению северных экосистем Роберта Маклеллана, его семье и друзьям [следует отметить, что на полях первой страницы источника для перевода допущена опечатка: трагическое примечание относится к Роберту Маклеллану, а не к Бенджамину Эбботту, который по сей день продолжает активно и успешно работать. – Ред.].

Источник для перевода (Source for the translation)

Abbott B.W., Brown M., Carey J.C., Ernakovich J., Frederick J.M., Guo L., Hugelius G., Lee R.M., Loranty M.M., Macdonald R., Mann P.J., Natali S.M., Olefeldt D., Pearson P., Rec A., Robards M., Salmon V.G., Sayedi S.S., Schädel C., Schuur E.A.G., Shakil S., Shogren A.J., Strauss J., Tank S.E., Thornton B.F., Treharne R., Turetsky M., Voigt C., Wright N., Yang Y., Zarnetske J.P., Zhang Q., Zolkos S. We must stop fossil fuel emissions to protect permafrost ecosystems // Frontiers in Environmental Science. Sec. Biogeochemical Dynamics. 2022. Vol. 10. Article 889428. DOI: 10.3389/fenvs.2022.889428. URL: https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2022.889428/full.

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

1. Watson J.E.M., Venter O., Lee J., Jones K.R., Robinson J.G., Possingham H.P., et al. Protect the last of the wild // Nature. 2018. Vol. 563. P. 27–30. DOI:10.1038/d41586-018-07183-6.
2. Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J.W., Schuur E.A.G., Ping C.L., et al. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // Biogeosciences. 2014. Vol. 11. P. 6573–6593. DOI:10.5194/bg-11-6573-2014.
3. Abbott B.W., Jones J.B., Schuur E.A.G., Bowden W.B., Bret-Harte M.S., Epstein H.E., et al. Biomass offsets little or none of permafrost carbon release from soils, streams, and wildfire: an expert assessment // Environ. Res. Lett. 2016. Vol. 11. Article 034014. DOI:10.1088/1748-9326/11/3/034014.
4. Sayedi S.S., Abbott B.W., Thornton B.F., Frederick J.M., Vonk J.E., Overduin P., et al. Subsea Permafrost carbon stocks and climate change sensitivity estimated by expert assessment // Environ. Res. Lett. 2020. Vol. 15. Article 124075. DOI:10.1088/1748-9326/abcc29.
5. Mishra U., Hugelius G., Shelef E., Yang Y., Strauss J., Lupachev A., et al. Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks // Sci. Adv. 2021. Vol. 7. Article eaaz5236. DOI:10.1126/sciadv.aaz5236.
6. Abbott B.W. Permafrost Climate Feedbacks // Global Arctic: An Introduction to the Multifaceted Dynamics of the Arctic (editors M. Finger, G. Rekvig Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 189–209. doi:10.1007/ 978-3-030-81253-9_10.
7. Schuur E.A.G., Abbott B.W., Commane R., Ernakovich J.G., Euskirchen E.S., Hugelius G., et al. Permafrost and climate change: carbon cycle feedbacks from the warming Arctic // Annu. Rev. Environ. Resour. 2022. Vol. 47. № 1. P 343–371. DOI:10.1146/annurev-environ-012220-011847.
8. Riedlinger D., Berkes F. Contributions of traditional knowledge to understanding climate change in the Canadian Arctic // Polar Rec. 2001. Vol. 37. P 315–328. DOI:10.1017/S0032247400017058.
9. Parkinson A. J., Berner J. Climate change and impacts on human health in the Arctic: an International Workshop on Emerging Threats and the Response of Arctic Communities to Climate Change // Int. J. Circumpolar Health. 2009. Vol. 68. P. 84–91. DOI:10.3402/ijch.v68i1.18295.
10. Pearce T.D., Ford J.D., Laidler G.J., Smit B., Duerden F., Allarut M., et al. Community collaboration and climate change research in the Canadian Arctic // Polar Res. 2009. Vol. 28. P. 10–27. DOI:10.1111/j.1751-8369.2008.00094.x.
11. Chapin F.S., Robards M.D., Johnstone J.F., Lantz T.C., Kokelj S.V. Case Study: Novel Socio-Ecological Systems in the North: Potential Pathways toward Ecological and Societal Resilience // Novel Ecosystems. John Wiley & Sons, Ltd, 2013. P. 334–344. DOI:10.1002/9781118354186.ch40.
12. Díaz S., Settele J., Brondízio E.S., Ngo H.T., Agard J., Arneth A., et al. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change // Science. 2019. Vol. 366. DOI:10.1126/science.aax3100.
13. Proverbs T., Lantz T., Gwich'in Tribal Council. Cumulative environmental impacts in the Gwich'in cultural landscape cumulative environmental impacts in the Gwich'in cultural landscape // Sustainability. 2020. Vol. 12. № 11. Article 4667. DOI:10.3390/su12114667.
14. Ellis E. C., Gauthier N., Klein Goldewijk K., Bliege Bird R., Boivin N., Díaz S., et al. People have shaped most of terrestrial nature for at least 12,000 years // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2021. Vol. 118. № 17. Article e2023483118. DOI:10.1073/pnas.2023483118.
15. Mettiäinen I., Buck H.J., MacMartin D.G., Ricke K.L. "Bog here, marshland there": tensions in co-producing scientific knowledge on solar geoengineering in the Arctic // Environ. Res. Lett. 2022. Vol. 17. Article 045001. DOI:10.1088/1748-9326/ac5715.
16. Chapin F.S., Díaz S. Interactions between changing climate and biodiversity: shaping humanity's future // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2020. Vol. 117. P. 6295–6296. DOI:10.1073/pnas.2001686117.
17. Whyte K. Too Late for indigenous climate justice: ecological and relational tipping points // WIREs Clim. Change. 2020. Vol. 11. Article e603. DOI:10.1002/wcc.603.

18. Chapin III F.S. Social and environmental change in the Arctic: emerging opportunities for well-being transformations through stewardship // Ecology and Society. 2021. Vol. 26. № 3. DOI:10.5751/ES-12499-260315.
19. Natali S.M., Holdren J.P., Rogers B.M., Treharne R., Duffy P.B., Pomerance R., et al. Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2021. Vol. 118. № 21. Article e2100163118. DOI:10.1073/pnas.2100163118.
20. Norway // The Arctic Council website. URL: https://arctic-council.org/ru/about/states/norway/. (accessed February 20, 2022).
21. Huang J., Zhang X., Zhang Q., Lin Y., Hao M., Luo Y., et al. Recently amplified Arctic warming has contributed to a continual global warming trend // Nat. Clim. Change. 2017. Vol. 7. P. 875–879. DOI:10.1038/s41558-017-0009-5.
22. Goosse H., Kay J.E., Armour K.C., Bodas-Salcedo A., Chepfer H., Docquier D., et al. Quantifying climate feedbacks in polar regions // Nat. Commun. 2018. Vol. 9. Article 1919. DOI:10.1038/s41467-018-04173-0.
23. Mu C., Abbott B.W., Norris A.J., Mu M., Fan C., Chen X., et al. The status and stability of permafrost carbon on the Tibetan Plateau // Earth-Science Rev. 2020. Vol. 211. Article 103433. DOI:10.1016/j.earscirev.2020.103433.
24. Polvani L.M., Previdi M., England M.R., Chiodo G., Smith K.L. Substantial twentieth-century Arctic warming caused by ozone-depleting substances // Nat. Clim. Change. 2020. Vol. 10. P. 130–133. DOI:10.1038/s41558-019-0677-4.
25. Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts. Tromsø, Norway: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) // AMAP website. URL: https://www.amap.no/documents/download/6759/inline (accessed May 15, 2022).
26. Bamber J.L., Tedstone A.J., King M.D., Howat I.M., Enderlin E.M., van den Broeke M.R., et al. Land ice freshwater budget of the Arctic and North Atlantic oceans: 1. Data, Methods, and Results // J. Geophys. Res. Oceans. 2018. Vol. 123. P. 1827–1837. DOI:10.1002/2017JC013605.
27. Schuur E.A.G., Mack M.C. Ecological response to permafrost thaw and consequences for local and global ecosystem services // Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 2018. Vol. 49. P. 279–301. DOI:10.1146/annurev-ecolsys-121415-032349.
28. Bamber J.L., Oppenheimer M., Kopp R.E., Aspinall W.P., and Cooke R.M. Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2019. Vol. 116. P. 11195–11200. DOI:10.1073/pnas. 1817205116.
29. Turetsky M.R., Abbott B.W., Jones M.C., Anthony K.W., Olefeldt D., Schuur E.A.G., et al. Carbon release through abrupt permafrost thaw //Nat. Geosci. 2020. Vol. 13. P. 138–143. DOI:10.1038/s41561-019-0526-0.
30. Schmidt J.I., Hausner V.H., Monz C. Building Adaptive Capacity in a Changing Arctic by Use of Technology // Ecology and Society. 2021. Vol. 26. № 4. DOI:10.5751/ES-12605-260401.
31. Irrgang A.M., Bendixen M., Farquharson L.M., Baranskaya A.V., Erikson L.H., Gibbs A.E., et al. Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts // Nat. Rev. Earth Environ. 2022. Vol. 3. P. 39–54. DOI:10.1038/s43017-021-00232-1.
32. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V.E., Nelson F.E., et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // Nat. Commun. 2018. Vol. 9. Article 5147. DOI:10.1038/s41467-018-07557-4.
33. Chou E., Southall B.L., Robards M., Rosenbaum H.C. International policy, recommendations, actions and mitigation efforts of anthropogenic underwater noise // Ocean Coast. Manag. 2021. Vol. 202. Article 105427. DOI:10.1016/j.ocecoaman.2020.105427.
34. Veraverbeke S., Delcourt C.J.F., Kukavskaya E., Mack M., Walker X., Hessilt T., et al. Direct and longer-term carbon emissions from Arctic-boreal fires: a short review of recent advances // Curr. Opin. Environ. Sci. Health. 2021. Vol. 23. Article 100277. DOI:10.1016/j.coesh.2021.100277.
35. Treharne R., Rogers B.M., Gasser T., MacDonald E., Natali S. Identifying barriers to estimating carbon release from interacting feedbacks in a warming Arctic // Front. Clim. 2022. Vol. 3. DOI:10.3389/fclim.2021.716464.
36. Farquharson L.M., Romanovsky V.E., Cable W.L., Walker D.A., Kokelj S.V., Nicolsky D. Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian High Arctic // Geophys. Res. Lett. 2019. Vol. 46. P. 6681–6689. DOI:10.1029/2019GL082187.
37. Angelopoulos M., Overduin P.P., Jenrich M., Nitze I., Günther F., Strauss J., et al. Onshore thermokarst primes subsea permafrost degradation // Geophys. Res. Lett. 2021. Vol. 48. Article e2021GL093881. DOI:10.1029/2021GL093881.
38. Parkinson C.L., DiGirolamo N.E. sea ice extents continue to set new records: Arctic, Antarctic, and global results // Remote Sens. Environ. 2021. Vol. 267. Article 112753. DOI:10.1016/j.rse.2021.112753.
39. Box J.E., Colgan W.T., Christensen T.R., Schmidt N.M., Lund M., Parmentier F.J.W., et al. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017 // Environ. Res. Lett. 2019. Vol. 14. Article 045010. DOI:10.1088/1748-9326/aafc1b.
40. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate // IPCC website. 2019. URL: https://www.ipcc.ch/srocc/ (accessed November 9, 2021).
41. Meredith M., Sommerkorn M., Cassotta S., Derksen C., Ekaykin A., Hollowed A., et al. Polar Regions. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2019. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/07_SROCC_Ch03_FINAL.pdf.
42. Chen Y., Romps D.M., Seeley J.T., Veraverbeke S., Riley W.J., Mekonnen Z.A., et al. Future increases in Arctic lightning and fire risk for permafrost carbon // Nat. Clim. Chang. 2021. Vol. 11. P. 404–410. DOI:10.1038/s41558-021-01011-y.
43. Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. 2015. Vol. 520. P. 171–179. DOI:10.1038/nature14338.

44. Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M., Patton H., Vadakkepuliyambatta S., Plaza-Faverola A., et al. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor // Science. 2017. Vol. 356. P. 948–953. DOI:10.1126/science.aal4500.
45. Kessler L. Estimating the economic impact of the permafrost carbon feedback // Clim. Change Econ. 2017. Vol. 08. № 02. Article 1750008. DOI:10.1142/S2010007817500087.
46. Froitzheim N., Majka J., Zastrozhnov D. Methane Release from Carbonate Rock Formations in the Siberian permafrost area during and after the 2020 heat wave // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2021. Vol. 118. DOI:10.1073/pnas.2107632118.
47. Schädel C., Bader M.K.F., Schuur E.A.G., Biasi C., Bracho R., Čapek P., et al. Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils // Nat. Clim. Change. 2016. Vol. 6. P. 950–953. DOI:10.1038/ nclimate3054.
48. Plaza C., Pegoraro E., Bracho R., Celis G., Crummer K.G., Hutchings J.A., et al. Direct observation of permafrost degradation and rapid soil carbon loss in tundra // Nat. Geosci. 2019. Vol. 12. P. 627–631. DOI:10.1038/s41561-019-0387-6.
49. Voigt C., Marushchak M. E., Abbott B. W., Biasi C., Elberling B., Siciliano S.D., et al. Nitrous oxide emissions from permafrost-affected soils // Nat. Rev. Earth Environ. 2020. Vol. 1. P. 420–434. DOI:10.1038/s43017-020-0063-9.
50. Abbott B., Chelsea A., Nicholas N., Peter S., Marina M., Sayedeh S.S., et al. Accelerating the renewable energy revolution to get back to the Holocene // Earth's Fuiture. 2023 (in press) [Vol. 11. № 9. https://doi.org/10.1029/2023EF003639].
51. Walter K.M., Chanton J.P., Chapin F.S., Schuur E.A.G., and Zimov S.A. Methane production and bubble emissions from Arctic lakes: isotopic implications for source pathways and ages // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. DOI:10.1029/ 2007JG000569.
52. Thornton B.F., Geibel M. C., Crill P.M., Humborg C., Mörth C.M. Methane Fluxes from the sea to the atmosphere across the Siberian shelf seas // Geophys. Res. Lett. 2016. Vol. 43. P. 5869–5877. DOI:10.1002/2016GL068977.
53. Behari N., Sheriff M.Z., Rahman M.A., Nounou M., Hassan I., and Nounou H. Chronic leak detection for single and multiphase flow: a critical review on onshore and offshore subsea and Arctic conditions // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2020. Vol. 81. Article 103460. DOI:10.1016/j.jngse.2020.103460.
54. Schaefer K., Lantuit H., Romanovsky V., Schuur E., Gärtner-Roer I. Policy Implications of Warming Permafrost. UNEP, 2012. URL: http://epic.awi.de/33086/1/permafrost.pdf (accessed March 14, 2015).
55. Hugelius G. Global stocktake submission: "country" of permafrost submission from Stockholm University, Sweden // United Nations Climate Change website. Stockholm University, 2022. URL: https://unfccc.int/documents/461587 (accessed May 4, 2022).
56. Carey J.C., Tang J., Templer P.H., Kroeger K.D., Crowther T.W., Burton A.J., et al. Temperature response of soil respiration largely unaltered with experimental warming // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2016. Vol. 113. P. 13797–13802. DOI:10. 1073/pnas.1605365113.
57. McGuire A.D., Lawrence D.M., Koven C., Clein J.S., Burke E., Chen G., et al. Dependence of the evolution of carbon dynamics in the northern permafrost region on the trajectory of climate change // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2018. Vol. 115. P. 3882–3887. DOI:10.1073/pnas.1719903115.
58. Canadell J.G., Monteiro P.M.S., Costa M.H., Cunha L.C.D., Cox P.M., Eliseev A.V., et al. Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. Cambridge, New York: IPCC, 2021.
59. Chen Y., Liu A., Moore J.C. Mitigation of Arctic permafrost carbon loss through stratospheric aerosol geoengineering // Nat. Commun. 2020. Vol. 11. Article 2430. DOI:10.1038/s41467-020-16357-8.
60. De Vrese P., Brovkin V. Timescales of the permafrost carbon cycle and legacy effects of temperature overshoot scenarios // Nat. Commun. 2021. Vol. 12. Article 2688. DOI:10.1038/s41467-021-23010-5.
61. Jorgenson M.T., Harden J., Kanevskiy M., O'Donnell J., Wickland K., Ewing S., et al. Reorganization of vegetation, hydrology and soil carbon after permafrost degradation across heterogeneous boreal landscapes // Environ. Res. Lett. 2013. Vol. 8. Article 035017. DOI:10.1088/1748-9326/8/3/035017.
62. Chapin F.S.I. Grassroots Stewardship: Sustainability within Our Reach. Oxford University Press, 2020.
63. Tank S.E., Vonk J.E., Walvoord M.A., McClelland J.W., Laurion I., Abbott B.W. Landscape matters: predicting the biogeochemical effects of permafrost thaw on aquatic networks with a state factor approach // Permafr. Periglac Process.2020. Vol. 31. P. 358–370. DOI:10.1002/ppp.2057.
64. Shur Y.L., Jorgenson M.T. Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems // Permafr. Periglac. Process. 2007. Vol. 18. P. 7–19. DOI:10.1002/ppp.582.
65. Lindgren A., Hugelius G., Kuhry P. Extensive loss of past permafrost carbon but a net accumulation into present-day soils // Nature. 2018. Vol. 560. P. 219–222. DOI:10.1038/s41586-018-0371-0.
66. Loranty M.M., Abbott B.W., Blok D., Douglas T.A., Epstein H.E., Forbes B.C., et al. Reviews and syntheses: changing ecosystem influences on soil thermal regimes in northern high-latitude permafrost regions // Biogeosciences. 2018. Vol. 15. P. 5287–5313. DOI:10.5194/bg-15-5287-2018.
67. Fisher J.A., Jacob D.J., Soerensen A.L., Amos H.M., Steffen A., Sunderland E.M. Riverine source of Arctic Ocean mercury inferred from atmospheric observations // Nat. Geosci. 2012. Vol. 5. P. 499–504. DOI:10.1038/ngeo1478.

