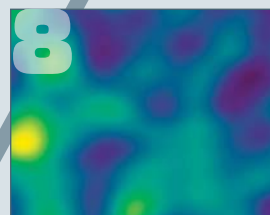


Независимый электронный журнал Геоинфо

О программном средстве для практического применения геостатистики в геологии и геотехнике. Стр. 8

Влияние разрешения цифровой модели рельефа на оценку оползневой опасности (на примере района Шапа провинции Лаокай, Вьетнам) Стр. 38

Обеспечение безопасности объекта под скалистым уступом от камнепадов: решения «Маккаферри» во Франции. Стр. 46



GEOINFO

ISSN 2949-0677 (ONLINE)

WWW.GEOINFO.RU

ДЕКАБРЬ • DECEMBER • TOM IV • 12-2022

ГЕНЕРАЛЬНЫЕ СПОНСОРЫ ПРОЕКТА



ООО «ПЕТРОМОДЕЛИНГ»



Австрийская компания
«TRUMER SCHUTZBAUTEN GMBH»
ООО «РТ ТРУМЕР»



Институт
экологического
проектирования
и изысканий

АО «ИНСТИТУТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗЫСКАНИЙ»



Maccaferri / ГАБИОНЫ МАККАФЕРРИ СНГ



ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

ООО НПП «ГЕОТЕК»



Компания
Mountain Risk Consultancy

СПОНСОРЫ ПРОЕКТА



MalinSoft



Modeling, Integrated Design
& Analysis Software

ООО «МИДАС» / MIDAS IT



Геотехническая лаборатория
АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ»



НИЖЕГОРОДСТОЙИЗЫСКАНИЯ

ООО «НИЖЕГОРОДСТОЙИЗЫСКАНИЯ»



ООО «ГЕОИНЖЕРВИС» / FUGRO

EngGeo

Обработка и хранение результатов
инженерно-геологических
изысканий

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «ENGCEO»



ПрогрессГео
ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ООО «ПРОГРЕССГЕО»



НПО «ТЕРРАЗОНД»



ООО «КОМПАНИЯ «КРЕДО-ДИАЛОГ»

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ



Программный комплекс RosScience
ADVANCED SURVEY
TECHNOLOGIES

ООО «СОВРЕМЕННЫЕ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ» (ADVANCED SURVEY
TECHNOLOGIES) – ОФИЦИАЛЬНЫЙ
ПРЕДСТАВИТЕЛЬ ROSSCIENCE В РОССИИ



ООО «КБ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ НЕЗАВИСИМОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЖУРНАЛА «ГЕОИНФО»

Ананко Виктор Николаевич

Главный редактор журнала «ГеоИнфо»

Баборыкин Максим Юрьевич

Главный аналитик Центра геоинформационных технологий Университета Иннополис, главный геолог ООО «Аэрогеоматика», к.г.-м.н., имеет степень MBA

Бершов Алексей Викторович

Генеральный директор ГК «Петромоделинг», ассистент Кафедры Инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Гиззатуллин Рушан Рафаэлевич

Инженер-геотехник ООО «НИП-Информатика»

Ермолов Александр Александрович

Научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории геоэкологии Севера Кафедры геоморфологии и палеогеографии Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.г.н.

Жидков Роман Юрьевич

Начальник группы разработки программного обеспечения по геологии ГБУ «Мосгоргеотрест», к.г.-м.н.

Зайцев Андрей Александрович

Доцент кафедры "Путь и путевое хозяйство" РУТ (МИИТ), к.т.н.

Исаев Владислав Сергеевич

Старший научный сотрудник Кафедры геоэкологии Геологического факультета МГУ, к.г.-м.н.

Королев Владимир Александрович

Профессор Кафедры инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., член-корреспондент Российской академии естественных наук (РАЕН) по секции наук о Земле

Латыпов Айрат Исламгалиевич

Руководитель Лаборатории по исследованию грунтов в строительстве, доцент по специальности «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение», член национального реестра специалистов в области строительства, эксперт Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан, к.т.н.

Маштаков Александр Сергеевич

Главный специалист ООО Арктический научный центр (Роснефть), руководитель Волгоградского отделения Общественной организации Российское геологическое общество, эксперт Российского газового общества, к.г.-м.н.

Мирный Анатолий Юрьевич

Старший научный сотрудник Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, руководитель проекта «Независимая геотехника», к.т.н.

Миронюк Сергей Григорьевич

Доцент/старший научный сотрудник Кафедры инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, научный сотрудник ООО «Центр морских исследований МГУ им. М.В. Ломоносова», к.г.-м.н.

Пиоро Екатерина Владимировна

Генеральный директор ООО «Петромоделинг Лаб», к.г.-м.н.

Самарин Евгений Николаевич

Профессор Кафедры инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н.

Судакова Мария Сергеевна

Старший преподаватель Кафедры сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, Научный сотрудник института Кriosферы Земли ТюмНЦ СО РАН, к.ф.-м.н.

Слободян Владимир Юрьевич

Генеральный директор АО «Институт экологического проектирования и изысканий» (АО «ИЭПИ»)

Труфанов Александр Николаевич

Заведующий лабораторией «Методов исследования грунтов» НИИОСП им. Н.М. Герсевича, АО «НИЦ Строительство», к.т.н., Почетный строитель России

Федоренко Евгений Владимирович

Научный консультант ООО «НИП-Информатика», к.г.-м.н.

Фоменко Игорь Константинович

Профессор Кафедры инженерной геологии МГРИ, д.г.-м.н.

Фролова Юлия Владимировна

Доцент Кафедры инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д.г.-м.н.

Шац Марк Михайлович

Ведущий научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (ИМЗ), к.г.н.



ГЕОИНФО

Электронное издание

Издается с марта 2016 года.

Периодичность: 1 раз в месяц.

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:

Ананко Виктор Николаевич

Издательство:

ГеоИнфо, ИП Ананко В.Н.

Адрес:

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

Редакция:

Ананко Виктор Николаевич
Главный редактор

Васин Михаил Васильевич
Обозреватель

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: 06.02.2023 г.

© Ананко Виктор Николаевич, 2022

© ГеоИнфо, 2022

Фото на обложке: www.Pixabay.com

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ О программном средстве для практического применения геостатистики в геологии и геотехнике

Геннадий Болдырев

8

ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА ТЕРРИТОРИИ

Влияние разрешения цифровой модели рельефа на оценку оползневой опасности (на примере района Шапа провинции Лаокай, Вьетнам

Игорь Фоменко, Зыонг Ван Бинь, Нгуен Чунг Киен, Ольга Сироткина, Денис Горобцов

38

Обеспечение безопасности объекта от камнепадов под скалистыми уступом. Решения Маккаферри во Франции

Татьяна Горбачева

46

МЕХАНИКА ГРУНТОВ И ГЕОТЕХНИКА

Воздействие вибраций, вызванных работой метро, на Колокольную башню в Сиане (Китай)

Лай Цзиньсин, Ню Фаньюань, Ван Кэ, Чэнь Цзянь Сюнь, Цю Цзюньлин, Фань Хаобо, Ху Чжинань

56

О верификации моделей PM4Sand и PM4Silt, включенных в программный комплекс Rocscience RS2

Михаил Васин

74

Графо-аналитическая обработка стандартного испытания грунта основания сваей-бареттой

Игорь Гольдфельд, Петр Ястребов, Екатерина Дубровская

84

ЮБИЛЕИ

Усупаев Шейшеналы Эшманбетович отмечает 70-летие 1 января 2023 года

96

ПРИЛОЖЕНИЕ «ДИСКУССИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ»

КРЕДО 2022 – каким был этот год, и что ждет нас в следующем

Иван Кукареко

100

Новые возможности EngGeo. Интервью с разработчиками и пользователями

Виктор Ананко

104

Список научных трудов и изобретений за 1961–2022 гг. Гольдфельда Игоря Зусьевича

108

ПРИЛОЖЕНИЕ. СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

Graph-analytical processing of a standard test of foundation soil with a barrette pile

Igor' Z. Gol'dfel'd, Petr I. Yastrebov, Ekaterina S. Dubrovskaya

120

Перечень научных специальностей:

- | | |
|---------|---|
| 020102. | Основания и фундаменты, подземные сооружения |
| 020806. | Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика |
| 010601. | Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика |
| 010606. | Гидрогеология |
| 010607. | Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение |
| 010608. | Гляциология и криология Земли |
| 010609. | Геофизика |
| 010621. | Геоэкология |
| 020110. | Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства |
| 010612. | Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов |
| 010616. | Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия |
| 020106. | Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология |
| 010617. | Океанология |
| 010619. | Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия |
| 010620. | Геоинформатика, картография |
| 010622. | Геодезия |
| 020107. | Технология и организация строительства |
| 020109. | Строительная механика |

ENGINEERING GEOLOGY. ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEY

On a software tool for the practical application of Geostatistics in Geology and Geotechnics

Gennadiy G. Boldyrev

ENGINEERING PROTECTION OF TERRITORIES

Influence of DEM resolution on landslide hazard assessment (a case study in Sapa district, Laocai province, Vietnam)

Igor K. Fomenko, Van B. Duong, Trung K. Nguyen, Olga N. Sirotkina, Denis N. Gorobtsov

Ensuring the safety of an object situated under a rocky ledge against rockfalls: Maccaferri solutions in France

Tat'yana M. Gorbacheva

SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICS

The effects of metro-induced vibrations on the Bell Tower in Xi'an (China)

Lai J., Niu F., Wang K., Chen J., Qiu J., Fan H., Hu Z

On verifying the PM4Sand and PM4Silt models included in the Rocscience RS2 software package

Mikhail V. Vasin

Graph-analytical processing of a standard test of foundation soil with a barrette pile

Igor' Z. Gol'dfel'd, Petr I. Yastrebov, Ekaterina S. Dubrovskaya

ANNIVERSARIES

Sheishenaly Eshmanbetovich Usupaev celebrates his 70th birthday

Vladimir A. Korolev

APPENDIX. DISCUSSION MATERIALS

CREDO-2022: what was this year like and what awaits us in the future

Ivan S. Kukareko

New capabilities of the EngGeo software package: interviews with the developers and users

Viktor N. Ananko

Goldfeld Igor Zusievich. List of scientific papers and inventions for 1961-2022

APPENDIX. ARTICLES IN ENGLISH

Graph-analytical processing of a standard test of foundation soil with a barrette pile

Igor' Z. Gol'dfel'd, Petr I. Yastrebov, Ekaterina S. Dubrovskaya



GEOINFO

8 Electronic publication

Published since 2016

Publication frequency:
once a month

38 ISSN: 2949-0677

DOI prefix: 10.58339

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

96 **Founder:**
Ananko Viktor Nikolaevich

100 **Publisher:**
GeoInfo, individual entrepreneur
Ananko V.N.

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

108 **Editorial staff:**
editor-in-chief:
Ananko Viktor Nikolaevich;

120 analyst:
Vasin Mikhail Vasilyevich;

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: 06.02.2023

© Ananko Viktor Nikolaevich, 2022

© GeoInfo, 2022

Cover photo: www.Pixabay.com

V МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА ТЕРРИТОРИЙ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ»

22–23
МАРТА 2023



СОЧИ

ОТЕЛЬ «СИТИ ПАРК ОТЕЛЬ СОЧИ»

Организатор конференции



INTERNATIONAL
ASSOCIATION OF
FOUNDATION
CONTRACTORS

МЕЖДУНАРОДНАЯ
АССОЦИАЦИЯ
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Генеральный спонсор
конференции



Спонсоры конференции



Генеральные информационные партнеры



www.fc-union.com, info@fc-union.com, +7 (495) 66-55-014, +7 925 57-57-810

12+



TRUMER
Schutzbauten

www.trumer.cc

Россия:

ООО «РТ Трумер»

119002, г. Москва, переулок Сивцев Вражек,
дом 29/16

Тел.: +7 915 022 75 17

E-Mail: info@trumer.ru

ЗАЩИТА ОТ ПРИРОДНЫХ ОПАСНОСТЕЙ

TRUMER Schutzbauten — ваш компетентный и опытный партнер
в области обеспечения эффективной защиты от природных
опасностей:

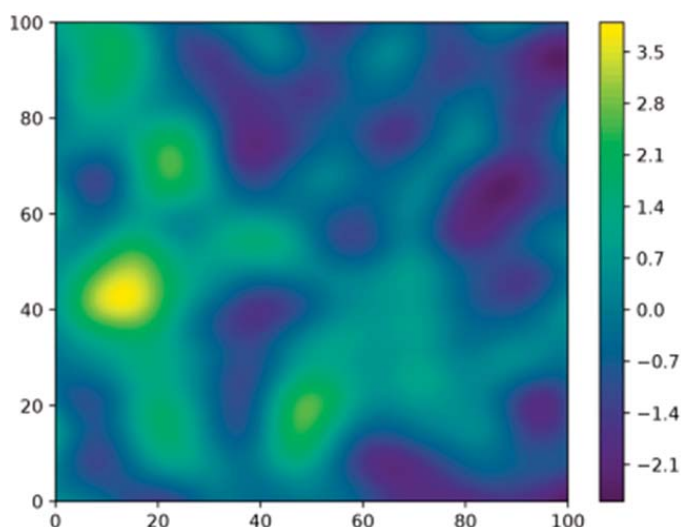
- ▶ камнепадов,
- ▶ оползней,
- ▶ селей,
- ▶ обвалов,
- ▶ лавин,
- ▶ береговой эрозии.



Следуя девизу

**«БЕЗОПАСНОСТЬ, ОБЕСПЕЧЕННАЯ ПРОФЕССИОНАЛАМИ, —
БЕЗОПАСНОСТЬ БЕЗ КОМПРОМИССОВ»,**

компания ТРУМЕР разрабатывает и реализует надежные,
эффективные и экономичные решения.



Источник изображения: [1]
(The image source: [1])

О ПРОГРАММНОМ СРЕДСТВЕ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОСТАТИСТИКИ В ГЕОЛОГИИ И ГЕОТЕХНИКЕ

Обзорная статья

Поступила в редакцию 14.11.2022. Принята к публикации 19.12.2022. Дата публикации 06.02.2023.

© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2022

БОЛДЫРЕВ Г.Г.

ООО НПП «Геотек», г. Пенза,
Россия, g-boldyrev@geotek.ru
Адрес: 440004, Россия,
г. Пенза, ул. Центральная, с. 1М

АННОТАЦИЯ

Геостатистика как раздел статистики учитывает пространственные корреляции, встречающиеся во многих геологических и геотехнических исследованиях. Из таких корреляций можно извлечь ценную информацию, что в том числе помогает справиться с проблемой ограниченного объема исходных данных. Но применению геостатистики часто препятствует отсутствие удобного для пользователей программного обеспечения.

В соответствии с насущностью данной проблемы и была написана данная обзорная статья, посвященная работе в программном пакете GSTools v1.3, основанном на высокоуровневом языке программирования Python. Пакет GSTools предоставляет методы для генерации случайных полей, может выполнять кригинг, оценку вариограмм и многое другое. Его можно использовать для решения задач геологии и геотехники широкого спектра. Разработчики этого пакета [1] выбрали язык программирования Python из-за предоставляемого им оптимального баланса между удобством использования, гибкостью и эффективностью, а также из-за его популярности в научных кругах.

Основой для статьи послужили: рассмотрение материалов соответствующего обзора разработчиков GSTools Себастьяна Мюллера и др. (Германия, Нидерланды) [1], научно-практическое переосмысление этих материалов с ориентацией на потребности российских геотехников и дополнительная поясняющая информация из других источников.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

геостатистика; пространственные корреляции; программный пакет GSTools; язык программирования Python; ковариационная модель; вариограмма; подбор модели; кригинг; случайное поле; метод рандомизации; пространственно-временное моделирование; совместимость программного обеспечения.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Болдырев Г.Г. О программном средстве для практического применения геостатистики в геологии и геотехнике // ГеоИнфо. 2022. № 12. С. 8-37
doi: 10.58339/2949-0677-2022-4-12-8-37

ON A SOFTWARE TOOL FOR THE PRACTICAL APPLICATION OF GEOSTATISTICS IN GEOLOGY AND GEOTECHNICS

Review paper

Received 14.11.2022. Accepted 19.12.2022. Published 06.02.2023.

© Independent electronic journal "GeolInfo", 2022

GENNADIY G. BOLDYREV

ООО НПП «Geotek», Penza, Russia,

g-boldyrev@geotek.ru

Address: ООО НПП «Geotek», 1М

Tsentral'naya street, Penza, 440004,

Russia

ABSTRACT

Geostatistics as a branch of Statistics takes into account the spatial correlations met in many geological and geotechnical studies. Valuable information can be extracted from such sort of correlations. That (among other things) helps to cope with the problem of limited amounts of source data. But the use of Geostatistics is often difficult due to the lack of user-friendly software.

In accordance with the urgency of this problem, the provided review paper was written. It is devoted to the work in the GStools v1.3 software package based on the high-level Python programming language. The GStools package provides methods for random fields generation, it is able to perform kriging, variogram estimation, and much more. It can be used to solve a wide range of problems of Geology and Geotechnics. The developers of this package [1] chose the Python programming language because of the optimal balance between its usability, flexibility, and efficiency, and also because of its popularity in the scientific community.

This paper is based on the next: consideration of the materials of the relevant review paper [1] written by Sebastian Muller et al. (who developed the GStools package); scientific and practical rethinking of those materials in accordance with the needs of Russian geotechnicians; additional explanatory information from other sources.

KEYWORDS:

geostatistics; spatial correlations; GStools software package; Python programming language; covariance model; variogram; model fitting; kriging; random field; randomization method; space-time modeling; software interoperability.

FOR CITATION:

Boldyrev G.G. O programnom sredstve dlya prakticheskogo primeneniya geostatistiki v geologii i geotekhnike [On a software tool for the practical application of Geostatistics in Geology and Geotechnics].

GeolInfo. 2022. 12: 8–37 doi: 10.58339/2949-0677-2022-4-12-8-37 (in Russian).

ВВЕДЕНИЕ ►

Геостатистика возникла как один из разделов статистики в начале 1950-х годов благодаря эмпирической работе южноафриканского горного инженера Дэни Герхардуса Криге [2], который предложил некоторые из первых методов этого специфического научного направления для оценки минеральных ресурсов. А позднее, в 1960-х годах, данное направление формализовал французский инженер Жорж Матерон [3], разработав его математические основы.

Сегодня геостатистика применяется в геологии, гидрогеологии, гидрологии, почвоведении, метеорологии, экологии, океанографии, эпидемиологии и др. [4–11]. Большое количество соответствующ-

щих пособий, инструкций и учебников делают теорию этого направления доступной для практиков [5, 12–20 и др.]. Тем не менее темпы внедрения геостатистики в практику были медленными и неравномерными [19, 20]. Одной из причин этого была нехватка подходящего геостатистического программного обеспечения [19–24]. Несмотря на то что сегодня доступно не такое уж малое количество геостатистических программных решений [25–32], их внедрению препятствуют недостаточное удобство использования и лицензирование [33].

Для решения этих проблем Себастьян Мюллер с коллегами [1, 34] разработали большой пакет программ GStools

на языке программирования Python, предназначенный для геостатистического анализа (в их работе 2022 года [1] рассматривается новая версия – GStools v1.3). Насколько известно, в настоящее время не существует пакета Python с открытым исходным кодом, который предоставлял бы полный необходимый набор средств (функций) для генерации случайных полей, прямого моделирования, кригинга и анализа данных. Однако, с точки зрения разработчиков GStools [1], выбранный ими язык Python потенциально может решить следующий ряд проблем, связанных с геостатистическими приложениями.

1. Такая среда разработки, как Python, позволяет достичь баланса между

Таблица 1. Одномерные функции корреляции [40]

Тип функции корреляции	Модель автокорреляции $\rho(\tau)$
Одноэкспоненциальная	$\rho(\tau) = \exp\left(\frac{-2 \tau }{\delta}\right)$
Косинусно-экспоненциальная	$\rho(\tau) = \exp\left(\frac{- \tau }{\delta}\right) \cos\left(\frac{\tau}{\delta}\right)$
Марковская второго порядка	$\rho(\tau) = \exp\left(\frac{-4 \tau }{\delta}\right) \left[1 + \frac{4 \tau }{\delta}\right]$
Квадратично-экспоненциальная	$\rho(\tau) = \exp\left(-\pi\left(\frac{\tau}{\delta}\right)^2\right)$

Примечания: τ – расстояние между точками;
 δ – длина корреляции (масштаб флуктуации).

простотой использования (обеспечиваемой графическими пользовательскими интерфейсами [35]) и гибкостью (обеспечиваемой инструментами на основе командной строки [36–38 и др.]).