68. Strauss J., Schirrmeister L., Grosse G., Fortier D., Hugelius G., Knoblauch C., et al. Deep yedoma permafrost: a synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability // Earth-Science Rev. 2017. Vol. 172. P. 75–86. DOI:10.1016/j.earscirev.2017.07.007.
69. Malone E.T., Abbott B.W., Klaar M.J., Kidd C., Sebilo M., Milner A.M., et al. Decline in ecosystem δ13c and mid-successional nitrogen loss in a two-century postglacial chronosequence // Ecosystems. 2018. Vol. 21. P. 1659–1675. DOI:10. 1007/s10021-018-0245-1.
70. Schuster P. F., Schaefer K.M., Aiken G.R., Antweiler R.C., Dewild J.F., Gryziec J.D., et al. Permafrost stores a globally significant amount of mercury // Geophys. Res. Lett. 2018. Vol. 45. P. 1463–1471. DOI:10.1002/2017GL075571.
71. Abbott B.W., Bishop K., Zarnetske J.P., Minaudo C., Chapin F.S., Krause S., et al. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions // Nat. Geosci. 2019. Vol. 12. P. 533–540. DOI:10.1038/s41561-019-0374-y.
72. Recarbonizing Global Soils – A Technical Manual of Recommended Management Practices. Volume 2. Hot spots and bright spots of soil organic carbon. Rome, Italy: FAO, 2021. 268 p. DOI:10.4060/cb6378en.
73. Finger M., Rekvig G. Global Arctic (1st ed.). Springer International Publishing, 2022. URL: https://link.springer.com/book/9783030812522 (accessed February 18, 2022).
74. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.A., et al. Permafrost is warming at a global scale //Nat. Commun. 2019. Vol. 10. Article 264. DOI:10.1038/s41467-018-08240-4.
75. Neumann R.B., Moorberg C.J., Lundquist J.D., Turner, J.C., Waldrop, M.P., McFarland J.W., et al. Warming effects of spring rainfall increase methane emissions from thawing permafrost // Geophys. Res. Lett. 2019. Vol. 46. P. 1393–1401. DOI:10.1029/2018GL081274.
76. Miner K.R., D'Andrilli J., Mackelprang R., Edwards A., Malaska M.J., Waldrop M.P., et al. Emergent biogeochemical risks from Arctic permafrost degradation // Nat. Clim. Chang. 2021. Vol. 11. P. 809–819. DOI:10.1038/s41558-021-01162-y.
77. Smith S.L., O'Neill H.B., Isaksen K., Noetzli J., Romanovsky V.E. The Changing thermal state of permafrost // Nat. Rev. Earth Environ. 2022. Vol. 3. P. 10–23. DOI:10.1038/s43017-021-00240-1.
78. Rawlins M.A., Steele M., Holland M.M., Adam J.C., Cherry J.E., Francis J.A., et al. Analysis of the Arctic system for freshwater cycle intensification: observations and expectations // J. Clim. 2010. Vol. 23. P. 5715–5737. DOI:10.1175/ 2010JCLI3421.1.
79. Stevens J.T., Latimer A.M. Snowpack, fire, and forest disturbance: interactions affect montane invasions by non-native shrubs // Glob. Change Biol. 2015. Vol. 21. P. 2379–2393. DOI:10.1111/gcb.12824.
80. Forbes B.C., Kumpula T., Meschtyb N., Laptander R., Macias-Fauria M., Zetterberg P., et al. Sea ice, rain-on-snow and tundra reindeer nomadism in Arctic Russia // Biol. Lett. 2016. Vol. 12. Article 20160466. DOI:10.1098/rsbl.2016. 0466.
81. Egelkraut D., Aronsson K.Å., Allard A., Åkerholm M., Stark S., Olofsson J. Multiple feedbacks contribute to a centennial legacy of reindeer on tundra vegetation // Ecosystems. 2018. Vol. 21. P. 1545–1563. DOI:10.1007/s10021-018-0239-z.
82. Kropp H., Loranty M.M., Natali S.M., Kholodov A.L., Rocha A.V., Myers-Smith I., et al. Shallow soils are warmer under trees and tall shrubs across Arctic and boreal ecosystems // Environ. Res. Lett. 2020. Vol. 16. Article 015001. DOI:10. 1088/1748-9326/abc994.
83. Treat C., Natali S.M., Ernakovich J., Iversen C.M., Lupascu M., McGuire A.D., et al. A pan-Arctic synthesis of CH4 and CO2 production from anoxic soil incubations // Glob. Change Biol. 2015. Vol. 21. № 8. P. 2887–2903. DOI:10.1111/gcb.12875.
84. Natali S.M., Watts J.D., Rogers B.M., Potter S., Ludwig S.M., Selbmann A.K., et al. Large loss of CO2 in winter observed across the northern permafrost region // Nat. Clim. Chang. 2019. Vol. 9. P. 852–857. DOI:10.1038/s41558-019-0592-8.
85. Keuper F., Bodegom P.M., Dorrepaal E., Weedon J. T., Hal J., Logtestijn R.S.P., et al. A frozen feast: thawing permafrost increases plant-available nitrogen in subarctic peatlands // Glob. Change Biol. 2012. Vol. 18. P. 1998–2007. DOI:10. 1111/j.1365-2486.2012.02663.x.
86. Chen L., Liu L., Mao C., Qin S., Wang J., Liu F., et al. Nitrogen availability regulates topsoil carbon dynamics after permafrost thaw by altering microbial metabolic efficiency // Nat. Commun. 2018. Vol. 9. P. 1–11. DOI:10.1038/s41467-018-06232-y.
87. Hewitt R.E., Taylor D.L., Genet H., McGuire A.D., Mack M.C. Below-ground plant traits influence tundra plant acquisition of newly thawed permafrost nitrogen // J. Ecol. 2018. Vol. 107. P. 950–962. DOI:10.1111/1365-2745.13062.
88. Carey J.C., Abbott B.W., Rocha A.V. Plant uptake offsets silica release from a large Arctic tundra wildfire // Earth's Future. 2019. Vol. 7. P. 1044–1057. DOI:10.1029/2019EF001149.
89. Global Mercury Assessment 2018. Geneva, Switzerland: United Nations Environmental Progamme (UNEP), 2019. URL: https://www.unep.org/resources/publication/global-mercury-assessment-2018.
90. Mu C., Schuster P.F., Abbott B.W., Kang S., Guo J., Sun S., et al. Permafrost degradation enhances the risk of mercury release on Qinghai-Tibetan Plateau // Sci. Total Environ. 2020. Vol. 708. Article 135127. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.135127.
91. Yang G., Peng Y., Abbott B.W., Biasi C., Wei B., Zhang D., et al. Phosphorus rather than nitrogen regulates ecosystem carbon dynamics after permafrost thaw // Glob. Change Biol. 2021. Vol. 27. P. 5818–5830. DOI:10.1111/gcb.15845.
92. Basu N., Abass K., Dietz R., Krümmel E., Rautio A., Weihe P. The Impact of Mercury Contamination on Human Health in the Arctic: a state of the science review // Sci. Total Environ. 2022. Vol. 831. Article 154793. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.154793.

93. Forbes B.C., Fauria M.M., and Zetterberg P. Russian Arctic warming and “greening” are closely tracked by tundra shrub willows // Glob. Change Biol. 2010. Vol. 16. P. 1542–1554. DOI:10.1111/j.1365-2486.2009.02047.x.
94. Hayes D.J., McGuire A.D., Kicklighter D.W., Gurney K.R., Burnside T.J., Melillo J.M. Is the northern high-latitude land-based CO2 sink weakening? // Glob. Biogeochem. Cycles. 2011. Vol. 25. DOI:10.1029/2010gb003813.
95. Rocha A.V., Blakely B., Jiang Y., Wright K.S., Curasi S.R. Is arctic greening consistent with the ecology of tundra? Lessons from an ecologically informed mass balance model // Environ. Res. Lett. 2018. Vol. 13. Article 125007. DOI:10.1088/1748-9326/aaeb50.
96. Myers-Smith I.H., Kerby J.T., Phoenix G.K., Bjerke J.W., Epstein H.E., Assmann J.J., et al. Complexity revealed in the greening of the Arctic // Nat. Clim. Chang. 2020. Vol. 10. P. 106–117. DOI:10.1038/s41558-019-0688-1.
97. Bruhwiler L., Parmentier F.J.W., Crill P., Leonard M., and Palmer P.I. The Arctic carbon cycle and its response to changing climate // Curr. Clim. Change Rep. 2021. Vol. 7. P. 14–34. DOI:10.1007/s40641-020-00169-5.
98. Mack M.C., Walker X.J., Johnstone J.F., Alexander H.D., Melvin A.M., Jean M., et al. Carbon loss from boreal forest wildfires offset by increased dominance of deciduous trees // Science. 2021. Vol. 372. P. 280–283. DOI:10.1126/science.abf3903.
99. Zhao B., Zhuang Q., Shurpali N., Köster K., Berninger F., Pumpanen J. North American boreal forests are a large carbon source due to wildfires from 1986 to 2016 // Sci. Rep. 2021. Vol. 11. Article 7723. DOI:10.1038/s41598-021-87343-3.
100. Vitali R., Chadburn S.E., Keuper F., Harper A.B., Burke E.J. Simulating increased permafrost peatland plant productivity in response to belowground fertilisation using the JULES land surface model // Nitrogen. 2022. Vol. 3. P. 260–283. DOI:10.3390/nitrogen3020018.
101. Masrur A., Petrov A.N., DeGroote J. Circumpolar spatio-temporal patterns and contributing climatic factors of wildfire activity in the Arctic tundra from 2001–2015 // Environ. Res. Lett. 2018. Vol. 13. Article 014019. DOI:10.1088/1748-9326/aa9a76.
102. Rodríguez-Cardona B.M., Coble A.A., Wymore A.S., Kolosov R., Podgorski D.C., Zito P., et al. Wildfires lead to decreased carbon and increased nitrogen concentrations in upland Arctic streams // Sci. Rep. 2020. Vol. 10. Article 8722. DOI:10.1038/s41598-020-65520-0.
103. Abbott B.W., Rocha A.V., Shogren A., Zarnetske J.P., Iannucci F., Bowden W.B., et al. Tundra wildfire triggers sustained lateral nutrient loss in Alaskan Arctic // Glob. Change Biol. 2021. Vol. 27. P. 1408–1430. DOI:10.1111/gcb.15507.
104. Grosse G., Harden J., Turetsky M., McGuire A.D., Camill P., Tarnocai C., et al. Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116. P. 1–23. DOI:10.1029/2010JG001507.
105. Rocha A.V., Shaver G.R. Postfire energy exchange in Arctic tundra: the importance and climatic implications of burn severity // Glob. Change Biol. 2011. Vol. 17. P. 2831–2841. DOI:10.1111/j.1365-2486.2011.02441.x.
106. Holloway J.E., Lewkowicz A.G., Douglas T.A., Li X., Turetsky M.R., Baltzer J.L., et al. Impact of wildfire on permafrost landscapes: a review of recent advances and future prospects // Permafr. Periglac Process. 2020. Vol. 31. P. 371–382. DOI:10.1002/ppp.2048.
107. McCarty J.L., Smith T.E.L., Turetsky M.R. Arctic fires reemerging // Nat. Geosci. 2020. Vol. 13. P. 658–660. DOI:10.1038/s41561-020-00645-5.
108. Scholten R.C., Jandt R., Miller E.A., Rogers B.M., Veraverbeke S. Overwintering fires in boreal forests // Nature. 2021. Vol. 593. P. 399–404. DOI:10.1038/s41586-021-03437-y.
109. Talucci A.C., Loranty M.M., Alexander H.D. Siberian taiga and tundra fire regimes from 2001–2020 // Environ. Res. Lett. 2022. Vol. 17. Article 025001. DOI:10.1088/1748-9326/ac3f07.
110. Kokelj S.V., Jorgenson M.T. Advances in thermokarst research // Permafr. Periglac. Process. 2013. Vol. 24. P. 108–119. DOI:10.1002/ppp.1779.
111. Olefeldt D., Goswami S., Grosse G., Hayes D., Hugelius G., Kuhry P., et al. Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes // Nat. Commun. 2016. Vol. 7. Article 13043. DOI:10.1038/ncomms13043.
112. Grotheer H., Meyer V., Riedel T., Pfalz G., Mathieu L., Hefter J., et al. Burial and origin of permafrost-derived carbon in the nearshore zone of the Southern Canadian Beaufort Sea // Geophys. Res. Lett. 2020. Vol. 47. Article e2019GL085897. DOI:10.1029/2019GL085897.
113. Anthony K.M.W., Zimov S.A., Grosse G., Jones M.C., Anthony P.M., Iii F.S.C., et al. A shift of thermokarst lakes from carbon sources to sinks during the Holocene epoch // Nature. 2014. Vol. 511. P. 452–456. DOI:10.1038/nature13560.
114. Abbott B.W., Jones J.B., Godsey S.E., Larouche J.R., Bowden W.B. Patterns and persistence of hydrologic carbon and nutrient export from collapsing upland permafrost // Biogeosciences. 2015. Vol. 12. P. 3725–3740. DOI:10.5194/bg-12-3725-2015.
115. Kokelj S. ., Kokoszka J., van der Sluijs J., Rudy A.C.A., Tunnicliffe J., Shakil S., et al. Thaw-driven mass wasting couples slopes with downstream systems, and effects propagate through Arctic drainage networks // Cryosphere. 2021. Vol. 15. P. 3059–3081. DOI:10.5194/tc-15-3059-2021.
116. Wologo E., Shakil S., Zolkos S., Textor S., Ewing S., Klassen J., et al. Stream dissolved organic matter in permafrost regions shows surprising compositional similarities but negative priming and nutrient effects // Glob. Biogeochem. Cycles. 2021. Vol. 35. Article e2020GB006719. DOI:10.1029/2020GB006719.

117. Lupascu M., Welker J.M., Seibt U., Maseyk K., Xu X., Czimczik C.I. High Arctic wetting reduces permafrost carbon feedbacks to climate warming // Nat. Clim. Change. 2013. Vol. 4. P. 51–55. DOI:10.1038/nclimate2058.
118. Lawrence D.M., Koven C.D., Swenson S.C., Riley W.J., Slater A.G. Permafrost thaw and resulting soil moisture changes regulate projected high-latitude CO2 and CH4 emissions. Environ // Res. Lett. 2015. Vol. 10. Article 094011. DOI:10.1088/1748-9326/10/9/094011.
119. Boike J., Grau T., Heim B., Günther F., Langer M., Muster S., et al. Satellite-derived changes in the permafrost landscape of Central Yakutia, 2000–2011: wetting, drying, and fires // Glob. Planet. Change. 2016. Vol. 139. P. 116–127. DOI:10.1016/j.gloplacha.2016.01.001.
120. Gao T., Zhang Y., Kang S., Abbott B.W., Wang X., Zhang T., et al. Accelerating permafrost collapse on the Eastern Tibetan Plateau // Environ. Res. Lett. 2021. Vol. 16. Article 054023. DOI:10.1088/1748-9326/abf7f0.
121. Van Seters T.E., Price J.S. The impact of peat harvesting and natural regeneration on the water balance of an abandoned cutover bog, Quebec // Hydrol. Process. 2001. Vol. 15. P. 233–248. DOI:10.1002/hyp.145.
122. Kreutzweiser D.P., Hazlett P.W., Gunn J.M. Logging impacts on the biogeochemistry of boreal forest soils and nutrient export to aquatic systems: a review // Environ. Rev. 2008. Vol. 16. P. 157–179. DOI:10.1139/A08-006.
123. Lamers L.P.M., Vile M.A., Grootjans A.P., Acreman M.C., van Diggelen R., Evans M.G., et al. Ecological restoration of rich fens in Europe and North America: from trial and error to an evidence-based approach // Biol. Rev. 2015. Vol. 90. P. 182–203. DOI:10.1111/brv.12102.
124. Bartsch A., Pointner G., Nitze I., Efimova A., Jakober D., Ley S., et al. Expanding infrastructure and growing anthropogenic impacts along Arctic coasts // Environ. Res. Lett. 2021. Vol. 16. Article 115013. DOI:10.1088/1748-9326/ac3176.
125. Maslakov A., Zotova L., Komova N., Grishchenko M., Zamolodchikov D., Zelensky G. Vulnerability of the permafrost landscapes in the Eastern Chukotka coastal plains to human impact and climate change // Land. 2021. Vol. 10. Article 445. DOI:10.3390/land10050445.
126. Beer C., Zimov N., Olofsson J., Porada P., Zimov S. Protection of permafrost soils from thawing by increasing herbivore density // Sci. Rep. 2020. Vol. 10. Article 4170. DOI:10.1038/s41598-020-60938-y.
127. Johnson L. The fearful symmetry of Arctic climate change: accumulation by degradation // Environ. Plan. D. 2010. Vol. 28. P. 828–847. DOI:10.1068/d9308.
128. Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Comiso J.C., Epstein H.E., Jia G., et al. Circumpolar Arctic tundra vegetation change is linked to sea ice decline // Earth Interact. 2010. Vol. 14. P. 1–20. DOI:10.1175/2010EI315.1.
129. Kling G. Land Water Interactions // Alaska's Changing Arctic: Ecological Consequences for Tundra, Streams, and Lakes (edited by J.E. Hobbie, G.W. Kling). Oxford University Press, 2010. DOI:10.1093/acprof:osobl/9780199860401.001.0001.
130. MacDonald E.N., Tank S.E., Kokelj S.V., Froese D.G., Hutchins R.H.S. Permafrost-derived dissolved organic matter composition varies across permafrost end-members in the Western Canadian Arctic // Environ. Res. Lett. 2021. Vol. 16. Article 024036. DOI:10.1088/1748-9326/abd971.
131. Campeau A., Bishop K., Amvrosiadi N., Billett M.F., Garnett M.H., Laudon H., et al. Current forest carbon fixation fuels stream CO2 emissions // Nat. Commun. 2019. Vol. 10. Article 1876. DOI:10.1038/s41467-019-09922-3.
132. Harms T.K., Cook C.L., Wlostowski A.N., Gooseff M.N., Godsey S.E. Spiraling down hillslopes: nutrient uptake from water tracks in a warming Arctic // Ecosystems. 2019. Vol. 22. P. 1546–1560. DOI:10.1007/s10021-019-00355-z.
133. Shogren A.J., Zarnetske J.P., Abbott B.W., Iannucci F., Medvedeff A., Cairns S., et al. Arctic concentration-discharge relationships for dissolved organic carbon and nitrate vary with landscape and season // Limnol. Oceanogr. 2021. Vol. 66. P. S197–S215. DOI:10.1002/lno.11682.
134. Frederick J.M., Buffett B.A. Submarine groundwater discharge as a possible formation mechanism for permafrost-associated gas hydrate on the circum-Arctic continental shelf // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2016. Vol. 121. P. 1383–1404. DOI:10.1002/2015JB012627.
135. Overduin P.P., Schneider von Deimling T., Miesner F., Grigoriev M.N., Ruppel C., Vasiliev A., et al. Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP) // J. Geophys. Res. Oceans. 2019. Vol. 124. P. 3490–3507. DOI:10.1029/2018JC014675.
136. Angelopoulos M., Overduin P.P., Miesner F., Grigoriev M.N., Vasiliev A.A. Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost // Permafr. Periglac Process. 2020. Vol. 31. P. 442–453. DOI:10.1002/ppp.2061.
137. Snow, Water, Ice and Permafrost. Summary for Policy-Makers. Oslo, Norway. Working Group of the Arctic Council, Arctic Monitoring & Assessment Programme (AMAP), 2017. URL: https://www.amap.no/documents/doc/snow-water-ice-and-permafrost.-summary-for-policy-makers/1532.
138. Steinacher M., Joos F., Frölicher T.L., Plattner G.K., Doney S.C. Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model // Biogeosciences. 2009. Vol. 6. P. 515–533. DOI:10.5194/ bg-6-515-2009.
139. Carmack E.C., Yamamoto-Kawai M., Haine T.W.N., Bacon S., Bluhm B.A., Lique C., et al. Freshwater and its role in the Arctic marine system: sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2016. Vol. 121. P. 675–717. DOI:10.1002/2015JG003140.