2. Python известен как язык, способный объединять независимые программные решения для выполнения сложных рабочих процессов. Это особенно важно, поскольку геостатистика часто полагается на готовые решатели для генерации данных или на решатели моделей на основе уравнений в частных производных (Partial Differential Equations – PDE).

3. Python – это простой, но мощный язык с увеличивающимся количеством пользователей и растущей поддержкой сообщества в сфере научных вычислений и анализа данных.

Таким образом, как полагают Мюллер и др. [1], язык программирования Python имеет прекрасные перспективы в обозримом будущем. Даже те инженеры и ученые, которые имеют лишь поверхностное образование в области компьютерных наук, смогут применить данный инструментарий и внести необходимые изменения в его конкретные приложения. Однако, чтобы гарантировать принятие и дальнейшее развитие этой области, необходимо максимально «разрешительное» лицензирование.

КОВАРИАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ И ВАРИОГРАФИЯ ►

Как указывают Мюллер и др. [1], в программном пакете GTools реализуется мощный класс CovModel. Методы,

предоставляемые этим классом, являются основой для большинства функциональных возможностей программного пакета GTools, таких как вариография, генерация пространственных случайных полей и кригинг. Модуль CovModel представляет ковариационные модели и вариограммы [1].

Ковариационные модели ►

Выбор ковариационных функций (модели) зависит от характера стохастичности случайного поля. В геотехнической практике тип ковариационной модели, используемой для пространственной оценки распределения свойств грунта, часто определяется на основе большого количества результатов измерений с использованием геостатистики [14, 39].

Однако данные инженерно-геологических исследований, как правило, являются ограниченными и характеризуются низкой изученностью – в основном из-за стоимости изысканий. Из-за этого точной оценки структуры ковариационной модели достичь трудно. Поэтому в геотехническом вероятностном анализе (например, в анализе надежности оснований, склонов, подпорных стен и пр.) часто используются теоретические модели с предполагаемыми масштабами изменчивости в пространстве.

Изменчивые в пространстве свойства грунта имеют определенную корреляцию между каждыми двумя точками пространства, при этом они в целом гораздо больше коррелируют в соседних местах, чем в удаленных друг от друга [1].

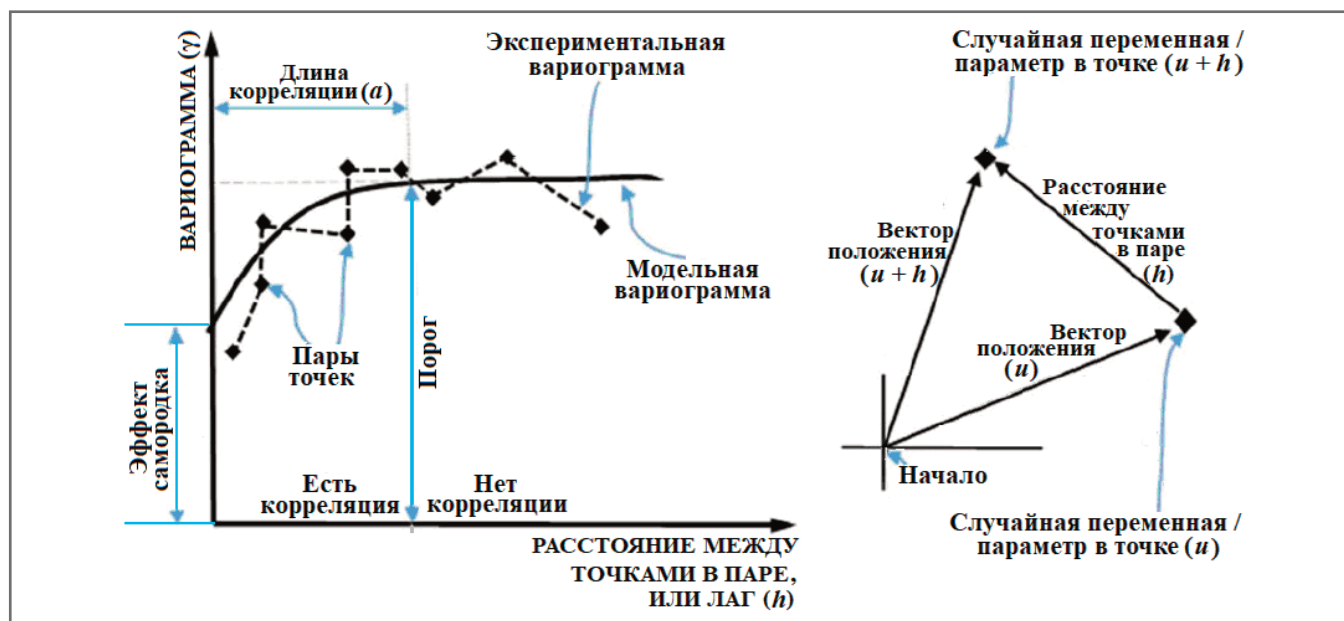


Рис. 1. Экспериментальная и модельная вариограммы [42]

В таблице 1 приведены основные ковариационные модели, применяемые в геостатистике.

Мюллер и др. [1] использовали несколько ковариационных моделей, которые включены в модуль CovModel.

Вариограммы ►

Вариограмма – это график, показывающий, как изменчивость изучаемой пространственной переменной (в виде дисперсии) меняется с увеличением расстояния, и отражающий пространственную корреляцию измеренных значений в опорных, или обусловленных, точках. Она состоит из двух разных форм, связанных друг с другом и называемых экспериментальной и модельной (рис. 1). Сначала рассчитывается экспериментальная вариограмма с использованием фактически измеренных значений. Затем создается модельная вариограмма путем аппроксимации экспериментальной формы с использованием любой из общепринятых моделей, таких как линейная, сферическая, экспоненциальная и т. д. [6, 41]. Функции модельной вариограммы представлены в таблице 2.

Экспериментальная вариограмма описывается следующим уравнением:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(\bar{u}_i) - z(\bar{u}_i + \bar{h})]^2, \quad (1)$$

где z – анализируемая переменная (параметр); $2\gamma(h)$ – значение вариограммы при расстоянии между точками в паре h ; $z(u)$ – значение переменной в точке (u); $z(u+h)$ – значение переменной в точке ($u+h$) (см. рис. 1); n – общее число пар точек; i – номер пары точек.

Вариограмма, представленная на рисунке 1, измеряет разницу (изменение, несходство) между парами переменных на расстоянии h до достижения некоего постоянного значения, которое называется порогом. Расстояние, на котором вариограмма достигает порога, называется длиной корреляции (см. рис. 1), которая определяет автокоррелированную область переменной [44].

Если вариограмма пересекает ось ординат не в ее начале, а в некоем значении $2\gamma(h)$ (см. рис. 1), то это значение еще при возникновении геостатистики (при изучении содержания золота в пробах, которое может сильно различаться, даже если они взяты совсем рядом друг с другом) получило название «эффект самородка».

Эффект самородка представляет собой кажущуюся неоднородность функции вариограммы [45] и может быть

Таблица 2. Функции модельной вариограммы [43]

№	Название	Формула
1	Линейная	$\gamma(h) = c_0 + c_1 t$
2	Сферическая	$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left(\frac{3}{2}t - \frac{1}{2}t^3 \right)$
3	Логарифмическая	$\gamma(h) = c_0 + c_1 t^2 (1 - \ln t^2)$
4	Квадратичная	$\gamma(h) = c_0 + c_1 (2t - t^2)$
5	Круговая	$\gamma(h) = c_0 + c_1 \frac{2}{\pi} \left(t \sqrt{1-t^2} + \arcsin t \right)$
6	Экспоненциальная	$\gamma(h) = c_0 + c_1 (1 - e^{-3t})$
7	Гауссова	$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left(1 - e^{-3t^2} \right)$

Примечания: h – расстояние между точками в паре, или лаг (lag distance); c_0 – так называемый эффект самородка (nugget effect), определяемый случайной составляющей измерений, которая показывает, насколько велика разница между значениями в очень близко расположенных точках; $c = c_0 + c_1$ – порог (sill); c_0/c – относительный эффект самородка (relative nugget); $t = h/a$ для № 1–7; $\gamma(0) = 0$ для № 1–7; $\gamma(h) = c_0 + c_1$ при $h > a$ для № 1–5; a – радиус корреляции, или длина корреляции (range).

определен как мера прямой повторяемости данных, ошибки измерения, разнородности выборки и разрозненности данных [44, 46].

Как указывают Мюллер и др. [1], GStools реализует в модуле CovModel класс ковариационных моделей слабо-стационарных пространственных процессов. Здесь слабая стационарность означает, что связанная с ней вариограмма ограничена, поскольку принимаются постоянное среднее значение и конечная дисперсия.

Для аппроксимации неограниченных вариограмм, таких как модель степенного закона [47], Мюллер и др. [1] предложили набор усеченных степенных моделей на основе работы Ди Федерико и Ноймана [48]. В соответствии с этим внутреннее представление вариограммы γ задается следующей формулой:

$$\gamma(r) = \sigma^2 \cdot \left(1 - \text{cor} \left(s \cdot \frac{r}{\ell} \right) \right) + n, \quad (2)$$

где r – (изотропное) расстояние между точками в паре, или (изотропный) лаг; ℓ – (основная) длина корреляции; s – коэффициент масштабирования для корректировки представления модели (по умолчанию равен единице); σ^2 – дисперсия, или частичный порог; n – эффект самородка, или субмасштабная дисперсия; $\text{cor}(sr/\ell) = \text{cor}(h)$ – нормализованная корреляционная функция, за-

висающая от безразмерного расстояния $h = sr/\ell$, которая определяет модель.

Соответствующие ковариационные и корреляционные функции задаются такими формулами:

$$C(r) = \sigma^2 \cdot \text{cor} \left(s \cdot \frac{r}{\ell} \right), \quad (3)$$

$$\rho(r) = \text{cor} \left(s \cdot \frac{r}{\ell} \right). \quad (4)$$

Мюллер и др. [1] обращают внимание на то, что ковариация и корреляция здесь пренебрегают эффектом самородка в начале координат. Таким образом, дисперсия интерпретируется как вариация над ним, которую иногда называют частичным порогом вариограммы, или коррелированной изменчивостью [16]. Следовательно, порог, или предел, вариограммы вычисляется как сумма дисперсии и эффекта самородка.