140. Boers N., Rypdal M. Critical slowing down suggests that the Western Greenland ice sheet is close to a tipping point // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2021. Vol. 118. № 21. Article e2024192118. DOI:10.1073/pnas.2024192118.

141. King M.D., Howat I.M., Candela S.G., Noh M.J., Jeong S., Noël B.P.Y., et al. Dynamic ice loss from the Greenland ice sheet driven by sustained glacier retreat // Commun. Earth Environ. 2020. Vol. 1. P. 1–7. DOI:10.1038/s43247-020-0001-2.

142. Feng D., Gleason C. J., Lin P., Yang X., Pan M., Ishitsuka Y. Recent changes to Arctic river discharge // Nat. Commun. 2021. Vol. 12. Article 6917. DOI:10.1038/s41467-021-27228-1.

143. Tank S.E., Striegl R.G., McClelland J.W., Kokelj S.V. Multi-decadal increases in dissolved organic carbon and alkalinity flux from the Mackenzie drainage basin to the Arctic Ocean // Environ. Res. Lett. 2016. Vol. 11. Article 054015. DOI:10.1088/1748-9326/11/5/054015.

144. Toohey R.C., Herman-Mercer N.M., Schuster P.F., Mutter E.A., Koch J.C. Multidecadal increases in the Yukon river basin of chemical fluxes as indicators of changing flowpaths, groundwater, and permafrost // Geophys. Res. Lett. 2016. Vol. 43. № 12. P. 120–12130. DOI:10.1002/2016GL070817.

145. Fritz M., Vonk J.E., Lantuit H. Collapsing Arctic coastlines // Nat. Clim. Change. 2017. Vol. 7. P. 6–7. DOI:10.1038/nclimate3188.

146. Drake T.W., Tank S.E., Zhulidov A.V., Holmes R.M., Gurtovaya T., Spencer R.G.M. Increasing alkalinity export from large Russian Arctic rivers // Environ. Sci. Technol. 2018. Vol. 52. P. 8302–8308. DOI:10.1021/acs.est.8b01051.

147. Connolly C.T., Cardenas M.B., Burkart G.A., Spencer R.G.M., McClelland J.W. Groundwater as a major source of dissolved organic matter to Arctic coastal waters // Nat. Commun. 2020. Vol. 11. Article 1479. DOI:10.1038/s41467-020-15250-8.

148. Mann P. J., Strauss J., Palmtag J., Dowdy K., Ogneva O., Fuchs M., et al. Degrading permafrost river catchments and their impact on Arctic Ocean nearshore processes // Ambio. 2022. Vol. 51. P. 439–455. DOI:10.1007/s13280-021-01666-z.

149. Jones B.M., Arp C.D., Jorgenson M.T., Hinkel K.M., Schmutz J.A., Flint P.L. Increase in the rate and uniformity of coastline erosion in Arctic Alaska // Geophys. Res. Lett. 2009. Vol. 36. Article L03503. DOI:10.1029/2008GL036205.

150. Lantuit H., Overduin P.P., Couture N., Wetterich S., Aré F., Atkinson D., et al. The Arctic coastal dynamics database: a new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines // Estuaries Coasts. 2012. Vol. 35. P. 383–400. DOI:10.1007/s12237-010-9362-6.

151. Berry H. B., Whalen D., Lim M. Long-term ice-rich permafrost coast sensitivity to air temperatures and storm influence: lessons from Pullen Island, Northwest Territories, Canada // Arct. Sci. 2021. Vol. 7. P. 723–745. DOI:10.1139/as-2020-0003.

152. Guimond J.A., Mohammed A.A., Walvoord M.A., Bense V.F., Kurylyk B.L. Saltwater intrusion intensifies coastal permafrost thaw // Geophys. Res. Lett. 2021. Vol. 48. Article e2021GL094776. DOI:10.1029/2021GL094776.

153. Günther F., Overduin P.P., Yakshina I.A., Opel T., Baranskaya A.V., Grigoriev M.N. Observing Muostakh disappear: permafrost thaw subsidence and erosion of a ground-ice-rich island in response to Arctic summer warming and sea ice reduction // Cryosphere. 2015. Vol. 9. P. 151–178. DOI:10.5194/tc-9-151-2015.

154. Treat C.C., Wollheim W.M., Varner R.K., Bowden W.B. Longer thaw seasons increase nitrogen availability for leaching during fall in tundra soils // Environ. Res. Lett. 2016. Vol. 11. Article 064013. DOI:10.1088/1748-9326/11/6/064013.

155. Carey J.C., Gewirtzman J., Johnston S.E., Kurtz A., Tang J., Vieillard A.M., et al. Arctic river dissolved and biogenic silicon exports-current conditions and future changes with warming // Glob. Biogeochem. Cycles. 2020. Vol. 34. Article e2019GB006308. DOI:10.1029/2019GB006308.

156. Shogren A.J., Zarnetske J.P., Abbott B.W., Iannucci F., Bowden W.B. We cannot shrug off the shoulder seasons: addressing knowledge and data gaps in an Arctic headwater // Environ. Res. Lett. 2020. Vol. 15. Article 104027. DOI:10.1088/ 1748-9326/ab9d3c.

157. Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J., Tank S.E., Bulygina E., Eglinton T.I., et al. Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas // Estuaries Coasts. 2012. Vol. 35. P. 369–382. DOI:10.1007/s12237-011-9386-6.

158. St. Pierre K.A., Zolkos S., Shakil S., Tank S.E., St Louis V.L., Kokelj S.V. Unprecedented increases in total and methyl mercury concentrations downstream of retrogressive thaw slumps in the Western Canadian Arctic // Environ. Sci. Technol. 2018. Vol. 52. P. 14099–14109. DOI:10.1021/acs.est.8b05348.

159. Yao T., Xue Y., Chen D., Chen F., Thompson L., Cui P., et al. Recent third pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2019. Vol. 100. P. 423–444. DOI:10.1175/BAMS-D-17-0057.1.

160. Loiko S.V., Pokrovsky O.S., Raudina T.V., Lim A., Kolesnichenko L.G., Shirokova L.S., et al. Abrupt permafrost collapse enhances organic carbon, CO2, nutrient and metal release into surface waters // Chem. Geol. 2017. Vol. 471. P. 153–165. DOI:10.1016/j.chemgeo.2017.10.002.

161. Perryman C.R., Wirsing J., Bennett K.A., Brennick O., Perry A.L., Williamson N., et al. Heavy Metals in the Arctic: distribution and enrichment of five metals in Alaskan soils // PLOS ONE. 2020. Vol. 15. Article e0233297. DOI:10.1371/journal.pone.0233297.

162. Fahnestock M.F., Bryce J.G., McCalley C.K., Montesdeoca M., Bai S., Li Y., et al. Mercury reallocation in thawing subarctic peatlands // Geochem. Persp. Let. 2019. Vol. 11. P. 33–38. DOI:10.7185/geochemlet.1922.

163. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere. Oslo, Norway: Working Group of the Arctic Council, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2011. URL: http://www.amap.no/documents/doc/snowwater-ice-and-permafrost-in-the-arctic-swipa-climate-change-and-thecryosphere/743.

164. Stern G.A., Macdonald R.W., Outridge P.M., Wilson S., Chételat J., Cole A., et al. How does climate change influence Arctic mercury? // Sci. Total Environ. 2012. Vol. 414. P. 22–42. DOI:10.1016/j.scitotenv.2011.10.039.

165. Abbott B.W., Baranov V., Mendoza-Lera C., Nikolakopoulou M., Harjung A., Kolbe T., et al. Using multi-tracer inference to move beyond single-catchment ecohydrology // Earth-Science Rev. 2016. Vol. 160. P. 19–42. DOI:10.1016/j.earscirev.2016.06.014.

166. Bates N.R., Mathis J.T. The Arctic Ocean marine carbon cycle: evaluation of air-sea CO2 exchanges, ocean acidification impacts and potential feedbacks // Biogeosciences. Vol. 6. P. 2433–2459. DOI:10.5194/bg-6-2433-2009.

167. Doney S.C., Fabry V.J., Feely R.A., Kleypas J.A. Ocean acidification: the other CO2 problem // Annu. Rev. Mar. Sci. 2009. Vol. 1. P. 169–192. DOI:10.1146/annurev.marine.010908.163834.

168. Yamamoto-Kawai M., McLaughlin F.A., Carmack E.C., Nishino S., Shimada K. Aragonite undersaturation in the Arctic Ocean: effects of ocean acidification and sea ice melt // Science. 2009. Vol. 326. P. 1098–1100. DOI:10.1126/science.1174190.

169. Denman K., Christian J.R., Steiner N., Portner H.O., Nojiri Y. Potential impacts of future ocean acidification on marine ecosystems and fisheries: current knowledge and recommendations for future research // ICES J. Mar. Sci. 2011. Vol. 68. P. 1019–1029. DOI:10.1093/icesjms/fsr074.

170. McClelland J.W., Holmes R.M., Dunton K.H., Macdonald R.W. (2012). The Arctic Ocean estuary. estuaries coasts. Vol. 35. P. 353–368. DOI:10.1007/s12237-010-9357-3.

171. Alling V., Porcelli D., Mörth C.M., Anderson L.G., Sanchez-Garcia L., Gustafsson Ö., et al. Degradation of terrestrial organic carbon, primary production and out-gassing of CO2 in the Laptev and East Siberian seas as inferred from δ13C values of DIC // Geochimica Cosmochimica Acta. 2012. Vol. 95. P. 143–159. DOI:10.1016/j.gca.2012.07.028.

172. Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö., Anderson L.G., Sergienko V., Pugach S., et al. Acidification of East Siberian arctic shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon // Nat. Geosci. 2016. Vol. 9. P. 361–365. DOI:10.1038/ngeo2695.

173. Tanski G., Bröder L., Wagner D., Knoblauch C., Lantuit H., Beer C., et al. Permafrost carbon and CO2 pathways differ at contrasting coastal erosion sites in the Canadian Arctic // Front. Earth Sci. 2021. Vol. 9. DOI:10.3389/feart.2021.630493.

174. Vonk J.E., Sánchez-García L., van Dongen B.E., Alling V., Kosmach D., Charkin A., et al. Activation of old carbon by erosion of coastal and Subsea permafrost in Arctic Siberia // Nature. 2012. Vol. 489. P. 137–140. DOI:10.1038/nature11392.

175. Ouyang Z., Qi D., Chen L., Takahashi T., Zhong W., DeGrandpre M.D., et al. Sea-ice loss amplifies summertime decadal CO2 increase in the Western Arctic Ocean // Nat. Clim. Chang. 2020. Vol. 10. P. 678–684. DOI:10.1038/s41558-020-0784-2.

176. Arrigo K. R., van Dijken G.L., Cameron M.A., van der Grient J., Wedding L.M., Hazen L., et al. Synergistic interactions among growing stressors increase risk to an Arctic ecosystem // Nat. Commun. 2020. Vol. 11. Article 6255. DOI:10.1038/s41467-020-19899-z.

177. Lewis K.M., van Dijken G.L., Arrigo K.R. Changes in phytoplankton concentration now drive increased Arctic Ocean primary production // Science. 2020. Vol. 369. P. 198–202. DOI:10.1126/science.aay8380.

178. Terhaar J., Lauerwald R., Regnier P., Gruber N., Bopp L. Around one third of current Arctic Ocean primary production sustained by rivers and coastal erosion // Nat. Commun. 2021. Vol. 12. Article 169. DOI:10.1038/s41467-020-20470-z.

179. Fewster R.E., Morris P.J., Ivanovic R.F., Swindles G.T., Peregon A.M., Smith C.J. Imminent loss of climate space for permafrost peatlands in Europe and Western Siberia // Nat. Clim. Chang. 2022. Vol. 12. P. 373–379. DOI:10.1038/ s41558-022-01296-7.

180. Versen J., Mnatsakanyan Z., Urpelainen J. Concerns of climate intervention: understanding geoengineering security concerns in the Arctic and beyond // Clim. Change. 2022. Vol. 171. Article 27. DOI:10.1007/s10584-022-03345-8.

181. Randers J., Goluke U. An Earth system model shows self-sustained thawing of permafrost even if all man-made GHG emissions stop in 2020 // Sci. Rep. 2020. Vol. 10. Article 18456. DOI:10.1038/s41598-020-75481-z.

182. Shu S., Jain A.K., Koven C.D., Mishra U. Estimation of permafrost SOC stock and turnover time using a land surface model with vertical heterogeneity of permafrost soils // Glob. Biogeochem. Cycles. 2020. Vol. 34. Article e2020GB006585. DOI:10.1029/2020GB006585.

183. Smith N.D., Chadburn S.E., Burke E.J., Schanke Aas K., Althuizen I.H.J., Boike J., et al. Explicitly modelling microtopography in permafrost landscapes in a land-surface model (JULES vn5.4_microtopography) // Geosci. Model Dev. Discuss. 2021. P. 1–43. DOI:10.5194/gmd-2021-285.

184. Wiltshire A.J., Burke E.J., Chadburn S.E., Jones C.D., Cox P.M., Davies- Barnard T., et al. JULES-CN: a coupled terrestrial carbon-nitrogen scheme (JULES vn5.1) // Geosci. Model Dev. 2021. Vol. 14. P. 2161–2186. DOI:10.5194/gmd-14-2161-2021.

185. Chadburn S.E., Burke E.J., Gallego-Sala A.V., Smith N.D., Bret-Harte M.S., Charman D.J., et al. A new approach to simulate peat accumulation, degradation and stability in a global land surface scheme (JULES vn5.8_accumulate_soil) for northern and temperate peatlands // Geosci. Model Dev. 2022. Vol. 15. P. 1633–1657. DOI:10.5194/gmd-15-1633-2022.

186. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, 2021. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf.

187. MacDougall A.H. Estimated effect of the permafrost carbon feedback on the zero emissions commitment to climate change // Biogeosciences. 2021. Vol. 18. P. 4937–4952. DOI:10.5194/bg-18-4937-2021.

188. Kimmerer R.W. Weaving traditional ecological knowledge into biological education: a call to action // BioScience. 2002. Vol. 52. P. 432–438. DOI:10.1641/0006-3568(2002)052[0432:wtekib]2.0.co;2.

189. Cheng F., Garzione C., Li X., Salzmann U., Schwarz F., Haywood A.M., et al. Alpine permafrost could account for a quarter of thawed carbon based on Plio-Pleistocene paleoclimate analogue // Nat. Commun. 2022. Vol. 13. Article 1329. DOI:10.1038/s41467-022-29011-2.

190. Foley J.A., Ramankutty N., Brauman K.A., Cassidy E.S., Gerber J.S., Johnston M., et al. Solutions for a cultivated planet // Nature. 2011. Vol. 478. P. 337–342. DOI:10.1038/nature10452.

191. Breyer C., Bogdanov D., Khalili S., Keiner D. Solar Photovoltaics in 100% Renewable Energy Systems // Encyclopedia of Sustainability Science and Technology (edited by R.A. Meyers). New York, NY: Springer, 2021. P. 1–30. DOI:10.1007/978-1-4939-2493-6_1071-1.

192. Chapin F.S., Weber E.U., Bennett E.M., Biggs R., van den Bergh J., Adger W.N., et al. Earth stewardship: shaping a sustainable future through interacting policy and norm shifts // Ambio. 2022. Vol. 5. P. 1–14. DOI:10.1007/s13280-022- 01721-3.

193. Errigo I.M., Abbott B.W., Mendoza D.L., Chaney R.A., Freeman A., Glenn J., et al. Human health and economic costs of air pollution in Utah: an expert assessment // Atmosphere. 2020. Vol. 11. № 11. Article 1238. URL: https://doi.org/10.3390/atmos11111238.

194. Shindell D., Ru M., Zhang Y., Seltzer K., Faluvegi G., Nazarenko L., et al. Temporal and spatial distribution of health, labor, and crop benefits of climate change mitigation in the United States // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2021. Vol. 118. № 46. Article e2104061118. DOI:10.1073/pnas.2104061118.

195. Vohra K., Vodonos A., Schwartz J., Marais E.A., Sulprizio M.P., Mickley L.J. Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: results from GEOS-Chem // Environ. Res. 2021. Vol. 195. Article 110754. DOI:10.1016/j.envres.2021.110754.

196. Abbott B.W., Bliss A., Mitchell L., Barros L., Moyer T., Moore F., et al. Clean Electrification of the U.S. Economy. A crash course on the renewable revolution. Provo, Utah, USA: Brigham Young University, 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/357469282_Clean_electrification_of_the_US_economy.

197. Steffen W., Rockström J., Richardson K., Lenton T.M., Folke C., Liverman D., et al. Trajectories of the Earth system in the Anthropocene // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2018. Vol. 115. P. 8252–8259. DOI:10.1073/pnas.1810141115.