Вариограмма, ковариационные и корреляционные функции модели доступны через такие функции (методы) класса model модуля CovModel, как variogram, covariance и correlation (model.variogram, model.covariance и model.correlation) соответственно.

Каждая ковариационная модель определяется по меньшей мере шестью параметрами: размерностью dim, дисперсией var, масштабом флуктуации len_scale, величиной коэффициента масштабирования rescale, коэффициен-

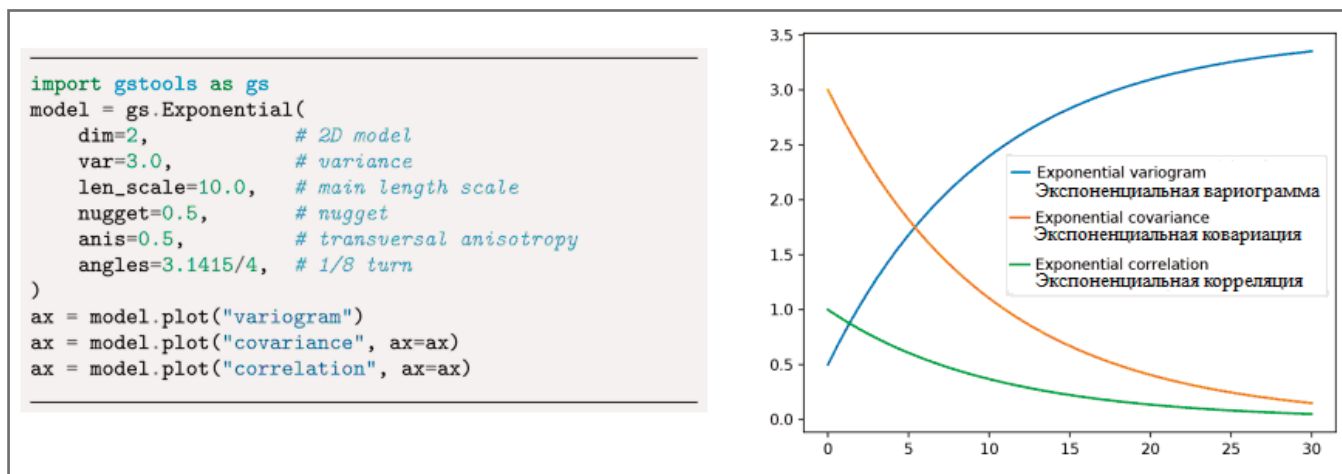


Рис. 2. Инициализация экспоненциальной ковариационной модели, заданной функцией $\text{cov}(h)=\exp(-h)$. Следует обратить внимание, что коэффициент масштабирования по умолчанию равен единице. На правом рисунке показаны кривые вариограммы, ковариационной и корреляционной функций модели, которые могут быть созданы с помощью удобных методов построения графиков [1, 16]

Таблица 3. Ковариационные модели, предопределенные в GStools [1]

Модель	Функция $\text{cov}(h)$	Источник (ссылка)
Gaussian Гауссова	$\exp(-h^2)$	[42]
Exponential Экспоненциальная	$\exp(-h)$	[42]
Stable Устойчивая	$\exp(-h^\alpha)$	[44]
Matern Матерна	$\frac{2^{1-\nu}}{\Gamma(\nu)} \cdot (\sqrt{\nu} \cdot h)^\nu \cdot K_\nu(\sqrt{\nu} \cdot h)$	[45]
Rational Рациональная	$(1 + \frac{h^2}{\alpha})^{-\alpha}$	[45]
Cubic Кубическая	$(1 - 7h^2 + \frac{35}{4}h^3 - \frac{7}{2}h^5 + \frac{3}{4}h^7) \quad (h < 1)$	[46]
Linear Линейная	$(1 - h) \quad (h < 1)$	[42]
Circular Круговая	$\frac{2}{\pi} \cdot (\cos^{-1}(h) - h \cdot \sqrt{1 - h^2}) \quad (h < 1)$	[42]
Spherical Сферическая	$(1 - \frac{3}{2} \cdot h + \frac{1}{2} \cdot h^3) \quad (h < 1)$	[42]
HyperSpherical Гиперсферическая	$\left(1 - h \cdot \frac{{}_2F_1(\frac{1}{2}, -\frac{d-1}{2}, \frac{3}{2}, h^2)}{{}_2F_1(\frac{1}{2}, -\frac{d-1}{2}, \frac{3}{2}, 1)}\right) \quad (h < 1)$	[47]
SuperSpherical Суперсферическая	$\left(1 - h \cdot \frac{{}_2F_1(\frac{1}{2}, -\nu, \frac{3}{2}, h^2)}{{}_2F_1(\frac{1}{2}, -\nu, \frac{3}{2}, 1)}\right) \quad (h < 1)$	[47]
JBessel Дж. Бесселя	$\Gamma(\nu + 1) \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^{-\nu} \cdot J_\nu(h)$	[46]
TPLSimple Простая усеченного степенного закона	$(1 - h)^\nu \quad (h < 1)$	[48]
TPLGaussian Гауссова усеченного степенного закона	$H \cdot E_{1+H}(h^2)$	[43]
TPLExponential Экспоненциальная усеченного степенного закона	$2H \cdot E_{1+2H}(h)$	[43]
TPLStable Устойчивая усеченного степенного закона	$\frac{2H}{\alpha} \cdot E_{1+\frac{2H}{\alpha}}(h^\alpha)$	[49]

Примечания: формулы, включающие нижний индекс $h < 1$, представляют собой кусочно-определенные функции, постоянно равные нулю при $h \geq 1$; h – безразмерное расстояние; d – размерность; $\Gamma(x)$ – гамма-функция; $K_\nu(x)$ – модифицированная функция Бесселя второго рода; $J_\nu(x)$ – функция Бесселя первого рода; ${}_2F_1(a, b, c, x)$ – обычная гипергеометрическая функция; $E_\nu(x)$ – экспоненциальная интегральная функция; все остальные переменные являются параметрами формы соответствующей модели [49].

том анизотропии anis и углами поворота angles , причем последние два зависят от размера. На рисунке 2 показаны: пример задания экспоненциальной модели (повторной реализации всего в трех строках) и результирующие функции модели, иллюстрирующие указанные параметры. В дополнение к предопределенным ковариационным моделям пользователи могут задавать свои собственные функции моделей в виде нормализованных корреляционных функций. В таблице 3 представлены ковариационные модели, предопределенные в GStools.

В дополнение к предопределенным ковариационным моделям пользователи могут задать свою собственную функцию модели, приведя нормализованную корреляционную функцию. На рисунке 3 показано задание экспоненциальной модели всего в трех строках.

Зависящий от размера спектр изотропной ковариационной модели можно «вызвать» с помощью такой функции (метода) класса `model` модуля `CovModel`, как `spectrum(model.spectrum)`. Этот спектр вычисляется непосредственно с использованием ковариационной функции следующим образом:

$$S(k) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^d \cdot \int_{\mathbb{R}^d} C(|r|) \cdot e^{i \cdot k \cdot r} dr = \frac{|k|}{(2\pi |k|)^{\frac{d}{2}}} \cdot \mathcal{H}_{\frac{d}{2}-1} \left\{ r^{\frac{d}{2}-1} C(\cdot) \right\} (|k|) \quad (5)$$

где $r=|r|$ и $k=|k|$ – нормы (модули, длина) соответствующих векторов; H – преобразование Ханкеля, которое обеспечивает математически автономную и численно надежную формулировку радиально-симметричного пре-

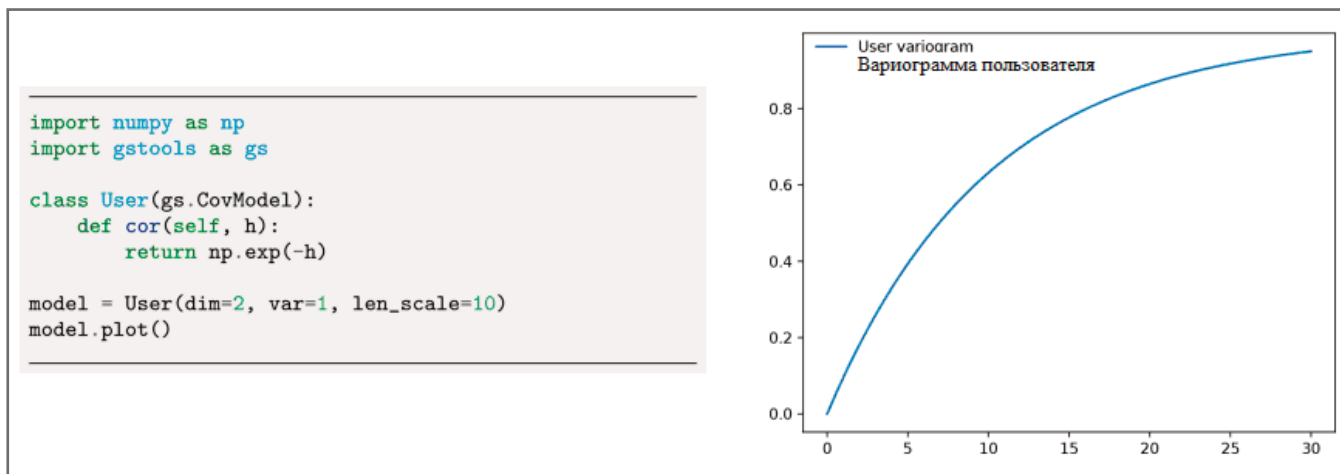


Рис. 3. Инициализация экспоненциальной ковариационной модели, определяемой пользователем. Единственное, что необходимо определить, – нормализованную корреляционную функцию cor [1]

образования Фурье. В GSTools используется реализация H , предоставляемая hankel – библиотекой Python для выполнения простых и точных преобразований Ханкеля [56, 57]. Для улучшения вычислений в GSTools используются модели с известными аналитическими решениями.

Предпосылкой для кригинга или генерации случайного поля является то, что применяемая ковариационная функция является положительно определенной (положительно полуопределенной). Это можно проверить с помощью спектральной плотности, которая определяется следующим образом (здесь Мюллер и др. [1] обращают внимание на то, что спектр изотропной ковариационной модели S зависит только от нормы вектора k):

$$E(k) = \frac{S(k)}{\sigma^2} = k(2\pi k)^{-\frac{d}{2}} \cdot \mathcal{H}_{\frac{d}{2}-1} \left\{ r^{\frac{d}{2}-1} \rho(\cdot) \right\} (k). \quad (6)$$

Из теоремы Бохнера [58] следует, что спектральная плотность является функцией плотности вероятности тогда и только тогда, когда лежащая в основе ковариационная функция является положительно определенной (положительно полуопределенной). Этому требованию удовлетворяют все предопределенные модели в GSTools. Как следствие, дисперсия ошибок при кригинге всегда неотрицательна.

Анизотропия и вращение ►

Мюллер и др. [1] отмечают, что вариограммы обычно определяются на основе лага r , что приводит к изотропной модели. Однако многие естественные процессы включают анизотропию с различными диапазонами корреляции в разных (ортогональных) направлениях. Примером может служить гидравличе-

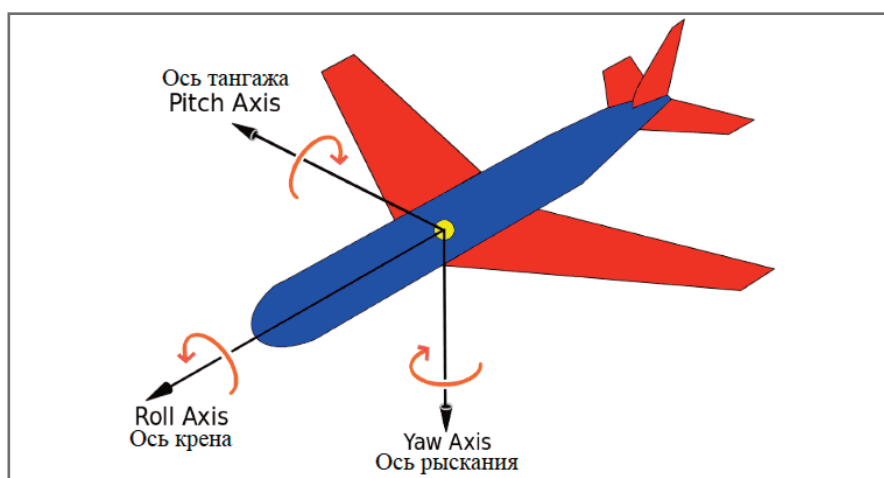


Рис. 4. Наглядный пример изображения осей для определения углов Тейта – Брайана (углов рыскания, тангажа и крена) [60]

ская проводимость, где анизотропия обычно возникает из-за геологической стратификации. Реализация анизотропии в GSTools основана на безразмерном расстоянии h , определяемом формулой [16]:

$$h = \sqrt{\sum_{i=1}^d \left(\frac{r_i}{\ell_i} \right)^2} = \frac{s}{\ell} \sqrt{\sum_{i=1}^d \left(\frac{r_i}{e_i} \right)^2} = s \cdot \frac{\tilde{r}}{\tilde{\ell}}, \quad (7)$$

где $\ell = s \cdot \ell_1$ – основная шкала длины, включающая коэффициент масштабирования s ; $e_i = \frac{\ell_i}{\ell_1}$ – i -тый коэффициент анизотропии; $r = (r_1, r_2, \dots)$ – расстояния вдоль главной оси корреляции, приводящие к изотропному расстоянию $\tilde{r}$.

Следовательно, для полного описания анизотропной модели в GSTools используются: шкала основной длины, набор коэффициентов анизотропии и набор углов поворота.

На практике основные направления корреляции не обязательно следуют главной оси. CovModel учитывает вра-

щение, используя углы поворота, число которых m зависит от размера d :

$$m = \frac{d \cdot (d-1)}{2}. \quad (8)$$

В двумерном случае вращение полностью описывается одним углом поворота в плоскости xu , а в трехмерном – тремя углами (в плоскостях xu , xz и yz). В трехмерном случае их часто называют углами Тейта – Брайана (Tait-Bryan) – углами рыскания (yaw), тангажа (pitch) и крена (roll) [59] (рис. 4). Пример трехмерного случая представлен на рисунке 5.

Одной из уникальных особенностей GSTools является поддержка произвольных размеров во всех предусмотренных процедурах. Для вращения с более высокой размерностью применяется следующая схема: первые углы совпадают с углами следующего более низкого измерения, а добавленные углы $(d-1)$ описывают вращения в плоскостях добавленного из-

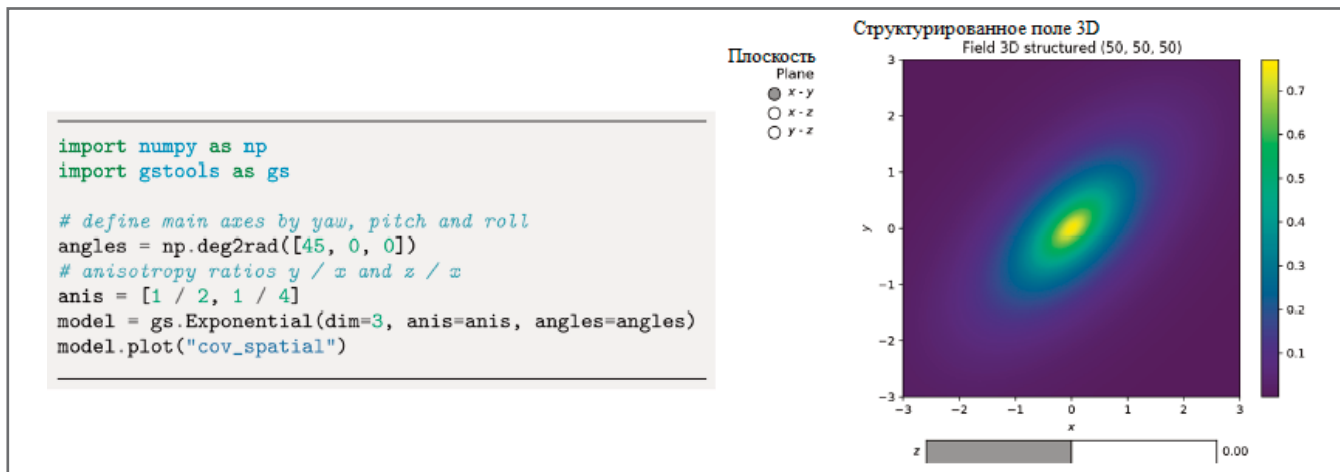


Рис. 5. Пространственная ковариационная структура анизотропной экспоненциальной модели в 3D, построенная с помощью встроенных (стандартных) интерактивных подпрограмм GSTools. В данном примере показан восьмой поворот в плоскости xu с коэффициентами анизотропии (1/2, 1/4). Углы поворота указаны в радианах [1]

мерения (в 3D – в плоскостях xz и yz). Таким образом, существует 6 углов поворота в 4D, 10 – в 5D и т. д. Вращение в более высоких измерениях имеет значение только для пространственно-временного моделирования с тремя пространственными измерениями и применяется в других областях научных исследований с использованием данных высокой размерности. Указанная схема была выбрана Мюллером и др. [1] для метрических пространственно-временных моделей для учета пространственной анизотропии аналогично тому, как это происходит для простой пространственной модели.

Вращение в плоскости $x_j x_j$ описывается следующей матрицей:

$$G(\alpha, [i, j]) \in \mathbb{R}^{d \times d}; \quad (9)$$

$$G(\alpha, [i, j])_{kl} = \begin{cases} \cos \theta & k=l=i, j \\ \sin \theta & k=i, l=j \\ -\sin \theta & k=j, l=i \\ 1 & k=l \neq i, j \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

(else – это оператор «иначе», то есть оператор иного выбора (если не соблюдаются остальные условия, записанные выше строки с else в формуле (10)).

Порядок плоскостей вращения определяется описанной схемой, то есть $I_1=[1, 2]$ (плоскость xu), $I_2=[1, 3]$ (плоскость xz), $I_3=[2, 3]$ (плоскость yz) и т. д. Эти значения определяют матрицу вращения **Rot** для преобразования главных осей в направления корреляции и матрицу обратного вращения **DeRot=Rot⁻¹** для инверсии:

$$\text{Rot} = \prod_{i=1}^m G((-1)^{i-1} \alpha_i, I_i) = G((-1)^{m-1} \alpha_m, I_m) \dots G(\alpha_1, I_1) \quad (11)$$

где чередующиеся знаки углов поворота $(-1)^{j-1} \alpha_j$ были выбраны для соответствия углам Тейта – Брайана в 3D.

Для применения или исключения анизотропии используются матрица изотропии

$$\text{Iso} = \text{diag}(e_1^{-1}, e_2^{-1}, \dots), \quad (12)$$

и матрица анизотропии

$$\text{AnIso} = \text{Iso}^{-1}. \quad (13)$$

Объединение этих двух типов матриц позволяет изотропно и анизотропно располагать пространственные точки с помощью следующих выражений:

$$\text{Isom} = \text{Iso} \cdot \text{DeRot}, \quad (14)$$

$$\text{AnIsom} = \text{Rot} \cdot \text{AnIso}. \quad (15)$$

GSTools имеет подпрограмму CovModel.isometrize для преобразования пространственных положений в их изотропные аналоги в соответствии с требованиями уравнения (7) и подпрограмму CovModel.anisometrize для выполнения следующих преобразований (инверсий) соответственно:

$$x_{\text{isom}} = \text{Isom} \cdot x, \quad (16)$$

$$x_{\text{anisom}} = \text{AnIsom} \cdot x. \quad (17)$$

Географические координаты ►

Поверхность Земли, как отмечают Мюллер и др. [1], представляет собой неевклидово многообразие – и все крупномасштабные географически привязанные данные обязательно будут отражать это. Мы имеем дело с неевклидовой природой такого рода данных и при этом принимаем, что Земля представляет собой идеальную сферу и что расстояние между двумя точками $p_1=(\varphi_1, \lambda_1)$ и $p_2=(\varphi_2, \lambda_2)$ задается их широтой φ и долготой λ и может быть описано центральным углом, вычисленным по расстоянию по дуге большого круга:

$$\xi(p_1, p_2) = \arccos(\sin \phi_1 \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos(\Delta \lambda)) \quad (18)$$

Из 3D моделей может быть получено огромное семейство достаточно достоверных моделей на сфере путем вставки хордальных расстояний, что дает в результате соответствующую ковариационную модель Ядренко C_Y [61]:

$$C_Y(\xi) = C_{3D} \left(2 \cdot \sin \left(\frac{\xi}{2} \right) \right). \quad (19)$$