198. Bergstrom D.M., Wienecke B.C., Hoff J., Hughes L., Lindenmayer D.B., Ainsworth T.D., et al. Combating ecosystem collapse from the tropics to the Antarctic // Glob. Change Biol. 2021. Vol. 27. P. 1692–1703. DOI:10.1111/gcb.15539.

199. Lawrence M.G., Schäfer S., Muri H., Scott V., Oschlies A., Vaughan N.E., et al. Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals // Nat. Commun. 2018. Vol. 9. Article 3734. DOI:10.1038/s41467-018-05938-3.

200. Zarnetske P.L., Gurevitch J., Franklin J., Groffman P.M., Harrison C.S., Hellmann J.J., et al. Potential ecological impacts of climate intervention by reflecting sunlight to cool Earth // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2021. Vol. 118. № 15. Article e1921854118. DOI:10.1073/pnas.1921854118.

201. Olson R.L. Soft geoengineering: a gentler approach to addressing climate change // Environ. Sci. Policy Sustain. Dev. 2012. Vol. 54. P. 29–39. DOI:10.1080/00139157.2012.711672.

202. Harper A.B., Powell T., Cox P. M., House J., Huntingford C., Lenton T.M., et al. Land-use emissions play a critical role in land-based mitigation for Paris Climate Targets // Nat. Commun. 2018. Vol. 9. Article 2938. DOI:10.1038/s41467-018-05340-z.

203. Whyte K.P. Indigeneity in geoengineering discourses: some considerations // Ethics, Policy & Environ. 2018. Vol. 21. P. 289–307. DOI:10.1080/21550085.2018.1562529.

204. Zampieri L., Goessling H.F. Sea ice targeted geoengineering can delay Arctic sea ice decline but not global warming // Earth's Future. 2019. Vol. 7. P. 1296–1306. DOI:10.1029/2019EF001230.

205. Tuana N., Sriver R.L., Svoboda T., Olson R., Irvine P.J., Haqq-Misra J., et al. Towards integrated ethical and scientific analysis of geoengineering: a research agenda // Ethics, Policy & Environ. 2012. Vol. 15. P. 136–157. DOI:10.1080/ 21550085.2012.685557.

206. Tilmes S., Müller R., Salawitch R. The sensitivity of polar ozone depletion to proposed geoengineering schemes // Science. 2008. Vol. 320. P. 1201–1204. DOI:10.1126/science.1153966.

207. Proctor J., Hsiang S., Burney J., Burke M., Schlenker W. Estimating global agricultural effects of geoengineering using volcanic eruptions // Nature. 2018. Vol. 560. P. 480–483. DOI:10.1038/s41586-018-0417-3.

208. Hanssen S.V., Daioglou V., Steinmann Z.J.N., Doelman J.C., Van Vuuren D.P., Huijbregts M.A.J. The climate change mitigation potential of bioenergy with carbon capture and storage // Nat. Clim. Chang. 2020. Vol. 10. P. 1023–1029. DOI:10.1038/s41558-020-0885-y.

209. Calì Quaglia F., Meloni D., Muscari G., Di Iorio T., Ciardini V., Pace G., et al. On the radiative impact of biomass-burning aerosols in the Arctic: the August 2017 case study // Remote Sens. 2022. Vol. 14. Article 313. DOI:10.3390/rs14020313.

210. Yue S., Zhu J., Chen S., Xie Q., Li W., Li L., et al. Brown carbon from biomass burning imposes strong circum-Arctic warming // One Earth. 2022. Vol. 5. № 3. P. 293–304. DOI:10.1016/j.oneear.2022.02.006.

211. Hammond W.M., Williams A.P., Abatzoglou J.T., Adams H.D., Klein T., López R., et al. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests // Nat. Commun. 2022. Vol. 13. Article 1761. DOI:10.1038/s41467-022-29289-2.

212. Ritchie P.D.L., Clarke J.J., Cox P.M., Huntingford C. Overshooting tipping point thresholds in a changing climate // Nature. 2021. Vol. 592. P. 517–523. DOI:10.1038/s41586-021-03263-2.

213. Bogdanov D., Ram M., Aghahosseini A., Gulagi A., Oyewo A. S., Child M., et al. Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability // Energy. 2021. Vol. 227. Article 120467. DOI:10.1016/j.energy.2021.120467.

214. Victoria M., Haegel N., Peters I. M., Sinton R., Jäger-Waldau A., del Cañizo C., et al. Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future // Joule. 2021. Vol. 5. P. 1041–1056. DOI:10.1016/j.joule.2021.03.005.

215. Jacobson M.Z., von Krauland A.K., Coughlin S.J., Palmer F.C., Smith M.M. Zero air pollution and zero carbon from all energy at low cost and without blackouts in variable weather throughout the U.S. with 100% wind-water-solar and storage // Renew. Energy. 2022. Vol. 184. P. 430–442. DOI:10.1016/j.renene.2021.11.067.

216. Global Energy Review 2021. Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO2 emissions in 2021. International Energy Agency (IEA), 2021. 36 p.

217. World Energy Outlook. International Energy Agency (IEA), 2021. 386 p.

218. Rockström J., Gaffney O., Rogelj J., Meinshausen M., Nakicenovic N., Schellnhuber H.J. A roadmap for rapid decarbonization // Science. 2017. Vol. 355. P. 1269–1271. DOI:10.1126/science.aah3443.

219. Haegel N.M., Atwater H., Barnes T., Breyer C., Burrell A., Chiang Y.M., et al. Terawatt-scale photovoltaics: transform global energy // Science. 2019. Vol. 364. P. 836–838. DOI:10.1126/science.aaw1845.

220. Breyer C., Fasihi M., Aghahosseini A. Carbon dioxide direct air capture for effective climate change mitigation based on renewable electricity: a new type of energy system sector coupling // Mitig. Adapt Strateg. Glob. Change. 2020. Vol. 25. P. 43–65. DOI:10.1007/s11027-019-9847-y.

221. Kristoffersen B., Langhelle O. Sustainable development as a global-Arctic matter: imaginaries and controversies // Governing Arctic Change (edited by K. Keil, S. Knecht). London: Palgrave Macmillan UK, 2017. P. 21–41. doi:10.1057/978-1-137-50884-3_2.

222. Inuit Circumpolar Council – United Voice of the Arctic [ICC website]. URL: https://www.inuitcircumpolar.com (accessed February 20, 2022).

223. Koivurova T., Smieszek M. The Arctic Council at 25: Incremental Building of a More Ambitious Inter-Governmental Forum // Global Arctic (edited by M. Finger, G. Rekvig). Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 407–424. DOI:10.1007/978-3-030-81253-9_21.

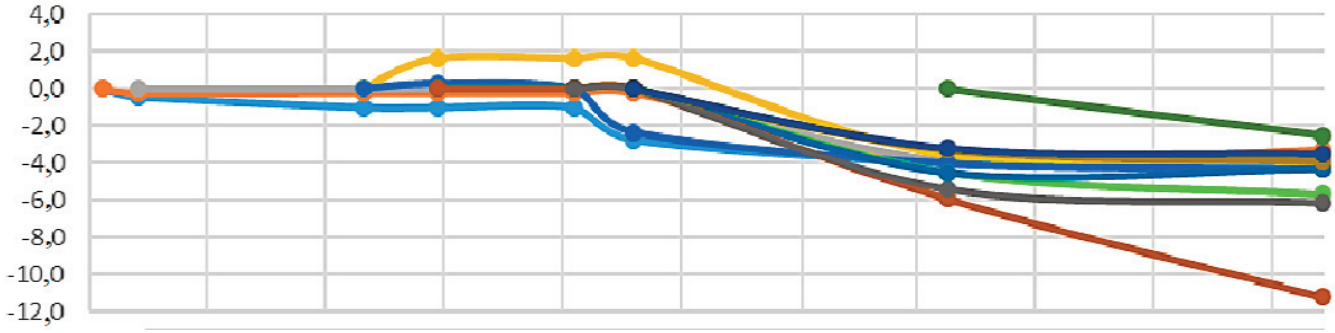
Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо» выходит в формате *PDF. 4 выпуска в 2026 году.



WWW.GEOINFO.RU

DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-1-120-127 УДК 69.058.4



РОЛЬ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ФУНДАМЕНТОВ И ВЕРИФИКАЦИИ ПРИНЯТЫХ РЕШЕНИЙ. Часть 1

Поступила 20.03.2026
Принята к публикации 20.03.2026
Опубликована 27.07.2026

ДРУЗА М.
Кафедра геотехники, строительный факультет, Жилинский университет, г. Жилина, Словакия
drusa@fstav.uniza.sk

ВЛЧЕК Й.
Кафедра геотехники, строительный факультет, Жилинский университет, г. Жилина, Словакия

ОРИНИНОВА Л.
Кафедра геотехники, строительный факультет, Жилинский университет, г. Жилина, Словакия

АННОТАЦИЯ

В 2016 году в международном рецензируемом научном журнале Civil and Environmental Engineering («Гражданское строительство и инженерная защита окружающей среды») была опубликована статья словацких геотехников «Роль геотехнического мониторинга при проектировании фундаментов и верификации принятых решений. Часть 1» (Drusa et al., 2016). Вызывает интерес то, что в 2021 году вышло продолжение этого исследования – часть 2. Временной разрыв в 5 лет между этими двумя публикациями объясняется тем, что они имели разные цели и рассматривали поведение одного и того же объекта (торгово-развлекательного центра «Аупарк» в словацком городе Жилина) на разных этапах его жизненного цикла. Если в первой части авторы описывали инженерно-геологические условия площадки и сравнивали расчетные осадки с результатами геодезических измерений в период строительства (до завершения строительства каркаса здания), то во второй части акцент сместился на анализ надежности принятых проектных решений путем сопоставления результатов компьютерного моделирования с фактическим поведением здания уже под эксплуатационной нагрузкой. Пауза была необходима для накопления данных долгосрочного мониторинга и применения новых расчетных технологий для верификации проекта. Сегодня представляем немного сокращенный и адаптированный перевод первой части данной работы, которая находится в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0 (в ближайшем будущем мы опубликуем перевод и второй части). Полная ссылка на источник для перевода (Drusa et al., 2016) приведена в конце.

В течение долгого времени проектирование квадратных фундаментов не считалось проблематичным. Фундаменты проектируются на основе определения несущей способности грунтового основания, неточности в определении которой зачастую влияют на эффективность (экономичность) проектного решения, а ее возможные нарушения встречаются редко. Более важным фактором являются конечные деформации, относящиеся ко второй группе предельных состояний: осадка, относительная осадка, крен, чрезмерная деформация.

Сегодняшняя тенденция к снижению затрат на получение необходимых данных в ходе инженерных изысканий и на подготовку проектной документации во многих случаях приводит к неблагоприятным последствиям, таким как осадки и неравномерные осадки оснований объектов строительства. Проблема заключается в разнообразии аналитических методов оценки предельных состояний по второй группе предельных состояний (по эксплуатационной пригодности, по деформациям), применяемых в различных европейских странах, а также в недооценке рисков проектных решений.

Авторы статьи (Drusa et al., 2016) стремились показать, что наибольшее влияние на адекватность и безопасность проекта оказывает максимально точное определение показателей геотехнических свойств и правильный выбор метода расчета (чтобы продемонстрировать это, позже был использован метод

моделирования Монте-Карло для анализа различных геотехнических параметров, результаты которого будут представлены во второй части работы).

Если все строительные процессы проходят успешно, поведение зданий редко подвергается повторной оценке. Однако, если есть возможность участвовать в инженерных изысканиях, определении геотехнических характеристик и контроле строительства с использованием инструментов геотехнического мониторинга, целесообразно провести анализ всего процесса для выявления скрытых рисков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

геотехнический мониторинг; полевые геотехнические испытания; осадки основания; замена грунта.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Друза М., Влчек Й., Орининова Л. Роль геотехнического мониторинга при проектировании фундаментов и верификации принятых решений. Часть 1 (пер. с англ.) // Геоинфо. 2026. Т. 8. № 1. С. 120–127. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-1-120–127.

THE ROLE OF GEOTECHNICAL MONITORING AT DESIGN OF FOUNDATION STRUCTURES AND THEIR VERIFICATION – Part 1

Received: 20.03.2026
Accepted for publication 20.03.2026
Published 27.07.2026

DRUSA M.
Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, University of Žilina, Žilina, Slovakia
drusa@fstav.uniza.sk

VLČEK J.
Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, University of Žilina, Žilina, Slovakia

ORININOVÁ L.
Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, University of Žilina, Žilina, Slovakia

ABSTRACT

In 2016, an article by Slovak geotechnical engineers titled "The role of geotechnical monitoring at design of foundation structures and their verification – part 1" (Drusa et al., 2016) was published in the international peer-reviewed scientific journal "Civil and Environmental Engineering". It is of particular interest that a continuation of this study (part 2) was published in 2021. The five-year gap between these two publications is explained by the fact that they had different objectives and examined the behavior of the same building (the Aupark shopping and entertainment center in the Slovak city of Žilina) at different stages of its life cycle. While in the first part the authors described the engineering-geological conditions of the construction site and compared calculated settlements with the results of geodetic measurements during the construction phase (up to the completion of the building frame), the second part focused on analyzing the reliability of the adopted design decisions by comparing modeling results with the actual behavior of the building already under operational load. The pause was necessary to accumulate long-term monitoring data and to apply new calculation technologies for project verification. Today, we present a slightly abridged and adapted translation of the first part of this paper, which is available in open access under the CC BY 4.0 license (the translation of the second part will be published in the near future). The full reference to the source of the translation (Drusa et al., 2016) is provided at the end.

For a long time, design of the square foundations has not posed a problem in engineering practice. Foundations are designed on the basis of determining the bearing capacity of the subsoil, where irregularities in its determination oftentimes affect the efficiency (economy), while possible failures of bearing resistance of foundation soil are rare. More important factor is the resulting deformation of second limit state under consideration - settlement, relative settlement, tilting and excessive deformation.

The current pressure on the cost reduction of design preparation and obtaining important data from geotechnical survey often results in many cases into adverse effects of settlement and differential settlement of foundations of the buildings. The question lies in a variety of analytical methods for assessing the service ability of limit states used in European countries as well as the underestimation of the proposal risks.

The authors of the article (Drusa et al., 2016) want to document the fact that the most important influence on adequate and safe design is the most accurate determination of geotechnical parameters and the appropriate selection of the calculation method (for the purposes of explanation, Monte Carlo simulation technique was used to test a variety of geotechnical parameters, which will be presented in the second part of the article).

If all construction processes are carried out successfully, rarely are the buildings evaluated once again. However, when the opportunity to participate in the stage of engineering survey and collection of geotechnical parameters as well as the control of the construction process by tools of geotechnical monitoring presents itself, it is valuable to perform the analysis of the entire process for pointing out hidden risks.

KEYWORDS:

geotechnical monitoring; in situ geotechnical testing; settlement of foundation; soil replacement.

FOR CITATION:

Drusa M., Vlček J., Orininová L. Rol' geotekhnicheskogo monitoringa pri proektirovanii fundamentov i verifikatsii prinyatykh reshenii. Chast' 1 (per. s angl.) [The role of geotechnical monitoring at design of foundation structures and their verification – part 1 (translation from English into Russian)] // Geoinfo. 2026. T. 8. № 1. S. 120–127. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-1-120–127 (in Rus.).

Введение

Все более популярным становится мнение о приоритетности расчетов по второй группе предельных состояний (по эксплуатационной пригодности, по деформациям) по сравнению с первой группой (по несущей способности). Безусловно, у такого взгляда есть рациональное зерно: совершенствование расчетных методов приводит ко все более редким случаям повреждения конструкций из-за превышения несущей способности, в то время как чрезмерные или неравномерные осадки остаются актуальной проблемой в разных странах [1].

В данной работе представлены рассчитанные осадки здания торгового центра в городе Жилина, которые сравниваются с фактическими (измеренными) их значениями, полученными путем геодезической съемки с применением высокоточного нивелирования.

Это здание было возведено на ряде отдельных квадратных фундаментов мелкого заложения. Такое решение стало возможным благодаря подходящим геологическим условиям строительной площадки, где активная зона грунтового основания была представлена аллювиальными гравийными отложениями.

Однако была выявлена локальная геологическая аномалия: в правой части площадки мощность гравийных грунтов была очень небольшой, а на уровне подошвы фундамента они в основном имели глинистое заполнение.

Расчеты осадок аналитическими методами не подтвердили допущение проектировщиков о том, что предельное состояние по эксплуатационной пригодности менее чувствительно к входным параметрам. А такая ошибка ведет к недооценке важности модуля упругости, что иногда случается, особенно когда основание сложено несвязными грунтами. В результате обычно возникают значительные осадки, неравномерные осадки и повреждения конструкций фундаментов [2].

Методика инженерно-геологических изысканий

Современная ситуация в строительной отрасли характеризуется усиленным давлением на инженеров с целью сокра-

Таблица 1. Предлагаемые методы полевых испытаний для проектирования отдельных фундаментов мелкого заложения [5]

Геотехнические расчеты	Тип грунта	Метод испытаний					
		SPT	DP	CPT	CPTu	PMT	VST
Несущая способность	мелкозернистый	***	*	**	**	**	**
	крупнозернистый	***	***	*	*	**	*
Консолидационная осадка	мелкозернистый	н/п	н/п	*	***	н/п	н/п
	крупнозернистый	н/п	*	*	*	н/п	н/п
Осадка	мелкозернистый	н/п	*	***	***	*	н/п
	крупнозернистый	***	**	**	**	*	н/п

Примечания: SPT – динамическое зондирование методом стандартного пенетрационного испытания (Standard Penetration Test); DP – динамическое зондирование (Dynamic Penetration); CPT – статическое зондирование конусом (Cone Penetration Test); CPTu — статическое зондирование пьезоконусом (с измерением порового давления); PMT – прессиометрические испытания (PresioMeter Test); VST — испытание методом вращательного среза / крыльчаткой (Vane Shear Test); *метод испытаний:* *** – наиболее подходящий, ** – подходящий, * – наименее подходящий, н/п – неприменимый.

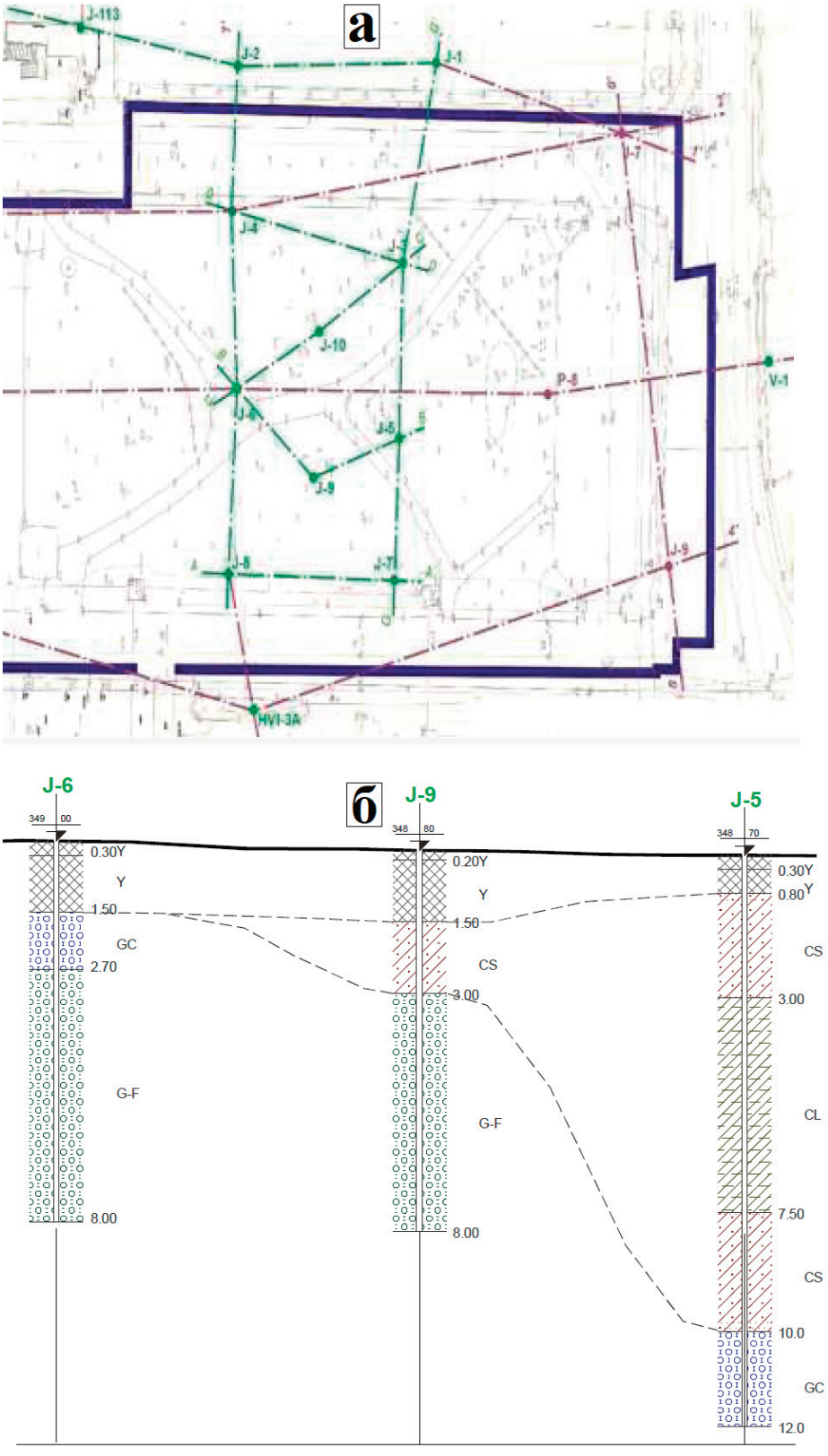


Рис. 1. Расположение скважин при детальных инженерно-геологических изысканиях в зоне малой мощности террасовых отложений на схематичном плане площадки (а) и геологический профиль между скважинами J-6, J-9 и J-5 в масштабе 1:250 по горизонтали и 1:100 по вертикали (б). Скважина J-5 расположена в аномальной части террасовых отложений [6]

щения времени и затрат на стадии проектирования, что оказывает влияние в том числе на этапы инженерных изысканий и подготовки строительной площадки.

Важную роль в изысканиях играют полевые геотехнические испытания [3]. И наблюдаемая тенденция к более широкому применению таких испытаний по сравнению с клас-



Рис. 2. Испытание штампом в зоне замены грунта под отдельный квадратный фундамент

сическими методами геологических исследований (такими как вращательное бурение с отбором образцов грунта и последующие лабораторные исследования) имеет ряд преимуществ [4]. Прежде всего такой подход дает возможность непрерывной оценки геологического разреза, а также обеспечивает экономическую эффективность и сокращение временнЫх затрат по сравнению с лабораторными испытаниями. С помощью статического зондирования грунтов с измерением порового давления (пьезоконусом, CPTu) можно определить тип грунта и многие его свойства. Однако из процесса инженерно-геологических изысканий нельзя полностью исключить лабораторные исследования [2].

В зависимости от характеристик будущего здания или сооружения и геологических условий площадки строительства для проектирования ряда отдельных квадратных фундаментов предлагаются методы изысканий, приведенные в таблице 1.

Геологические условия рассматриваемой территории

Геологические условия рассматриваемой площадки представлены главным образом палеогеновой толщей, в разрезе которой преобладают переслаивающиеся песчаники и аргиллиты, в верхней части полностью выветрелые до состояния глин. Палеогеновое основание перекрыто мощной толщей отложений верхней террасы реки Ваг, подтвержденная мощность которой составляет от 20 до 21 м. Эта терраса сложена гравийным грунтом с пылевато-глинистым заполнителем при содержании мелких фракций от 5 до 15% (класса G-F – Gravel-Fines) или глинистым гравием с содержанием глинистых частиц более 15% (класса GC – Gravelly Clay). Данные грунты местами перекрыты четвертичными песчанистыми глинами с содержанием частиц песка более 15–25% (класса CS – Sandy Clay) или низкопластичными глинами (класса CL – Clay of Low plasticity). (Отметим, что классы грунтов приведены здесь и далее в соответствии с международным стандартом ISO 14688. – *Ред.*) В южной части площадки мощность глин невелика (максимум 1,5 м), а в некоторых местах они отсутствуют вовсе – там они были в свое время заменены техногенным насыпным грунтом. Однако в северной части их мощность достигает 4–10 м. Песчанистые глины имеют тугопластичную консистенцию, низкопластичные глины — от тугопластичной до текучепластичной. Верхний слой на изучаемой территории представлен антропогенными отложениями различной мощности – от 0,3 до 1,9 м (рис. 1).

Гидрогеологические условия на рассматриваемой площадке отражают ее геологическое строение и в основном зависят от количества атмосферных осадков и местного климата. Уровень грунтовых вод приурочен к нижнему слою террасы, сложенной гравием. По данным глубоких скважин, он находится на глубине 15,2–17,1 м от дневной поверхности. Грунтовые воды на данной площадке неагрессивны по отношению к бетону и стальной арматуре.

Получение геотехнических параметров

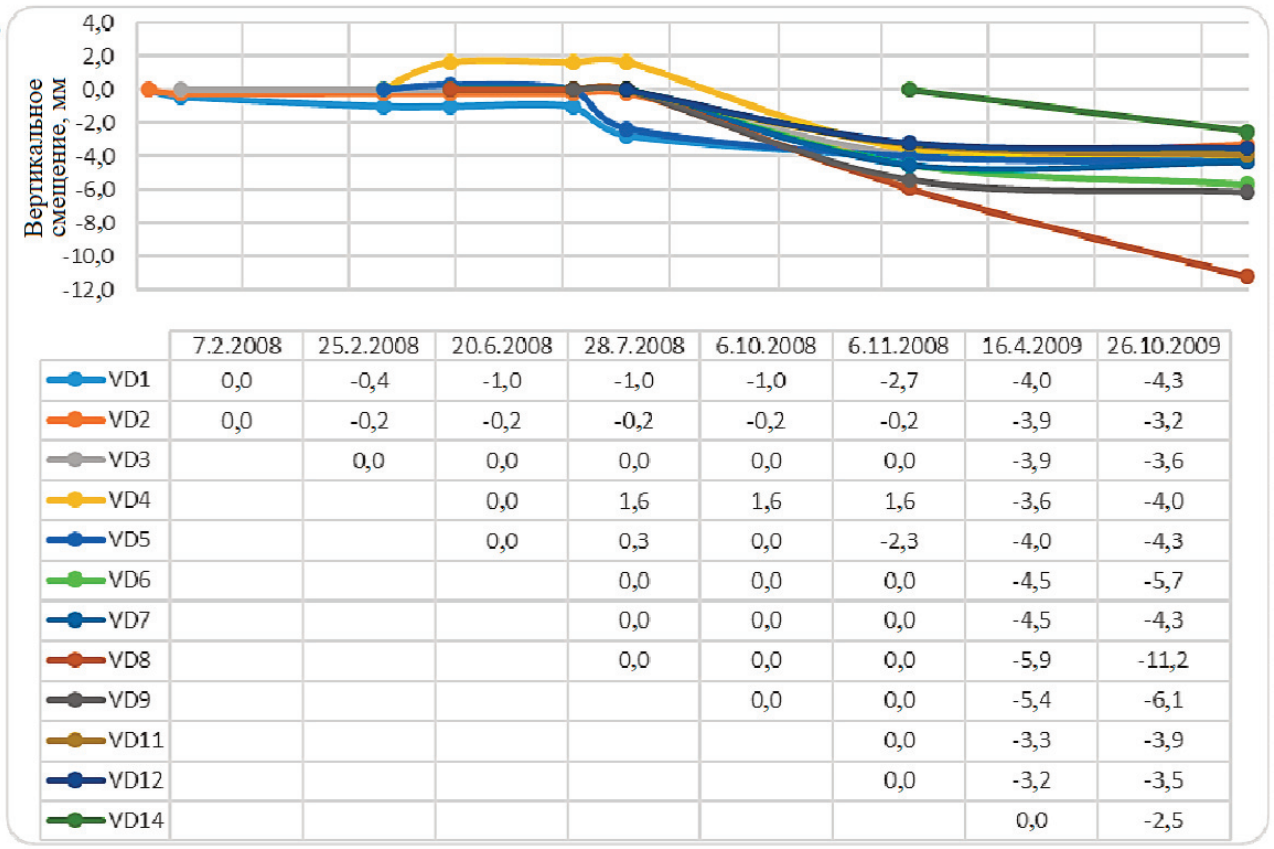
Предполагаемая глубина заложения фундамента составляла 8–10 м. Для ускорения инженерно-геологических изысканий сначала были пробурены скважины глубиной до 8 м (отметим, что данные выработки после окончания изысканий были затампонированы). После завершения бурения в тех же точках были выполнены испытания методом динамического зондирования – начиная с дна скважин и до подошвы террасы, то есть на глубине от 8 до 14–16 м. По результатам этих испытаний и были в основном определены геотехнические параметры гравийных отложений [3, 5]. По значениям динамического сопротивления (q_{dyn}) были рассчитаны модули деформации (E_{def}) с использованием следующих корреляционных зависимостей (с учетом известной информации о геологическом разрезе):

$$E_{def} = n\, q_{dyn}, \quad (1)$$

$$E_{def} = 9\, q_{dyn}^{0,6}, \quad (2)$$

где n – эмпирический коэффициент, зависящий от типа и свойств грунта.

Наиболее приемлемые результаты были получены с помощью уравнения (1). Для гравийного грунта с пылевато-глинистым заполнителем класса G–F использовался локальный эмпирический коэффициент n=5,3. Для глинистого гравия класса GC применялось значение n=3,8. При этом рекомендованное поначалу уравнение (2) в итоге не использовали,



	7.2.2008	25.2.2008	20.6.2008	28.7.2008	6.10.2008	6.11.2008	16.4.2009	26.10.2009
VD1	0,0	-0,4	-1,0	-1,0	-1,0	-2,7	-4,0	-4,3
VD2	0,0	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-3,9	-3,2
VD3		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-3,9	-3,6
VD4			0,0	1,6	1,6	1,6	-3,6	-4,0
VD5			0,0	0,3	0,0	-2,3	-4,0	-4,3
VD6				0,0	0,0	0,0	-4,5	-5,7
VD7				0,0	0,0	0,0	-4,5	-4,3
VD8				0,0	0,0	0,0	-5,9	-11,2
VD9					0,0	0,0	-5,4	-6,1
VD11						0,0	-3,3	-3,9
VD12						0,0	-3,2	-3,5
VD14							0,0	-2,5

Рис. 3. Результаты измерения осадок в процессе строительства (аббревиатуры с номерами рядом с условными знаками – обозначения точек геодезического мониторинга; в примыкающей таблице показаны осадки, мм, для разных точек по датам) [9]

поскольку при сравнении его результатов с модулем деформации, полученным по данным статических испытаний грунта штампами на дне котлована (рис. 2), расхождения были больше, чем в случае использования формулы (1).

Для расчета консолидационных осадок наиболее важным параметром является одометрический модуль деформации (E_{oed}), который может быть рассчитан по следующей формуле:

$$E_{oed} = \frac{E_{def}}{\beta}, \quad (3)$$

где β – переходный коэффициент, являющийся функцией коэффициента Пуассона (ν):

$$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}. \quad (4)$$

Наиболее широко используемый полевой метод оценки деформационных свойств исследуемого слоя, особенно при контроле качества земляных работ, – статическое испытание штампом [7, 8]. В зависимости от прочности грунта и диаметра штампа (d), эффективная глубина активной зоны (мощность сжимаемой толщи) составляет (1,5÷3)d. С применением рекомендуемой стандартной методики можно рассчитать модули деформации по первому ($E_{def,1}$) и по второму ($E_{def,2}$) циклам нагружения.

Затем модули деформации, полученные по данным динамического зондирования с помощью формулы (1) и штамповых испытаний, были сопоставлены для одних и тех же глубин. В результате выявили хорошую корреляцию в случае использования величин $E_{def,2}$. С учетом более высокого вертикального напряжения на уровне контакта между подошвой отдельного фундамента и основанием, максимальный уровень давления (напряжения) под подошвой штампа при испытаниях составлял 400 кПа.

Проектирование отдельных квадратных фундаментов

Генеральный проектировщик рассматриваемого здания с двумя подземными и тремя надземными этажами принял решение использовать отдельные квадратные фундаменты вместо свайного фундамента, в том числе и в зоне крупной аномалии в северо-западной части котлована. Благоприятный уровень грунтовых вод позволил заменить грунт основания на глубину 1,5 м. При этом каждый фундамент был оптимизирован в соответствии с деформационными характеристиками, определенными путем испытаний, а также с действующими нагрузками для достижения приемлемых величин равномерных осадок. Это смелое решение обеспечило значительную экономию средств по сравнению с вариантом свайного фундамента.

Таблица 2. Расчетные и измеренные осадки отдельных квадратных фундаментов [9]

Отдельный фундамент	Осадка, мм			
	без замены грунта основания	с заменой слоя основания на грунтовую подушку с модулем деформации $E_{def,1}$	с заменой слоя основания на грунтовую подушку с модулем деформации $E_{def,2}$	по результатам геодезических измерений методом высокоточного нивелирования после возведения каркаса здания
E12	30,50	12,30	5,70	6,12
D1/14	4,00	0,90	1,10	3,20
F15	9,40	5,50	5,05	3,55

Для подтверждения того, что эксплуатационная расчетная нагрузка не вызывает ни равномерных, ни неравномерных осадок основания, которые могли бы привести к недопустимым деформациям конструкций, должны использоваться расчеты по второй группе предельных состояний (по эксплуатационной пригодности, по деформациям) [9, 10].

Конечная осадка грунтового основания s (общая и послойная) под каждой расчетной точкой фундамента определялась с использованием теории одномерной консолидации, по которой дополнительное (от внешней нагрузки) вертикальное напряжение σ_z корректировалось с учетом структурной прочности грунта.

Полученные величины конечных осадок s были сопоставлены с предельно допустимыми значениями вертикальных деформаций s_{lim} и проанализированы на соответствие условию, что $s < s_{lim}$. Также для каждого участка фундаментов были рассчитаны неравномерные осадки.

В итоге выбор варианта отдельных квадратных фундаментов был признан успешным, и подрядчик выдал распоряжение о проведении долгосрочного геодезического мониторинга методом высокоточного нивелирования для контроля осадок в различных частях этого крупного возводимого здания.

Вертикальные деформации по данным геодезических измерений

Подрядчик разрешил установить геодезические марки на колоннах второго подземного этажа в выбранных местах строившегося здания. Для данной группы точек в 2008–2009 гг. было проведено восемь циклов высокоточного нивелирования с целью получения точных значений осадок на различных этапах строительства. Результаты этих измерений показаны на рисунке 3.

Для расчетов осадок выбрали три отдельных квадратных фундамента, расположенных в непосредственной близости от геодезических марок. Расчеты выполнялись с использованием фактических характеристик грунтового основания и уровней действующих нагрузок. Результаты сравнили с данными высокоточного нивелирования.

Упоминавшиеся выше статические испытания штампами проводились до бетонирования на участках будущих отдельных фундаментов E12, D1/D14 и F15 на уровнях подошв. Эти участки находились вблизи точек геодезического мониторинга VD9, VD2 и VD12, что позволило сравнить расчетные и фактические осадки. Результаты сопоставлены в таблице 2.

Заключение

Значения осадок, полученные методом высокоточного геодезического нивелирования, показали хорошую корреляцию с расчетными величинами. Наилучшее совпадение ожидалось для оси отдельного фундамента E12, так как положение геодезической марки в точке VD-9 точно соответствовало этой оси. Две другие точки мониторинговых измерений располагались на колоннах вблизи фундаментов D1/14 и F15. В случае оси фундамента E12 измеренная осадка была ближе всего к результату расчета на основе значения $E_{def,2}$ (но не $E_{def,1}$, для которого отклонение от измеренной осадки было, наоборот, самым большим). Последнее геодезическое измерение в точке VD-9 было проведено в октябре 2009 года после возведения каркаса здания – зафиксированная осадка составила 6,12 мм. Ожидается, что конечная осадка будет выше, так как на грунт основания под подошвой фундаментов будет действовать уже более полная, в том числе эксплуатационная, нагрузка.

Источник для перевода (Source for the translation)

Drusa M., Vlček J., Orininová L. The role of geotechnical monitoring at design of foundation structures and their verification – part 1 // Civil and Environmental Engineering. 2016. Vol. 12. № 1. P. 21–26. DOI:10.1515/cee-2016-0003.