Лежащее в основе этого многообразие вводит новые ограничения для того, чтобы ковариационные модели были положительно определенными. Структура сферы допускает только изотропные модели. Но для мелкомасштабных применений допустимо принять анизотропию. Подходящей адаптацией является использование 2D проекции, подобной координатам Гаусса – Крюгера (Gauss-Kruger). В программном пакете GSTools для унифицированного представления для неевклидовых координат используются модели Ядренко, поскольку они облегчают использование всех представленных моделей с геогра-

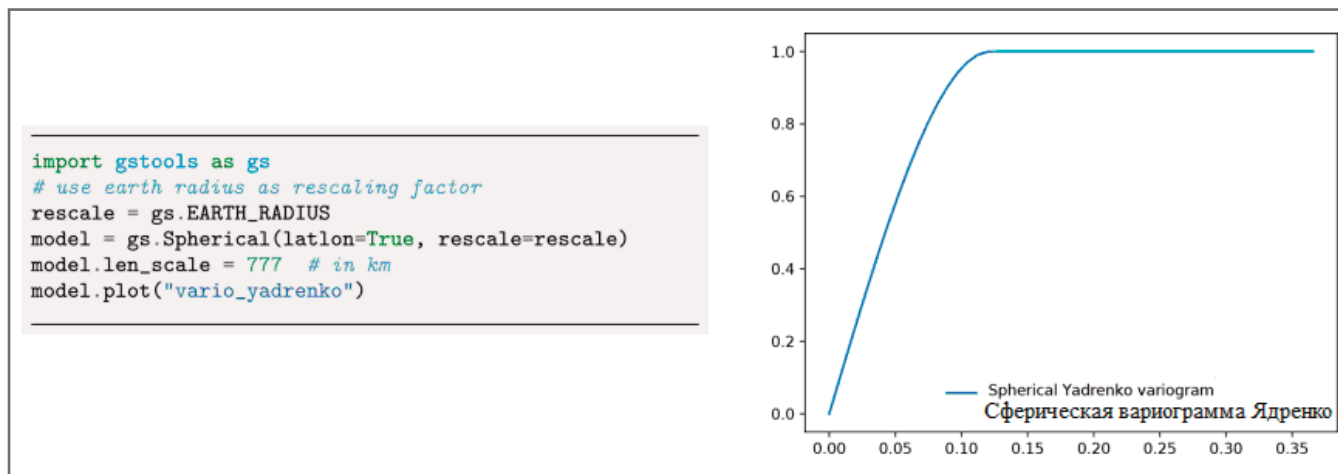


Рис. 6. Инициализация ковариационной модели Ядренко. Здесь в качестве коэффициента масштабирования используется радиус Земли, чтобы получить значимую шкалу длины. Работа в подпрограмме vario_yadrenko по-прежнему зависит от центрального угла, заданного в радианах [1]

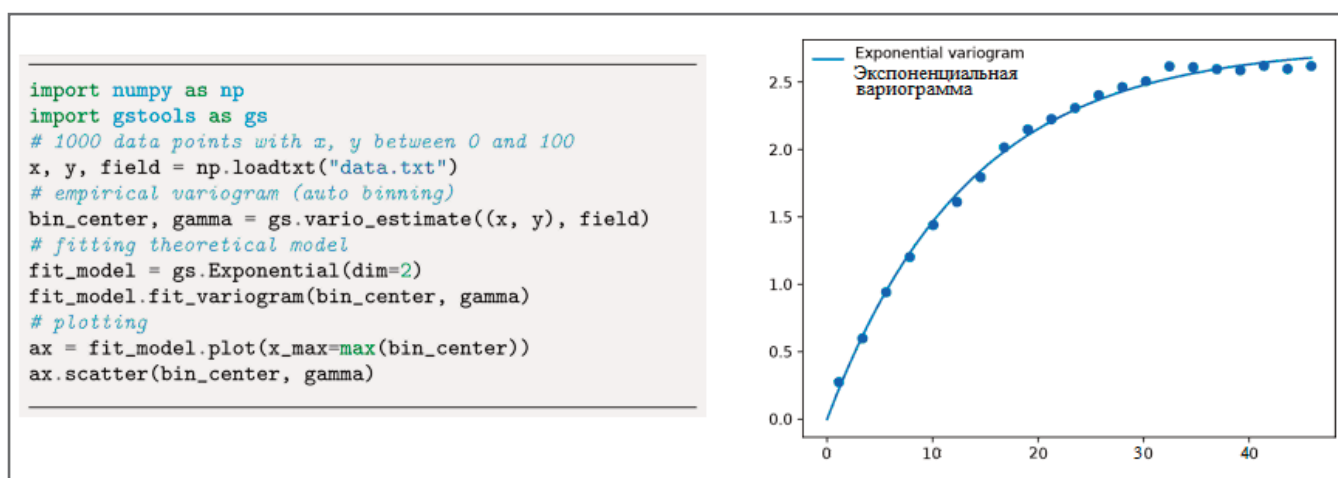


Рис. 7. Оценка эмпирической вариограммы модельных неструктурированных данных и подбор (аппроксимация) экспоненциальной модели. Было рассчитано, что количество ячеек (бинов, интервалов) составляет 21 при максимальном расстоянии между бинами (в общем интервале) около 45 [1]

фическими координатами, как показано на рисунке 6.

Эмпирическая вариограмма, подготовка данных и подбор модели ►

Мюллер и др. [1] подчеркивают, что эмпирическая вариограмма является важным инструментом для анализа пространственно коррелированных данных. Она оценивается с помощью субпакета `gstools.variogram`, который предоставляет две оценочные функции для эмпирической вариограммы – Матерона (Matheron) и Кресси (Cressie) [47].

Оценочная функция Матерона γ для вариограммы пространственного случайного поля U по умолчанию задается следующим образом:

$$\gamma(r) = \frac{1}{2} \cdot |M(r)|^{-1} \sum_{M(r)} (U(x_i) - U(x_j))^2, \quad (20)$$

где $M(r)$ – множество всех попарных то-

чек пространственного случайного поля, разделенных расстоянием r с определенным допуском $\epsilon > 0$.

Оценочная функция Кресси, которая более устойчива к выбросам, задается так:

$$\gamma(r) = \frac{\frac{1}{2} \cdot (|M(r)|^{-1} \sum_{M(r)} \sqrt{|U(x_i) - U(x_j)|})^4}{0.457 + 0.494/|M(r)| + 0.045/|M(r)|^2}. \quad (21)$$

Для обеих оценок требуются предопределенные ячейки, или бины (структурные элементы разбиения массива данных на подмассивы, или подмножества) множества $M(r)$ для группировки попарных расстояний между точками данного поля. GSTools предоставляет стандартную процедуру сортировки, где максимальная ширина такой ячейки устанавливается равной одной трети диаметра части пространства, содержащей поле, а количество ячеек определяется правилом Стёрджеса (Sturges) [62] и все они имеют

одинаковую ширину. На рисунке 7 приведен пример оценки вариограммы неструктурированного пространственного случайного поля с автоматическим биннингом (разбиением множества значений на ячейки, или бины, то есть объединением соседних значений в ячейки).

Мюллер и др. [1] отмечают, что GSTools учитывает анизотропию, предоставляя подпрограммы для оценки вариограмм вдоль заданных направлений с определенным допуском на угол и некой полосой пропускания. При использовании ортогональных осей можно подобрать подходящую теоретическую модель и ее коэффициенты анизотропии (рис. 8). Однако определение основных осей вращения по заданным данным зависит от пользователя и выходит за рамки представляемой здесь версии GSTools.

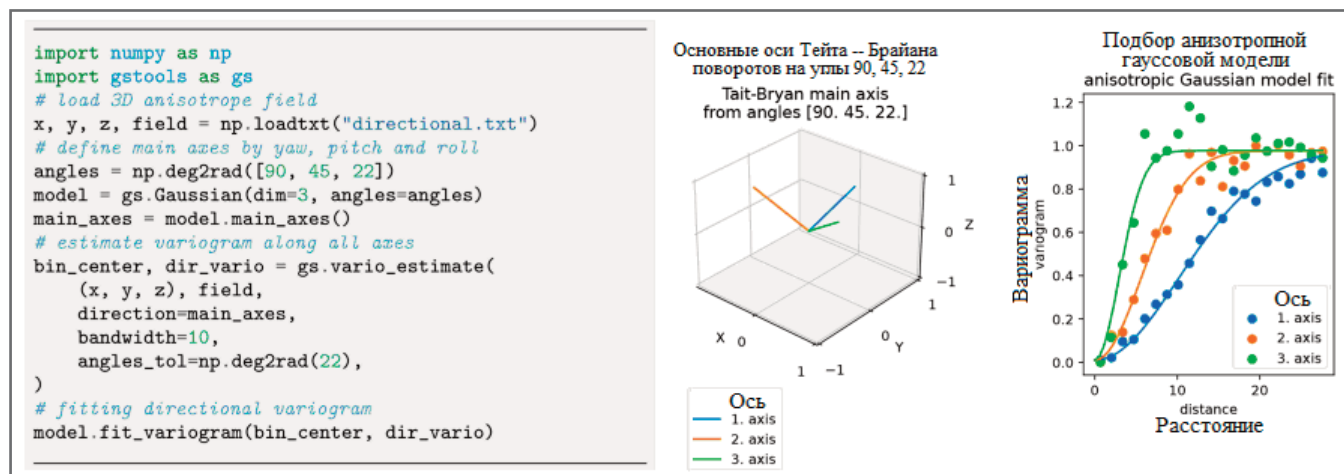


Рис. 8. Оценка вариограмм по направлениям заданных основных осей. На фрагменте программы показана настройка для оценки и подбора (аппроксимации) вариограммы к анизотропному полю. На графиках показаны основные оси поворотов модели и результаты подбора. Команды построения графиков опущены [1]