Список литературы
(References used by the authors of the translated article)

1. Drusa M., Moravčík M. Foundation Structures. Edis Žilina, 2008. 118 p. ISBN 978-80-554-0068-6.
2. Monett J. In Situ Tests in Geotechnical Engineering. London, UK – Hoboken, NJ, USA: ISTE Ltd., John Wiley & Sons, Inc., 2015. 336 p. ISBN 978-1-84821-849-9.
3. Decký M., Drusa M., Pepucha L., Zgútová K. Earth Structures of Transport Constructions. Harlow, Essex, UK: Pearson Education Limited, 2013. 180 p. ISBN 978-1-78399-925-5.
4. Slabej M., Grinč M., Kováč M., Decký M., Šedivý S. Non-invasive diagnostic methods for investigating the quality of Žilina airport's runway // Contributions to Geophysics and Geodesy, 2015. Vol. 45. № 3. P. 237–254. DOI:10.1515/congeo-2015-0022.
5. Geotechnique.info website. URL: http://www.geotechnique.info/SI/SI%20Book%20Chapter%209.pdf. 01/2016.
6. Šustek M. Final report № 2004-13-9-4-450-1257-1 of engineering geological survey, Aupark, Žilina, 2004 (in Slovak).
7. Zgútová K., Decký M., Ďureková D. Non-Destructive Determining CBR Values of Ground Structures of Engineering Constructions // Proceedings of the 12th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2012, June 17–23, 2012. Vol. 4. P. 107–116. ISSN 1314-2704.
8. Vlček J., Ďureková D., Zgútová K. Evaluation of dynamic methods for earthwork assessment // Civil and Environmental Engineering. 2015. Vol. 11. № 1. P. 38–44. DOI:10.1515/cee-2015-0005, ISSN 1336-5835.
9. Pilarčík R. Monitoring of Settlement of Foundations of Aupark Žilina and Their Verification with Design: Diploma Thesis. Žilina, Slovakia: University of Žilina, 2011. 84 p.
10. Rahelison L.H. Analysis of in Situ Test Derived Soil Properties with Traditional and Finite Element Methods: Dissertation Thesis. Gainesville, Florida, USA: University of Florida, 2002. 248 p.

Независимый электронный журнал

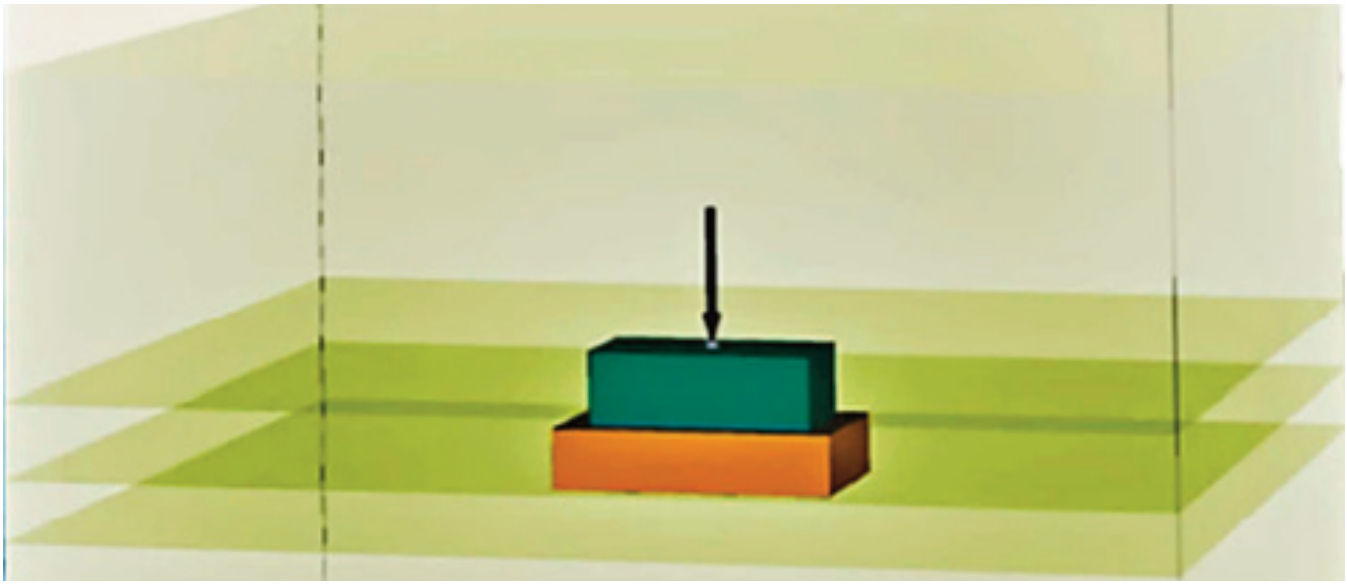
ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
выходит в формате *PDF.
10 выпусков в год.



WWW.GEOINFO.RU

DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-1-128-139 УДК 624.151.5; 624.131.542; 69.058.4; 004.94



РОЛЬ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ФУНДАМЕНТОВ И ВЕРИФИКАЦИИ ПРИНЯТЫХ РЕШЕНИЙ. Часть 2

Поступила 7.04.2026
Принята к публикации 7.04.2026
Опубликована 27.07.2026

ДРУЗА М.
Кафедра геотехники, строительный факультет, Жилинский университет, г. Жилина, Словакия
drusa@fstav.uniza.sk

МИХАЛИК Я.
Кафедра геотехники, строительный факультет, Жилинский университет, г. Жилина, Словакия

МУЗИК Ю.
Кафедра геотехники, строительный факультет, Жилинский университет, г. Жилина, Словакия

ГАГО Ф.
Кафедра геотехники, строительный факультет, Жилинский университет, г. Жилина, Словакия

ШТЕФАНИК М.
Кафедра геотехники, строительный факультет, Жилинский университет, г. Жилина, Словакия

РЫБАК Я.
Строительный факультет, Вроцлавский политехнический университет, г. Вроцлав, Польша

АННОТАЦИЯ

Предлагаем вниманию читателей немного сокращенный и адаптированный перевод статьи словацких геотехников «Роль геотехнического мониторинга при проектировании фундаментов и верификации принятых решений. Часть 2» (Drusa et al., 2021). Она была опубликована в международном рецензируемом научном журнале Civil and Environmental Engineering («Гражданское строительство и инженерная защита окружающей среды») в 2021 году – через пять лет после первой части. Временной разрыв в 5 лет между этими двумя публикациями объясняется тем, что они имели разные цели и рассматривали поведение одного и того же объекта (торгово-развлекательного центра «Аупарк» в словацком городе Жилина) на разных этапах его жизненного цикла. В первой части авторы кратко описали инженерно-геологические условия исследуемой площадки, особенности проектируемого здания, выбранный тип фундаментов и сопоставили расчетные осадки с результатами геодезических измерений в период строительства. Во второй же части акцент сместился на анализ надежности принятых проектных решений путем сопоставления результатов компьютерного моделирования с фактическим поведением здания уже под эксплуатационной нагрузкой. Пауза была необходима для накопления данных долгосрочного мониторинга и применения новых расчетных технологий с целью верификации проекта. Полная ссылка на первоисточник (Drusa et al., 2021), который находится в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0, приведена в конце.

Основная цель статьи – продемонстрировать успешность реализованного проекта отдельных фундаментов мелкого заложения для здания торгового центра. Проверить эффективность проектных решений и оценить достоверность расчетов путем сопоставления с фактическими осадками здания помог долгосрочный геотехнический мониторинг.

У геотехников бывает не так много возможностей оценить свои проекты, особенно когда они реализуются успешно. Представленный авторами практический пример – один из тех случаев, который позволил выполнить оценки с точки зрения индекса надежности проекта, скорректированного с учетом реальных геодезических измерений. Индекс надежности выбранных фундаментов рассчитывался с помощью детерминированного подхода к вероятностному анализу. Для оценки тысяч комбинаций статистических данных был разработан программный инструмент на языке Python для пакетных расчетов вертикальных смещений фундаментов в программном комплексе PLAXIS. В дискуссионной части статьи также кратко описано текущее состояние теории надежности в европейских строительных стандартах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

геотехнический мониторинг; индекс надежности; пакетная обработка; трехмерная конечноэлементная модель; вероятность отказа.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Друза М., Михалик Я., Музик Ю., Гаго Ф., Штефаник М., Рыбак Я. Роль геотехнического мониторинга при проектировании фундаментов и верификации принятых решений. Часть 2 (пер. с англ.) // Геоинфо. 2026. Т. 8. № 1. С. 128–139. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-1-128–139.

THE ROLE OF GEOTECHNICAL MONITORING AT DESIGN OF FOUNDATION STRUCTURES AND THEIR VERIFICATION – Part 2

Received: 7.04.2026
Accepted for publication 7.04.2026
Published 27.07.2026

DRUSA M.
Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, University of Žilina, Žilina, Slovakia
drusa@fstav.uniza.sk

MIHALIK Ja.
Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, University of Žilina, Žilina, Slovakia

MUZIK Ju.
Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, University of Žilina, Žilina, Slovakia

GAGO F.
Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, University of Žilina, Žilina, Slovakia

STEFANIK M.
Department of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, University of Žilina, Žilina, Slovakia

RYBAK Ja.
Faculty of Civil Engineering, Wroclaw University of Science and Technology, Wroclaw, Poland

ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the paper by Slovak geotechnical engineers titled "The Role of Geotechnical Monitoring in Foundation Design and Verification of Adopted Decisions. Part 2" (Drusa et al., 2021). It was published in the international peer-reviewed journal "Civil and Environmental Engineering" in 2021 – five years after the first part of this work. The five-year gap between the two publications is explained by their different objectives and the fact that they examined the behavior of the same object (the Aupark shopping and entertainment center in Žilina, Slovakia) at different stages of its life cycle. In the first part, the authors briefly described the engineering-geological conditions of the site, the peculiarities of the designed building, the chosen type of its foundations and compared the calculated settlements with geodetic measurements carried out during construction. In the second part, the authors' attention was focused on analyzing the reliability of the adopted design decisions by comparing computer modeling results with the actual behavior of the building under operational loads. The pause between the two parts was necessary to accumulate long-term monitoring data and apply new computational technologies for project verification. The full reference to the original source (Drusa et al., 2021), which is available under the CC BY 4.0 license, is provided at the end.

The main aim of the article is to demonstrate that the design of spread foundations for the commercial center building was successful. The long-term geotechnical monitoring allowed to check the efficiency of the design and calculate its reliability taking into account the measured (real) settlements.

Geotechnical engineers do not have many opportunities to evaluate their designs, especially when everything is completed successfully. The presented case study is one of the examples that can be evaluated in terms of the reliability index of the design adjusted on the basis of real geodetic measurement results. The reliability index of the selected foundations was calculated using probabilistic methods based on the deterministic approach. In order to evaluate thousands of statistical data combinations, a programming tool in Python was developed for batch

calculations of foundation settlements using PLAXIS software. The discussion part of the article also considers the current state of the reliability theory in European structural standards.

KEYWORDS:

geotechnical monitoring; reliability index; batch processing; 3D FEM model; probability of failure

FOR CITATION:

Drusa M., Mihalik Ja., Muzik Ju., Gago F., Stefanik M., Rybak Ja. Rol' geotekhnicheskogo monitoringa pri proektirovanii fundamentov i verifikatsii prinyatykh reshenii. Chast' 2 (per. s angl.) [The role of geotechnical monitoring at design of foundation structures and their verification – part 2 (translation from English into Russian)] // Geoinfo. 2026. T. 8. № 1. S. 128–139. DOI:10.58339/2949-0677-2026-8-1-128–139 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В данной статье представлены результаты расчетов осадок здания торгового центра и их сопоставление с фактическими вертикальными смещениями, полученными при геодезических измерениях путем высокоточного нивелирования.

Крупное здание торгового центра в словацком городе Жилина было запроектировано на ряде отдельных прямоугольных фундаментов мелкого заложения. Это было возможно благодаря подходящим инженерно-геологическим условиям строительной площадки, где активная зона основания сложена террасовыми гравийными грунтами. Однако там была выявлена локальная геологическая аномалия: на северной стороне пятна застройки мощность гравийных отложений была меньше, а на уровне подошв фундаментов они преимущественно содержали глинистый заполнитель, представляя собой глинистый гравий класса GC (Gravelly Clay), то есть с содержанием глинистых частиц более 15%. (Отметим, что классы грунтов здесь и далее приведены в соответствии с международным стандартом ISO 14688. – *Ред.*).

Расчеты осадок аналитическими методами не подтверждают предположение проектировщиков о том, что оценка предельного состояния второй группы (по эксплуатационной пригодности, по деформациям) малочувствительна к входным параметрам. Эта ошибка ведет к недооценке значимости модуля деформации, что иногда случается, особенно если основание сложено несвязными грунтами. В результате обычно происходят неравномерные осадки, значительные деформации и повреждения конструкций фундаментов [1].

С учетом ответственности рассматриваемого проекта и локальной геологической аномалии, в процессе строительства проводился геотехнический мониторинг. На первом этапе, до бетонирования фундаментов, определялись деформационные характеристики грунтов их оснований путем статических испытаний штампами. В тех случаях, когда модуль деформации не соответствовал проектному критерию, выполнялась замена грунта основания с последующими повторными испытаниями [2, 3].

Торговый центр был возведен успешно, и геотехнический мониторинг подтвердил, что его осадки находятся в допустимых пределах. В подобных случаях дальнейшие исследования обычно не требуются. С нашей точки зрения, строительство рассматриваемого здания подтвердило правильность решения проектировщиков в пользу отдельных прямоугольных фундаментов вместо свайных в целях сокращения затрат. Но есть и вторая причина интереса к данному объекту – возможность использования этого положительного опыта и накопленных данных для анализа проектных решений с применением теории надежности.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПОДХОДЫ

Применение теории надежности при проектировании

Под надежностью понимается способность системы (сооружения и всех его элементов) отвечать всем предъявляемым требованиям в течение всего его жизненного цикла. Система выходит из строя (происходит ее отказ), если сооружение перестает удовлетворять эксплуатационным требованиям, то есть если повреждаются фундаменты или превышается несущая способность грунтового основания [4, 5]. Проект должен быть обоснован путем доказательства его достаточной надежности в части выполнения требуемых функций. При оценке результатов важной поддержкой бывает опыт геотехнического проектирования, особенно в условиях все более широкого применения численных расчетных моделей и более совершенных вычислительных инструментов [6, 7]. Риск допустить ошибку очень велик, поэтому для особо ответственных сооружений необходимо проводить параллельные или независимые расчеты.

Есть три подхода к проектированию фундаментов: детерминированный, полувероятностный и (полностью) вероятностный.

Индекс надежности отдельного фундамента мелкого заложения

При оценке безопасности сооружения с использованием вероятностного подхода очень большую роль играет индекс надежности β. Он задает целевой уровень надежности сооружения, в котором учитываются последствия выхода из строя (отказа) и стоимость мер по обеспечению безопасности. В рамках данного исследования индекс надежности определяется следующим уравнением [8]:

$$\beta = \frac{\mathrm{EV}\{g(X)\}}{\sqrt{\mathrm{Var}\{g(X)\}}}, \quad (1)$$

где $g(X)$ – функция предельного состояния (отрицательное значение этой функции означает достижение предельного состояния, или отказ, а индекс надежности связан с вероятностью этого отказа через функцию Лапласа. – *Ред.*); $\mathrm{EV}\{g(X)\}$ – математическое ожидание (Expected Value) случайной величины $g(X)$; $\mathrm{Var}\{g(X)\}$ – дисперсия (Variance), точнее оператор дисперсии, случайной величины $g(X)$.

Несущая способность (предельное сопротивление) грунта основания R и реакция основания (напряжение) E при воздействии нагрузки, действующей на фундамент, являются зависимыми случайными величинами. Они имеют собственные распределения вероятностей – $f_R(R)$ и $f_E(E)$ соответственно. Принимаются нормальные распределения этих вероятностей, которые затем объединяются, давая непрерывную функцию плотности вероятности. Тогда индекс надежности можно переписать в следующем виде [8]:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2 - 2\rho_{R,E}\sigma_R\sigma_E}}, \quad (2)$$

где σ_R, σ_E – среднеквадратические отклонения несущей способности и реакции/напряжения основания соответственно; μ_R, μ_E – математические ожидания случайных величин R и E соответственно; $\rho_{R,E}$ – коэффициент корреляции между случайными величинами R и E.

Математические ожидания рассчитываются по формулам:

$$\mu_R = \sum_j^{2^k} P_j R_j, \quad (3)$$

$$\mu_E = \sum_j^{2^k} P_j E_j, \quad (4)$$

где P_j=1/2^n – вероятность каждой отдельной реализации из общего числа возможных комбинаций, которое составляет 2^n (математический предел модели), если количество независимых факторов, каждый из которых может принимать 2 значения, равно n (то есть P_j – это весовой коэффициент, соответствующий каждой из комбинаций); k – фактическое количество комбинаций случайных величин (то есть число итераций, прогонов при моделировании. которое только в идеале может достигнуть 2^n, но обычно бывает меньше).

Среднеквадратические отклонения рассчитываются в соответствии с уравнениями для дисперсий:

$$\sigma_R^2 = \sum_j^{2^k} P_j (R_j^2 - \mu_R^2), \quad (5)$$

$$\sigma_E^2 = \sum_j^{2^k} P_j (E_j^2 - \mu_E^2), \quad (6)$$

Детерминированный и (полностью) вероятностный подходы

Детерминированный подход используется при оценке предельных состояний второй группы (по эксплуатационной пригодности, по деформациям), когда расчетные осадки s сравниваются с предельно допустимыми значениями осадок s_{lim} (должно выполняться условие $s \le s_{lim}$). Предельные величины s_{lim} определяются на основе многолетнего опыта проектирования фундаментов, а также в зависимости от типа здания или чувствительности расположенных выше конструкций к осадкам. В рассматриваемом случае в расчетах используются характеристические (нормативные – по результатам испытаний) значения геотехнических параметров грунтов основания и величины долговременных эксплуатационных нагрузок.

При (полностью) вероятностном подходе используется статистический анализ для учета распределения случайных величин (геотехнических параметров вместе с нагрузкой), что позволяет сформировать функцию предельного состояния, отделяющую зону безопасной эксплуатации от зоны отказа. Целью вероятностного анализа является определение индекса надежности β и вероятности отказа P_f (вероятности превышения предельного состояния).

ВАРИАЦИИ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Площадка строительства рассматриваемого здания начиная с некоторой глубины сложена палеогеновыми отложениями, представленными переслаивающимися песчаниками и аргиллитами с преобладанием последних, причем аргиллиты в верхней части являются полностью выветрелыми до состояния глин. Коренные палеогеновые породы перекрыты мощной толщей гравийных отложений верхней террасы реки Ваг с подтвержденной глубиной залегания подошвы 20–21 м. Эта терраса сложена гравийным грунтом с

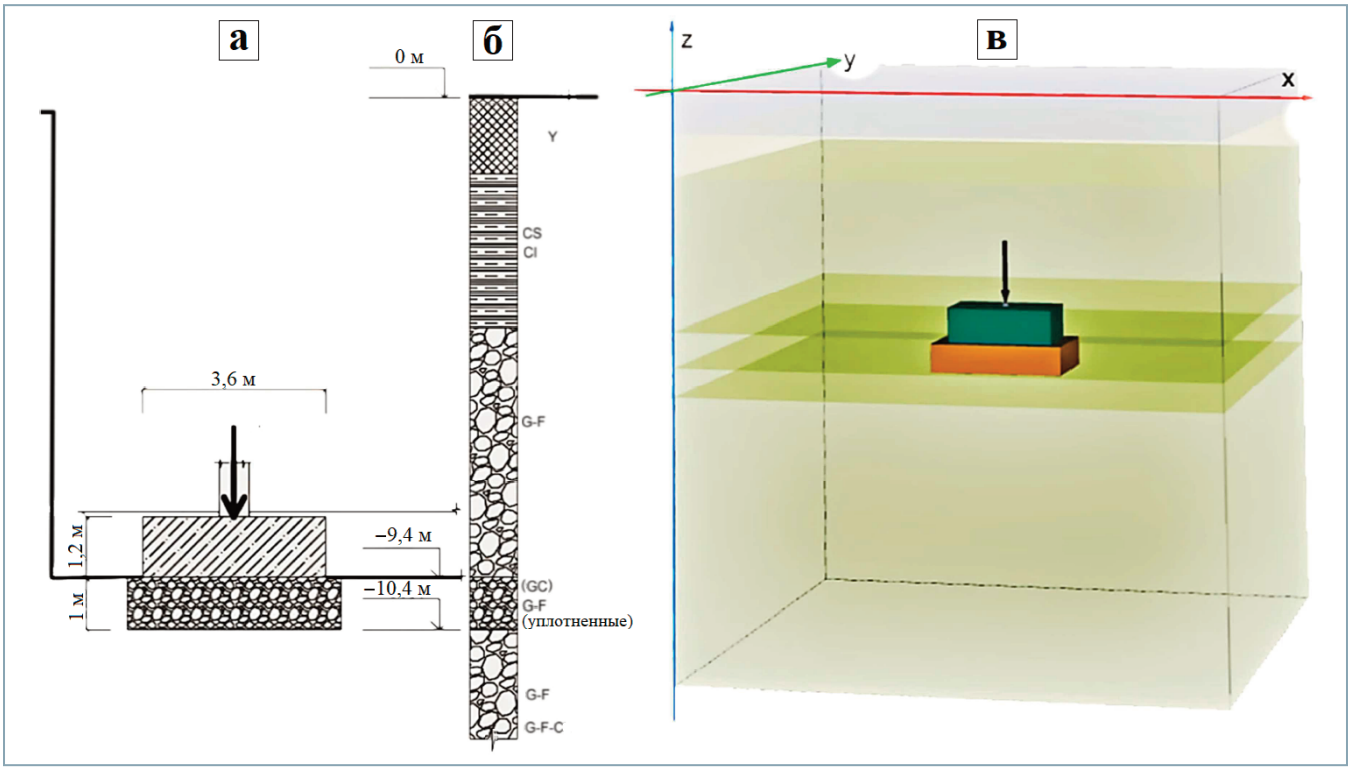


Рис. 1. Упрощенный вертикальный разрез отдельного прямоугольного фундамента E12 (а), соответствующая геологическая колонка (б) и трехмерная конечноэлементная параметрическая модель фундамента E12, подошва которого имеет размеры 3,6 м × 1,8 м (в)

Таблица 1. Входные параметры комплексной геомеханической (конститутивной) модели поведения грунта Мора – Кулона

Тип грунта	Удельный вес γ, кН/м³	Эталонный модуль деформации E_{ref}, МПа	Коэффиц. Пуассона ν	Угол внутр. трения φ, град.	Удельн. сцепление c, кПа	Коэф. снижения прочности на контакте грунта с фундаментом (коэф. интерфейса) R_{inter}
Антропогенные грунты	19,0	6,2	0,35	19,0	7,0	-
Песчанистая глина класса CS	18,0	5,5	0,35	25	1,0	-
Гравий с пылевато-глинистым заполнителем класса G-F	19,0	80,0	0,25	32,5	0,0	0,9
Замененный грунт (грунтовая подушка)	19,0	80,0	0,25	32,5	0,0	0,9

пылевато-глинистым заполнителем при содержании мелких фракций от 5 до 15% (класса G-F – Gravel-Fines), перекрытым четвертичными песчанистыми глинами с содержанием частиц песка более 15–25% (класса CS – Sandy Clay) или глинами от низко- до среднепластичных (классов CL, CI – Clays of Low plasticity, Clays of Intermediate plasticity соответственно) [2, 3].

На рисунке 1 показаны упрощенный вертикальный разрез выбранного отдельного прямоугольного фундамента E12, соответствующая геологическая колонка и трехмерная конечноэлементная параметрическая модель этого фундамента. Для определения параметров слоев грунтового основания была выбрана комплексная геомеханическая (конститутивная) модель Мора – Кулона, учитывающая имеющиеся исходные данные. Входные параметры этой модели представлены в таблице 1.

В программном комплексе PLAXIS были заданы этапы строительства, соответствующие фактическому ходу создания фундаментов рассматриваемого здания. Пять соответствующих отдельных фаз расчета обобщены в таблице 2.

Таблица 2. Реальные этапы строительства и соответствующие фазы расчета в программном комплексе PLAXIS

Этап строительства		Тип расчета
№	описание	
1	Начальный этап (природное напряженно-деформированное состояние грунтов)	«Пластический», в упругопластической постановке (Plastic)
2	Разработка котлована (выемка грунта)	
3	Замена грунта (устройство грунтовых подушек под отдельными фундаментами)	
4	Активация фундаментов и зон их контакта с грунтом	
5	Приложение (активация) расчетной нагрузки	

Таблица 3. Входные параметры для моделирования методом Монте-Карло

Грунт	Нормативное значение эталонного модуля деформации E_{ref}, МПа	Границы интервала варьирования значений E_{ref}		Распределение
		нижняя $E_{ref,min}$, МПа	верхняя $E_{ref,max}$, МПа	
1. Гравий с пылевато-глинистым заполнителем класса G-F	80,0	50,0	150,0	нормальное
2. Замененный грунт (грунтовая подушка)	80,0	60,0	110,0	нормальное
Нагрузка	**Нормативная нагрузка q, кН**	**Границы интервала варьирования нагрузки**		**Распределение**
		нижняя q_{min}, кН	верхняя q_{max}, кН	
Эксплуатационная нагрузка на фундамент для расчета по второй группе предельных состояний (по деформациям/осадкам)	4738,56	3553,92	5923,00	нормальное

Анализ надежности проводился путем варьирования ключевых параметров для расчета осадки выбранного фундамента (Е12).

При расчете осадки отдельного прямоугольного фундамента мелкого заложения наиболее значимыми являются показатели деформационных свойств грунтов основания и величина вертикальной нагрузки на эту конструкцию. В зависимости от модели расчета осадки (сжатия слоев грунта в пределах активной зоны, то есть сжимаемой толщи) в геотехнике используются различные деформационные характеристики [14–17]:

- одометрический модуль деформации E_{oed};
- модуль деформации E_{def};
- коэффициент относительной сжимаемости $m_v=1/E_{oed}$;
- индекс компрессии C_c;
- индекс рекомпрессии C_r;
- коэффициент вторичной консолидации (коэффициент ползучести) C_α;
- эталонный модуль деформации E_{ref}.

В рассматриваемом случае характеристические значения деформационных параметров грунтов (гравийных отложений) были определены по результатам динамического зондирования и непосредственно измерены на уровне подошвы фундамента с помощью статических испытаний штампом [2].

На конечную осадку влияет множество факторов – например, эффективное начальное напряжение, напряжение предконсолидации (напряжение предуплотнения), жесткость фундамента по сравнению с жесткостью грунта основания, уровень грунтовых вод. Также крайне важен фактор времени:

- для оценки упругого поднятия (отпора, разуплотнения) грунтов основания при разгрузке в результате разработки котлована;
- для учета скорости изменения деформаций грунта при изменении напряженного состояния.

Хорошо известно, что скелет грунта реагирует на новые напряжения очень медленно в случае пластичных мелкозернистых малопроницаемых отложений (илистых, пылеватых грунтов, глин) и быстро в случае крупнозернистых или крупнообломочных проницаемых грунтов (песков или гравия). Этот процесс также зависит от гидрогеологических условий и свойств грунтов [17, 18]. В рассматриваемом случае замены грунта основания перед бетонированием фундамента при отсутствии влияния грунтовых вод значения конечных осадок установились (стабилизировались) в течение нескольких дней.

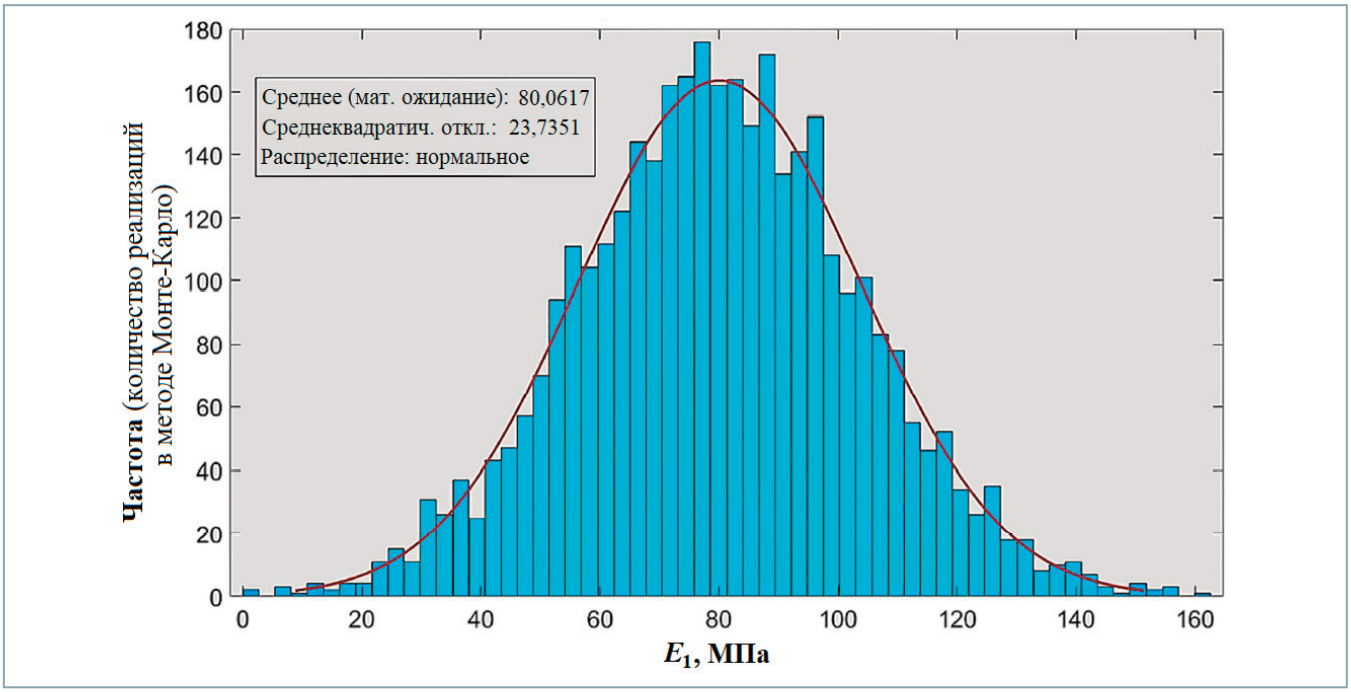


Рис. 2. Гистограмма и соответствующий закон распределения эталонного модуля деформации гравийного грунта с пылевато-глинистым заполнителем (E_1)

В рамках данного исследования был бы проще аналитический расчет, но авторы использовали точную трехмерную конечноэлементную модель в режиме пакетных вычислений, когда входные параметры генерировались случайным образом в заданном интервале при моделировании методом Монте-Карло (см. таблицу 3).

В качестве случайных величин для расчета были приняты: эталонный модуль деформации гравийного грунта с пылевато-глинистым заполнителем E_1, эталонный модуль деформации замененного грунта (грунтовой подушки) E_2 и комбинированная эксплуатационная нагрузка q.

Для параметрического исследования в конечноэлементной программе PLAXIS использовалось программное расширение (дополнительный подключаемый модуль, оболочка) интерфейса на базе языка Python. Варьирование показателей свойств материалов автоматизировалось с помощью такого программного интерфейса-посредника (оболочки) для обращения к внутренним командам PLAXIS, как Python API, который может применяться в качестве альтернативы интерактивному взаимодействию (с помощью мыши и меню) с программным комплексом.

Основное приложение PLAXIS работает или в оконном (интерфейсном, визуальном), или в скрытом (фоновом, безоконном) режиме с помощью довольно простого веб-сервера для доступа к внутренним командам программы. Любая среда разработки на основе языка Python может использовать библиотеку-оболочку Python-PLAXIS (библиотеку, связывающую применяемый скрипт и расчетное ядро PLAXIS) для подключения к этому веб-серверу (или непосредственно к приложению PLAXIS) для выполнения практически любой внутренней команды, для управления загруженным проектом или для создания нового проекта. Данная библиотека позволяет расширять команды PLAXIS с помощью программных конструкций (таких как циклы и условные операторы), а также обеспечивает доступ к другим источникам данных (например, внешним файлам или базам данных) и к специализированным структурам данных.

Параметрическое исследование проводилось путем циклического запуска подготовленного проекта с варьированием значений модулей деформации слоев грунта при сохранении величины максимальной осадки под фундаментом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРОЯТНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ ИНДЕКСА НАДЕЖНОСТИ

На рисунке 2 представлено нормальное распределение 10 тысяч сгенерированных значений эталонного модуля деформации гравийного грунта с пылевато-глинистым заполнителем (E_1), а на рисунке 3 – аналогичное распределение эталонного модуля деформации грунтовой подушки под подошвой фундамента (E_2).

На рисунке 4 показано нормальное распределение случайным образом сгенерированных величин нагрузки q для оценки осадки. Эти величины находятся в интервале между q_{min} и q_{max} и закономерно распределены вокруг среднего значения, соответствующего нормативной эксплуатационной нагрузке.

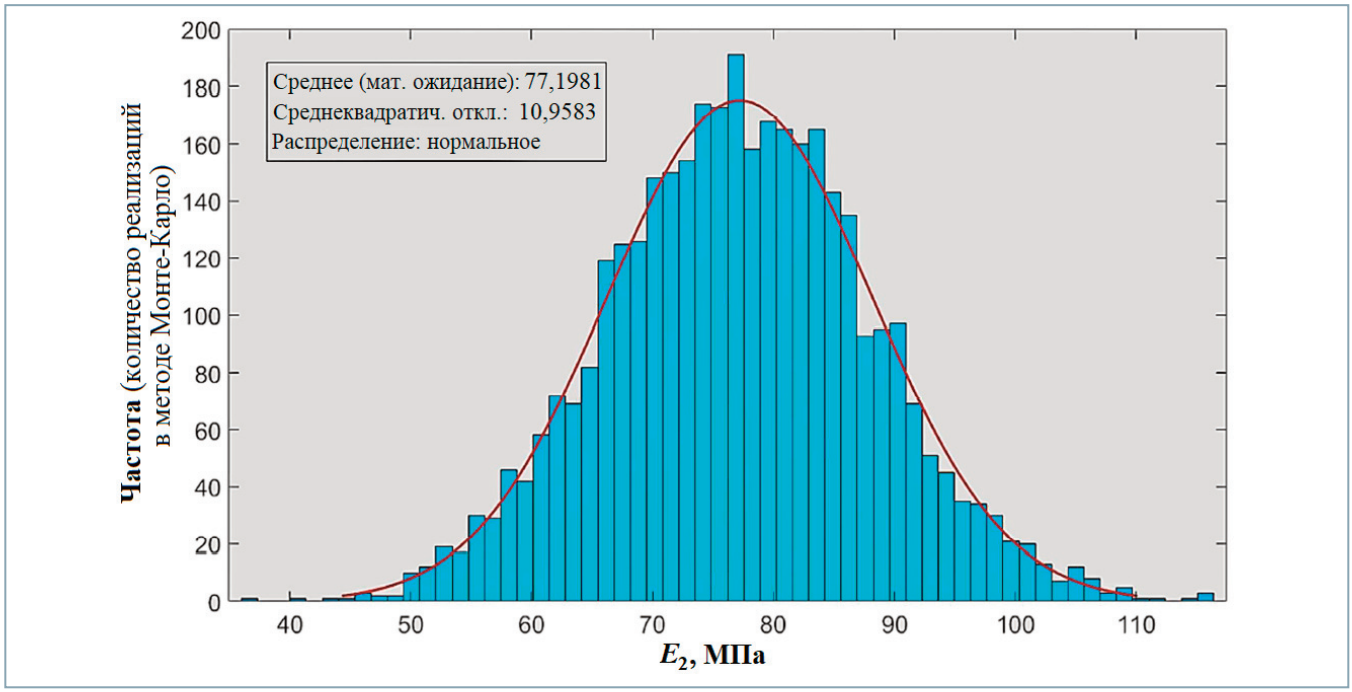


Рис. 3. Гистограмма и соответствующий закон распределения эталонного модуля деформации грунтовой подушки под подошвой фундамента (E_2)