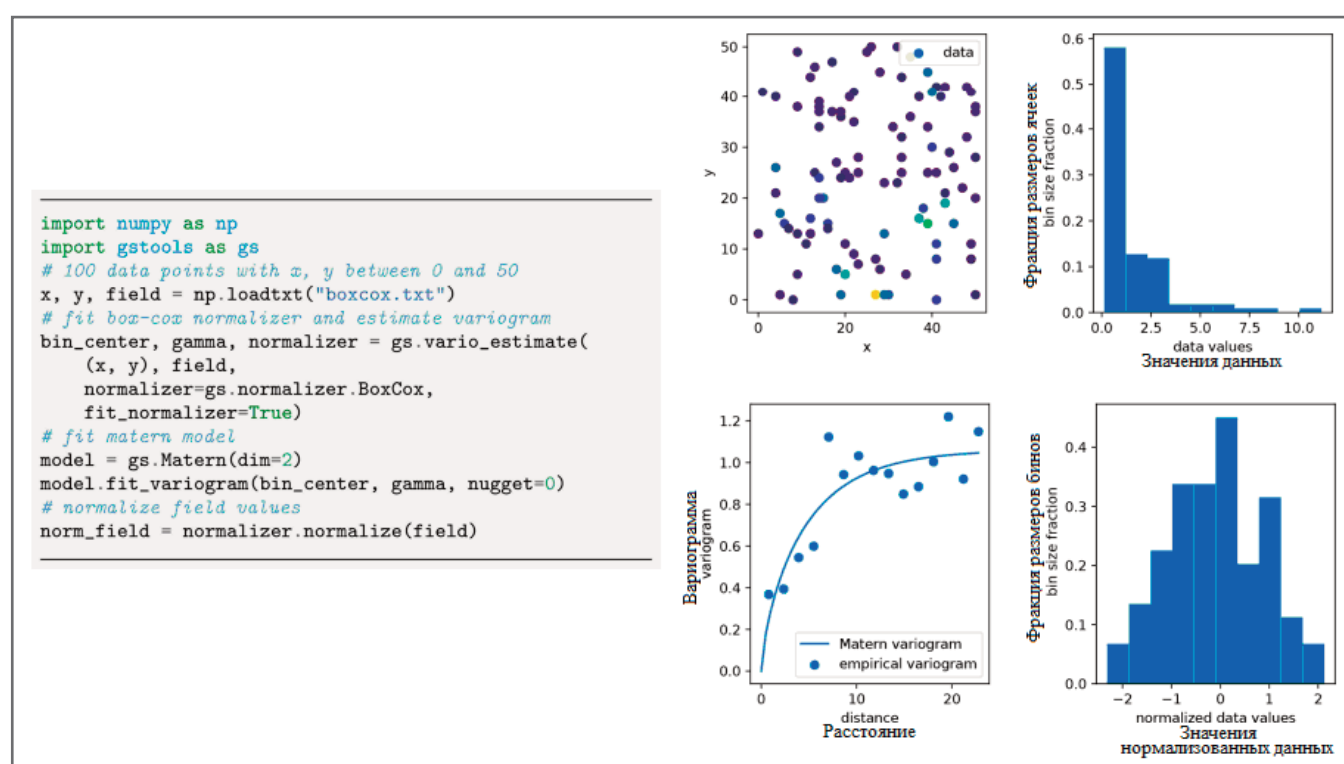


Рис. 9. Оценка эмпирической вариограммы (график внизу слева) модельных неструктурированных данных (точечная диаграмма сверху слева) после нормализации входных значений методом Бокса – Кокса (Вох-Сох). Справа показаны гистограммы данных до (вверху) и после (внизу) нормализации. В демонстрационных целях к эмпирической вариограмме была применена модель Матерна (Matern) [52]. Команды построения графиков опущены [1]

Полевые данные часто не соответствуют нормальному распределению, которое является важным допущением для оценки вариограмм. Например, обычно принимается, что значения коэффициента фильтрации (водопроницаемости) распределены логнормально [63], в то время как данные о дождевых осадках нормализуются с помощью преобразования Бокса – Кокса (Вох-Сох) [7]. Поэтому, как указывают Мюллер и др. [1], GSTools предоставляет следующий набор нормализаторов, ос-

нованных на степенных преобразованиях, которые могут быть адаптированы к заданному набору данных с использованием подхода максимального правдоподобия [64]: LogNormal (логнормальное преобразование), BoxCox (по Боксу – Коксу) [65], YeoJohnson (по Йео – Джонсону) [66], Modulus (по модулю) [67], Manly (по Манли) [68]. Пример их применения показан на рисунке 9. Сравнение всех предоставляемых в GSTools нормализаторов представлено на рисунке 10.

Мюллер и др. [1] добавляют, что GSTools также предоставляет подпрограммы для удаления трендов (например, температура может уменьшаться с высотой, а гидравлическая проводимость может уменьшаться с глубиной) с помощью статистических методов. Еще одним приложением является анализ пространственной корреляции остатков (разностей между эмпирическими данными и модельными значениями (residuals)) после применения к данным регрессионной модели. Все подпрограммы, ра-

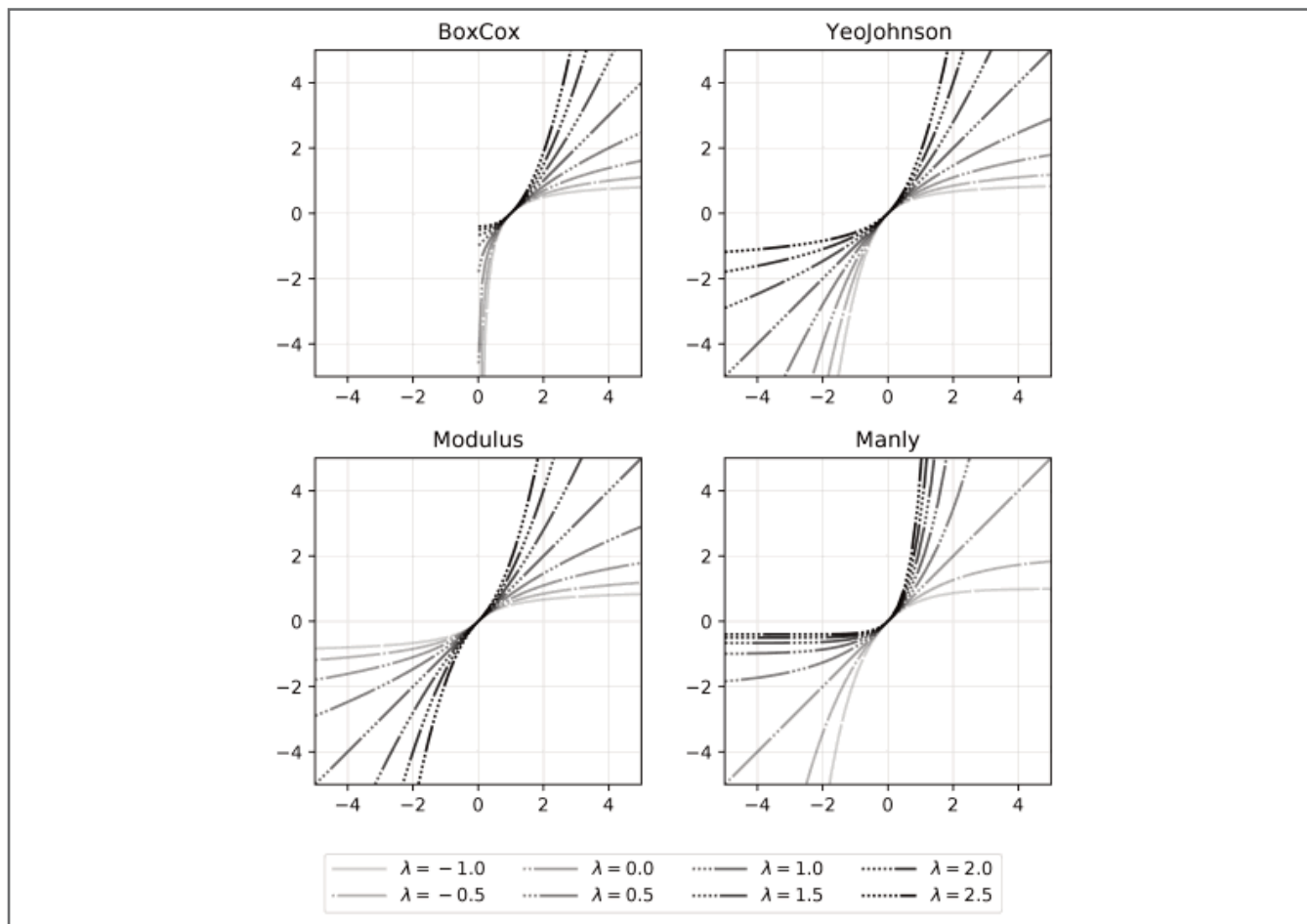


Рис. 10. Сравнение параметрических нормализаторов, предоставляемых в GSTools [1]

ботающие с данными, имеют ключевые слова trend («тренд»), normalizer («нормализатор») и mean («среднее значение нормализованных данных»).

КРИГИНГ, СЛУЧАЙНЫЕ ПОЛЯ И ОБУСЛОВЛЕННЫЕ СЛУЧАЙНЫЕ ПОЛЯ ►

Кригинг ►

Рассматриваемый пакет программ GSTools в своем подпакете gstools.krige имеет подпрограммы для выполнения кригинга – интерполяции методом, при котором интерполированные значения моделируются гауссовым процессом на основе предопределенных ковариационных моделей [49].

Используя интерполяцию данных методом кригинга, можно найти значения параметра в пространстве между его известными значениями. Термин «кригинг» был введен Г. Матероном по фамилии уже упоминавшегося южноафриканского горного инженера Дэниела Криге (D. Krige). Этот термин служит для обозначения семейства алгоритмов линейной пространственной регрессии (для регрессионного анализа на основе гауссовых процессов) [14].

Кригинг позволяет учесть вес каждой точки, отображающей экспериментальные данные, в процессе вычисления значений интерполяционной функции в точках регулярной сетки. Это один из наиболее гибких и часто используемых методов, однако для множеств большого размера он работает медленно.

Основная проблема кригинга – необходимость подбора параметров вариограммы, от которых зависит результат интерполяции. На первом этапе вычислений по исходным данным подбирается выборочная (экспериментальная) вариограмма $\gamma^*(h)$ и строится график функции, где каждому интервалу значений h (то есть разности расстояний между парами точек, имеющей размерность в единицах карты – градусах) соответствует вариация (квадрат разности значений в этих точках). При этом h откладывается по оси x или y , а поле принимается изотропным.

Выборочную вариограмму нельзя напрямую использовать в уравнениях кригинга. Ее необходимо приблизить некоторой модельной функцией вариограммы $\gamma(h)$ (см. таблицу 2), которая используется на втором этапе вычислений.