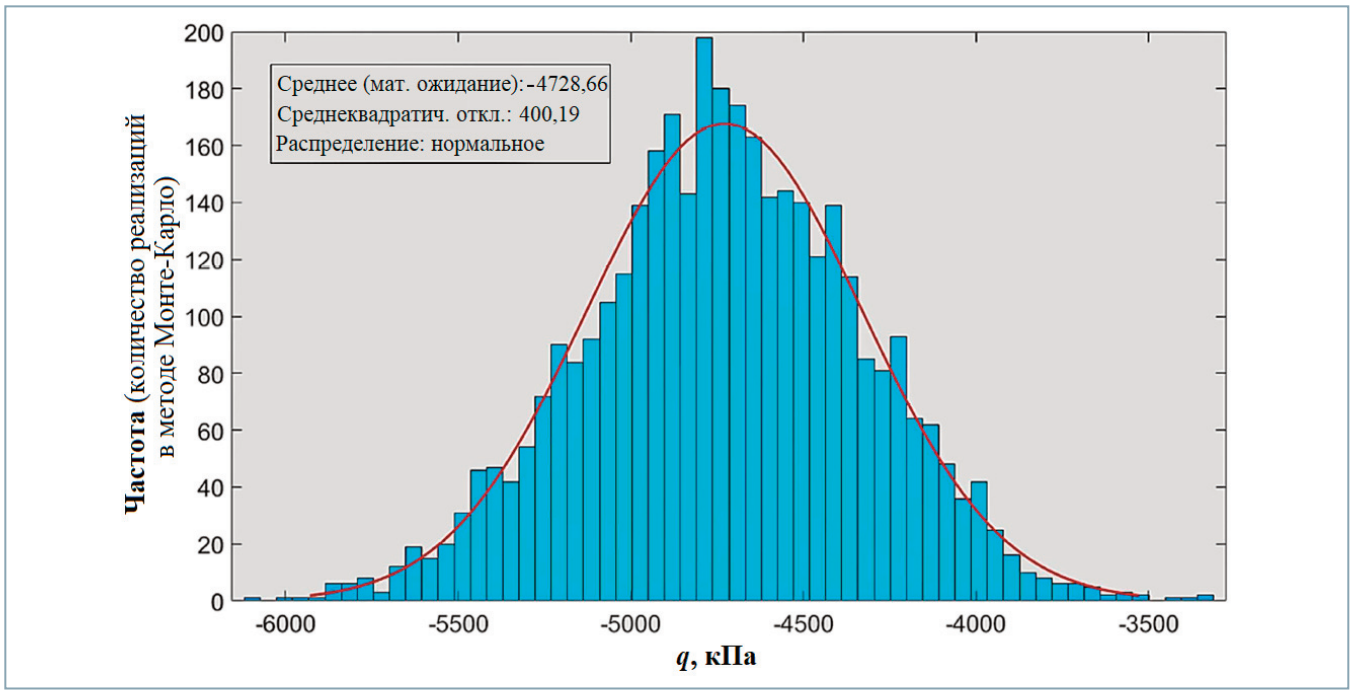


Рис. 4. Гистограмма и соответствующий закон распределения эксплуатационной нагрузки на фундамент (q)

Определение диапазонов изменений переменных величин (между минимальным и максимальным значениями) влияет на результаты расчета индекса надежности. Оно упрощается при увеличении объема испытаний грунтов. В случае малого количества полевых или лабораторных испытаний требуется заключение квалифицированного эксперта [18].

Логнормальное распределение расчетной осадки по результатам 10 тысяч итераций, выполненных в режиме пакетных вычислений в трехмерном конечноэлементном программном комплексе PLAXIS, представлено на рисунке 5 (среднее значение осадки составило 27 мм). В таблице 4 приведены результаты анализа чувствительности расчетной параметрической модели к изменениям величин параметров (наиболее значимым фактором оказалась нагрузка), а также индекс надежности и вероятность отказа отдельного фундамента мелкого заложения, выбранного для данной работы (E12).

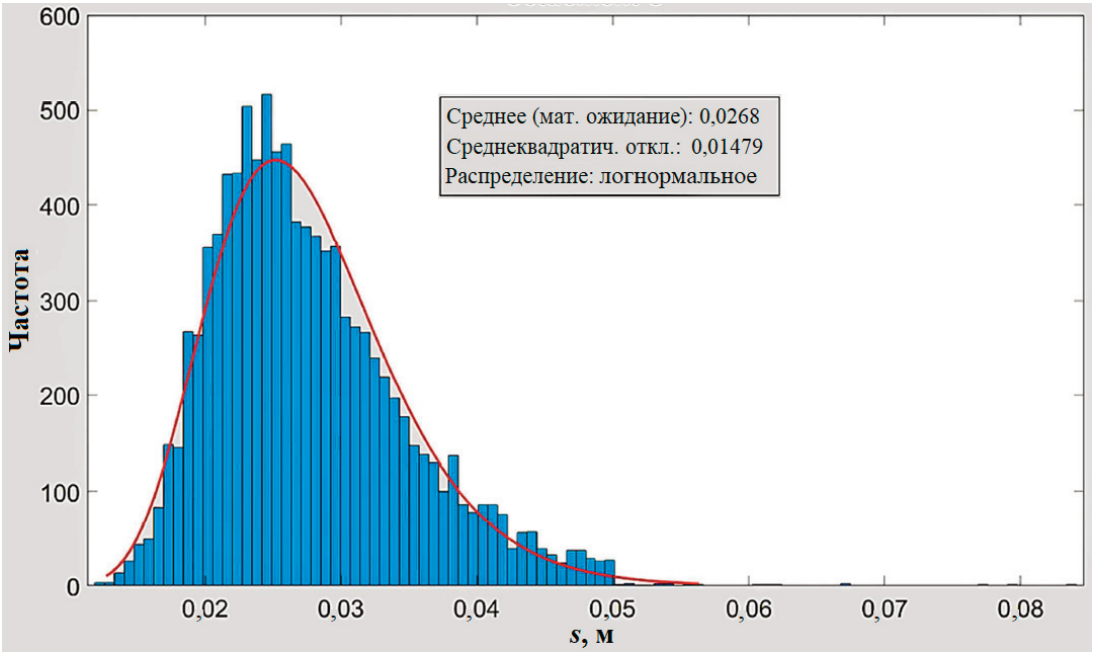


Рис. 5. Гистограмма и логнормальное распределение расчетной осадки (*s*) по результатам 10 тысяч итераций

Таблица 4. Чувствительность расчетной параметрической модели к изменениям величин параметров, индекс надежности и вероятность отказа отдельного фундамента мелкого заложения E12

Переменная (параметр)	Коэффициент влияния на модель
Эталонный модуль деформации гравийного грунта с пылевато-глинистым заполнителем (E_1)	23,45
Эталонный модуль деформации грунтовой подушки под подошвой фундамента (E_2)	9,87
Эксплуатационная нагрузка на фундамент (q)	**397,45**
Индекс надежности (β)	2,9290
Вероятность отказа (P_f)	0,0017

Согласно данным таблицы 4 ожидаемая эксплуатационная надежность близка к уровню «выше среднего» ($P_f = 1{,}7\times10^{-3}$; β=2,929). Это говорит о том, что запроектированный отдельный фундамент мелкого заложения обеспечивает надлежащую безопасность. Требуемое по Еврокоду [19] значение индекса надежности для оценки предельных состояний по эксплуатационной пригодности (по осадке) для класса надежности RC2 (Reliability Class 2) должно быть выше 1,5 (RC2 – это средний, или стандартный, класс надежности, к которому относится подавляющее большинство объектов, таких как жилые и офисные здания, общественные здания средней вместимости, промышленные цеха и склады. – *Ред.*). Таким образом, полученный результат (β=2,929>1,5) указывает на то, что выбранное проектное решение полностью соответствует необходимому уровню надежности.

Это означает, что проектировщики приняли очень удачное решение по типу и конструкциям фундаментов. Они предусмотрели замену грунта основания под подошвами фундаментов в тех местах, где статические испытания штампом показали низкие модули деформации, то есть где гравийные отложения локально содержали больше слабого глинистого заполнителя от мягкопластичной до текучепластичной консистенции. Замена этих отложений выполнялась путем послойного уплотнения гравийного грунта, взятого из другой части котлована, с минимальным количеством пылеватых и глинистых частиц. Общая толщина каждой грунтовой подушки составила 1 м. Отметим, что в выполненном расчете надежности эти локальные аномалии с пониженными модулями деформации все-таки были учтены, поскольку на обширной строительной площадке не было возможности выполнить испытания в каждом месте заложения отдельного фундамента.

Индекс надежности β связан с вероятностью отказа P_f и может быть выражен с помощью различных формул в зависимости от применяемого статистического метода и рассматриваемого расчетного периода (обычно близкого к установ-

Таблица 5. Диапазон значений индекса геотехнической надежности β [19, 20]

Индекс надежности β	Вероятность отказа P_f	Ожидаемый уровень эксплуатационной надежности
1,0	0,16	опасный
1,5	0,07	неудовлетворительный
2,0	0,023	низкий (плохой)
2,5	0,006	ниже среднего
3,0	0,001	выше среднего
4,0	0,00003	хороший
5,0	0,0000003	высокий

ленному сроку службы) [20–22]. При использовании кумулятивной функции гауссовского (нормального) распределения вероятностей индекс надежности определяется уравнением (2). Его табличные значения приведены в таблице 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье была продемонстрирована оценка уровня надежности проектного решения на примере расчета индекса надежности отдельного фундамента мелкого заложения. Сама степень безопасности зависит от достоверности входных параметров, что в случае расчета осадок означает максимально точное определение деформационных характеристик грунтов основания и оценку наиболее вероятных нагрузок на фундаменты. При благоприятных геологических условиях опасность отказа невелика. Но при наличии локальных геологических аномалий возрастает риск возникновения неравномерных осадок оснований. Практика показывает, что многие проблемы в гражданском строительстве обусловлены низким качеством выполнения работ, но опытные подрядчики способны вовремя спрогнозировать возможные проблемы и оперативно внести изменения в проект.

В данной публикации авторы продемонстрировали инновационный подход, при котором использование 3D расчетов на основе метода конечных элементов может быть облегчено благодаря реализации в программном комплексе пакетных вычислений.

Геотехники с нетерпением ожидают предстоящих изменений и улучшений в Еврокоде 7 и его отдельных частях, которые должны включать больше положений по требованиям относительно безопасности и эксплуатационной пригодности, чтобы этот стандарт не ограничивался лишь описанием принципов проектирования и проверки предельных состояний (на момент написания данной статьи. – *Ред.*). Следует подчеркнуть, что индексы надежности могут быть оценены только с использованием вероятностных инструментов [21–24].

При оценке ответственных сооружений следует уделять внимание определению индекса надежности с помощью подходящего метода статистической оценки вероятности отказа. Стоит отметить, что данный принцип проектирования уже внедрен в США под названием «проектные расчеты на основе коэффициентов нагрузки и несущей способности основания» (Load and Resistance Factor Design, LRFD). Этот подход позволяет проводить более точную оценку надежности, чем принципы, в настоящее время (на момент написания данной статьи. – *Ред.*) прописанные в Еврокоде 7 [20, 25, 26].

Современные разработки в геотехнике, среди прочего, как раз и касаются методов, основанных на теории надежности – как для описанных в данной работе отдельных фундаментов мелкого заложения, так и для фундаментов на усиленных грунтовых основаниях [27], фундаментов глубокого заложения [28–31], а также для склонов, откосов [32] и подпорных сооружений [33–35].

Данная работа выполнена при поддержке Агентства по научным грантам Министерства образования Словацкой Республики и Словацкой академии наук в рамках гранта VEGA 1/0484/20.

Источник для перевода (Source for the translation)

Drusa M., Mihalik Ja., Muzik Ju., Gago F., Stefanik M., Rybak Ja. The role of geotechnical monitoring at design of foundation structures and their verification – part 2 // Civil and Environmental Engineering. 2021. Vol. 17. № 2. P. 681–689. DOI:10.2478/cee-2021-0067.

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

1. Geotechnique.info website. Available at: http://www.geotechnique.info/SI/SI%20Book%20Chapter%209.pdf (accessed: 20.07.2021).
2. Drusa M., Vlček J., Orininová L. The role of geotechnical monitoring at design of foundation structures and their verification – part 1 // Civil and Environmental Engineering. 2016. Vol. 12. № 1. P. 21–26. DOI:10.1515/cee-2016-0003.
3. Pilarčík R. Monitoring of settlement of foundations of Aupark Žilina and their verification with design: diploma thesis. University of Žilina, 2011 (in Slovak).
4. Drusa M., Vlček J., Gago F., Bulko R. Modern Methods of Designing Geotechnical Structures. University of Žilina, 2019 (in Slovak).
5. Lancellotta R. Geotechnical Engineering. Taylor &Francis, 2007.
6. Baecher G.B., Christian J.T. Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley & Sons, 2003.
7. Engineering and design: introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering: engineer technical letter 1110-2-547. Washington, D.C., USA: U.S. Army Corps of Engineers, Dept. of the Army, 1997.
8. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // Bulletin of the Seismological Society of America. 1968. Vol. 58. № 5. P. 1583–1606.
9. EN-ISO 2394: 2015. General Principles on Reliability for Structures.
10. Duncan J.M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2000. Vol. 126. № 4.
11. Phoon K., Kullhawy F. Characterisation of geotechnical variability // Canadian Geotechnical Journal. 1999. Vol. 36. № 4. P. 612–624.
12. Puła W, Chwała M. Random bearing capacity evaluation of shallow foundations for asymmetrical failure mechanisms with spatial averaging and inclusion of soil self-weight // Computers and Geotechnics. 2018. Vol. 101. P. 176–195. DOI:10.1016/j.compgeo.2018.05.002.
13. Borowiec A. Use of probabilistic analysis in design of shallow and deep foundations // Mater. Sci. Eng. (Book Series: IOP Conf. Ser.). 2019. Vol. 471. Article 042027.
14. Decky M., Remisová E., Mecar M., et al. In situ determination of load bearing capacity of soils on the airfields // Proceedings of the World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (Book Series: Procedia Earth and Planetary Science), 2015. Vol. 15. P. 11–18. DOI:10.1016/j.proeps.2015.08.004.
15. Vlcek J., Ďureková D., Zgútová K. Evaluation of dynamic methods for earthwork assessment // Civil and Environmental Engineering. 2015. Vol. 11. № 1. P. 38–44. DOI:10.1515/cee-2015-0005.
16. Zgutova K., Decky M. Sramek J., et al. Using of alternative methods at earthworks quality control // Proceedings of the World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium, 2015. P. 263–270. DOI:10.1016/j.proeps.2015.08.064.
17. Craig R.F. Soil Mechanics (7th edition). Chapman & Hall, 2004.
18. Rahelison L.H. Analysis of in situ test derived soil properties with traditional and finite element methods: dissertation thesis. University of Florida, 2002.
19. STN EN 1990: 2009 (Eurocode 0). Basis of structural design.
20. Pula W., Zaskorski L. On some methods in safety evaluation in geotechnics // Studia Geotechnica et Mechanica. 2015. Vol. 37. № 2. DOI:10.1515/sgem-2015-0016.
21. Kia S., Shahhosseini V., Sebt M.H., Meilich O.: Reliability-based life cycle assessment of the concrete slab in bridges // Civil and Environmental Engineering. 2020. Vol. 16. № 1. P. 170–183. DOI:10.2478/cee-2020-0017.
22. Holicky M., Diamantidis D., Sykora M. Determination of target safety for structures // Proceedings of the 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP12), Vancouver, Canada, July 12–15, 2015. 8 p. DOI:10.14288/1.0076258.
23. Major M., Major I., Kuchárová D., Kuliński K. On the eccentrically loaded socket footings with cut-off pyramid shaped socket // Civil and Environmental Engineering. 2019. Vol. 15. № 1. P. 58–69. DOI:10.2478/cee-2019-0009.
24. Li D.-Q. et al. Reliability analysis of strip footing considering spatially variable undrained shear strength that linearly increases with depth // Soil and Foundations. 2015. Vol. 55. № 4. P. 866–880.
25. Fenton G., Griffiths D.V. Probabilistic foundation settlement of specially random soil // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2002. Vol. 128. № 5. P. 381–390.
26. Dodigović F., Ivandić K., Kovačević M.S., Soldo B. Error evaluation and suitability assessment of common reliability methods in the case of shallow foundations // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. № 2. Article 795. DOI:10.3390/app11020795.
27. Kozubal J., Steshenko D., Galay B. The improvement of loess substrates with a new type of soil column with a reliability assessment // Road Materials and Pavement Design. 2014. Vol. 15. № 4. P. 856–871. DOI:10.1080/14680629.2014.939695.
28. Reddy S.C. Ultimate and serviceability limit state reliability-based axial capacity of deep foundations: PhD dissertation. Oregon State University, 2014.

29. Kozubal J., Puła W., Wyjadłowski M., Bauer J. Influence of varying soil properties on evaluation of pile reliability under lateral loads // Journal of Civil Engineering and Management. 2013. Vol. 19. № 2. P. 272–284. DOI:10.3846/13923730.2012.756426.

30. Wyjadłowski M., Bagińska I., Reiner J. Probabilistic assessment of pile capacity based on CPTu probing including random pile foundation depth // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. Article 01058. DOI:10.1051/matecconf/201819601058.

31. Rybak J. Non-destructive determining of foundation pile length variability for reliability analysis // Journal of Physics (Conference Series). 2020. Vol. 1425. № 1. Article 012205. DOI:10.1088/1742-6596/1425/1/012205.

32. Vessia G., Kozubal J., Puła W. High dimensional model representation for reliability analyses of complex rock-soil slope stability // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 17. № 4. P. 954–963. DOI:10.1016/j.acme.2017.04.005.

33. Gorska K., Muszynski Z., Rybak J. Displacement monitoring and sensitivity analysis in the observational method // Studia Geotechnica et Mechanica. 2013. Vol. 35. № 3. P. 25–43. DOI:10.2478/sgem-2013-0028.

34. Wyjadłowski M., Puła W., Bauer J. Reliability of diaphragm wall in serviceability limit states // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2015. Vol. 15. № 4. P. 1129–1137. DOI:10.1016/j.acme.2015.02.001.

35. Kawa M., Bagińska I., Wyjadłowski M. Reliability analysis of sheet pile wall in spatially variable soil including CPTu test results // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2019. Vol. 19. № 2. P. 598–613. DOI:10.1016/j.acme.2018.10.007.

Независимый электронный журнал

ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
выходит в формате *PDF.
10 выпусков в год.



WWW.GEOINFO.RU