Данные должны быть нормально распределенными, чтобы влияние выбросов на оценку вариограммы и кригинг было сведено к минимуму. Поэтому вводимые данные оцениваются на предмет нормальности распределения с использованием функции плотности вероятности. Для нормализации распределения данных везде, где это необходимо, выполняется логарифмическое преобразование [6]. Перед кригингом оценивается несколько моделей вариограммы, чтобы выбрать наиболее подходящую для используемого набора данных. Модель наилучшего соответствия выбирается на основе адаптации модели вариограммы, которая точно соответствует экспериментальным значениям и демонстрирует минимальную ошибку (минимальную сумму средних квадратических ошибок) [69]. Согласно работе [13] наилучшим вариантом подобранной модельной функции можно считать тот, который дает наименьшую дисперсию отклонений эмпирических значений от теоретических.

Цель кригинга, как указывают Мюллер и др. [1], – получение значений поля z в некоторой точке x_0 , когда имеются опорные (обусловленные, опреде-

```

import numpy as np
from gstools import Gaussian, krige
# conditions and output grid
cond_pos = [0.3, 1.9, 1.1, 3.3, 4.7]
cond_val = [0.47, 0.56, 0.74, 1.47, 1.74]
grid = np.linspace(0, 10, 101)
# kriging setups
model = Gaussian(dim=1, var=0.5, len_scale=2)
cfg = (model, cond_pos, cond_val)
sim_krige = krige.Simple(*cfg, mean=np.mean(cond_val))
ord_krige = krige.Ordinary(*cfg)
uni_krige = krige.Universal(*cfg, drift_functions="lin")
# interpolated fields
sim_field = sim_krige(grid, return_var=False)
ord_field = ord_krige(grid, return_var=False)
uni_field = uni_krige(grid, return_var=False)
# estimated means
sim_mean = sim_krige(grid, only_mean=True)
ord_mean = ord_krige(grid, only_mean=True)
uni_mean = uni_krige(grid, only_mean=True)

```

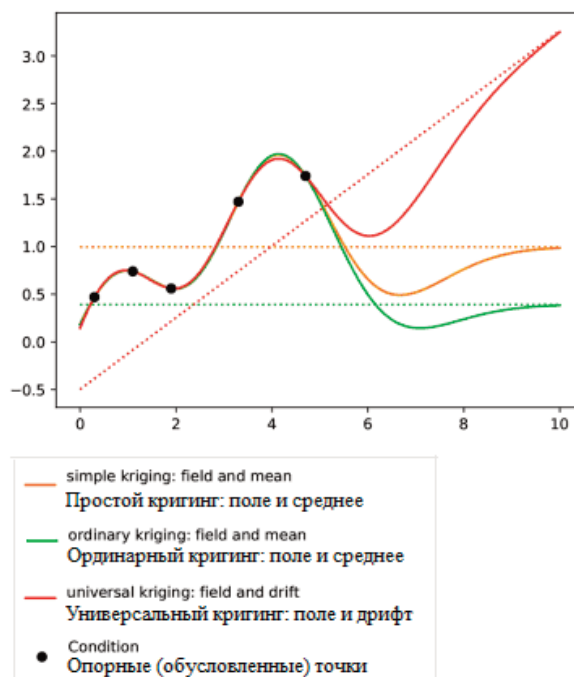


Рис. 11. Сравнение простого, ординарного и универсального кригинга. Все три подпрограммы имеют схожие настройки, но для простого кригинга требуется оценка среднего значения, а для универсального кригинга дополнительно нужны функции дрейфа. Команды построения графиков опущены [1]

ляющие) фиксированные значения $z(x_1), \dots, z(x_n)$ в заданных точках $x_1, \dots, x_n$. Результирующее значение z_0 для x_0 вычисляется как средневзвешенное значение

$$z_0 = \sum_{i=1}^n w_i \cdot z_i, \quad (22)$$

где веса $w=(w_1, \dots, w_n)$, определяются конкретной процедурой кригинга.

В подпакете `gstools.krige` имеется несколько подпрограмм класса `Krige` – для разных методов кригинга:

1) простого (Simple), когда данные интерполируются с заданным средним значением для поля кригинга;

2) ординарного (Ordinary), когда среднее значение результирующего поля неизвестно и оценивается вместе с интерполяцией;

3) универсального (Universal), когда в дополнение к обычному кригингу подпрограмма может предоставить функции дрейфа $f_1, \dots, f_k$;

4) с внешним дрейфом (ExtDrift), когда процедура подобна универсальному кригингу, но дрейф обеспечивается внешним (external) источником.

Преимуществом использования общего класса `Krige` является сочетание всех описанных функций, например применение универсального кригинга с функциональным дрейфом вместе с дополнительными внешними дрейфами. Типичным сценарием здесь является,

например, интерполяция температуры с принимаемым дрейфом с севера на юг (функциональным дрейфом) и линейной корреляцией с высотой (внешним дрейфом).

Поскольку во всех моделях вариограмм в `GSTools` принимается слабая стационарность, система кригинга всегда строится на основе соответствующей ковариационной функции:

$$\begin{bmatrix} C & (1) & F & E \\ (1)^T & & & \\ F^T & & 0 & \\ E^T & & & \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w \\ (\mu) \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0 \\ (1) \\ F_0 \\ E_0 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

где $C = (C(x_i, x_j))_{i,j=1,\dots,n}$ – ковариационная матрица, зависящая от определяющих точек и данной модели; $C_0 = (C(x_i, x_0))_{i=1,\dots,n}^T$ – вектор ковариации для целевой точки x_0 ; $F = (f_j(x_i))_{i=1,\dots,n; j=1,\dots,k}$ – подматрица, содержащая значения функционального дрейфа в опорных (обусловленных) точках и $F_0 = (f_j(x_0))_{j=1,\dots,k}^T$ в целевой точке, где k – количество функциональных дрейфов; $E = (e_l(x_i))_{i=1,\dots,n; l=1,\dots,l}$ – подматрица, содержащая значения внешнего дрейфа в опорных точках и $E_0 = (e_l(x_0))_{l=1,\dots,l}^T$ в целевой точке, где l – количество внешних дрейфов; $\mu, \phi = (\phi_1, \dots, \phi_k)^T, \psi = (\psi_1, \dots, \psi_l)^T$ – множители Лагранжа для условий отсутствия смещений (дрейфов), функциональных

дрейфов и внешних дрейфов соответственно.

В формуле (23) вектор 1 и его множитель Лагранжа μ приведены в скобках, поскольку их вид зависит от того, должна ли система быть несмещенной или нет (обычный это или простой кригинг). Здесь Мюллер и др. [1] обращают внимание на то, что количество функциональных дрейфов k и внешних дрейфов l может быть равно нулю в зависимости от того, заданы они или нет.

`GSTools` также предоставляет возможность учитывать дисперсии ошибок измерений σ_i^2 для каждой опорной (обусловленной) точки путем корректирования ковариационной матрицы [49]:

$$\tilde{C} = C + \text{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2) = \begin{bmatrix} C(x_1, x_1) + \sigma_1^2 & \dots & C(x_1, x_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C(x_n, x_1) & \dots & C(x_n, x_n) + \sigma_n^2 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

По умолчанию дисперсии ошибок измерений σ_i^2 установлены по эффекту самородка модели (model nugget). Чтобы получить численно стабильные результаты, решается система кригинга с помощью псевдообратной матрицы, преимущество которой заключается в том, что избыточные данные или множественные измерения в одном и том же месте усредняются в результирующем поле [70].

Последней отмеченной здесь Мюллером и др. [1] особенностью является

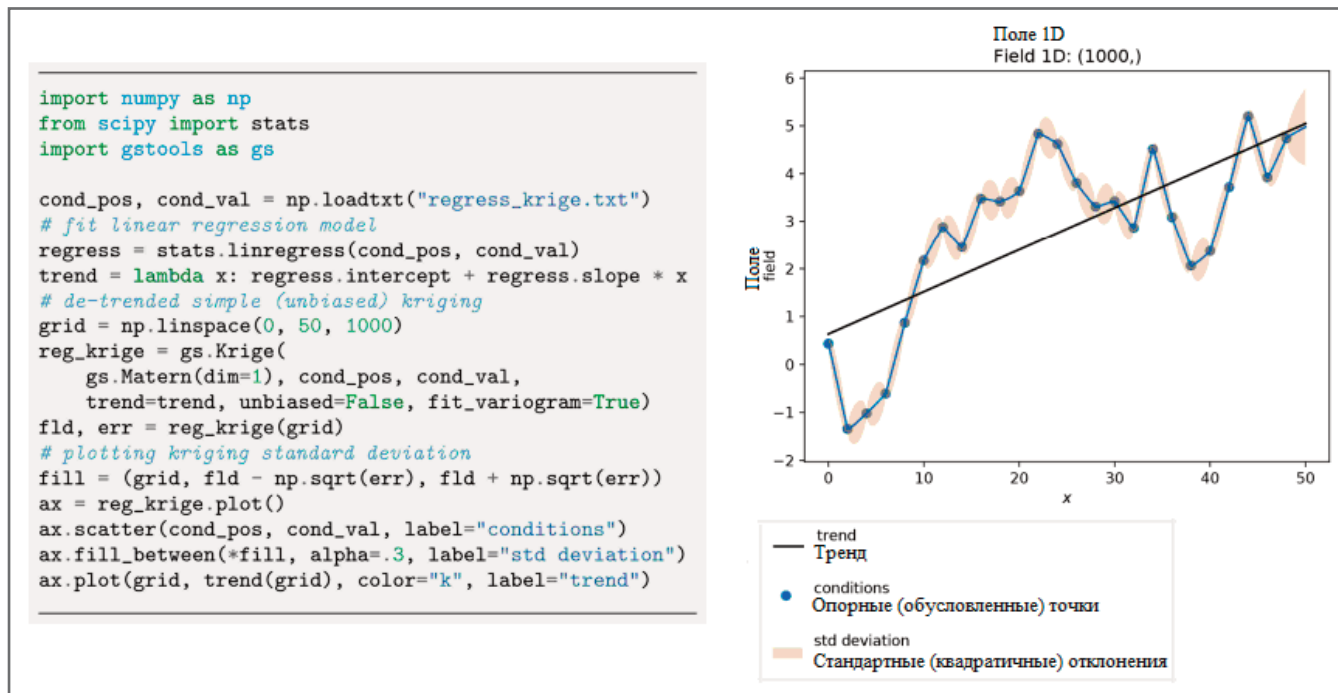


Рис. 12. Простая настройка для линейного регрессионного кригинга. Хотя интерполяция совпадает с кусочно-линейной функцией, мы получаем информацию о дисперсиях ошибок между опорными (обусловленными) точками, как показано на графике [1]

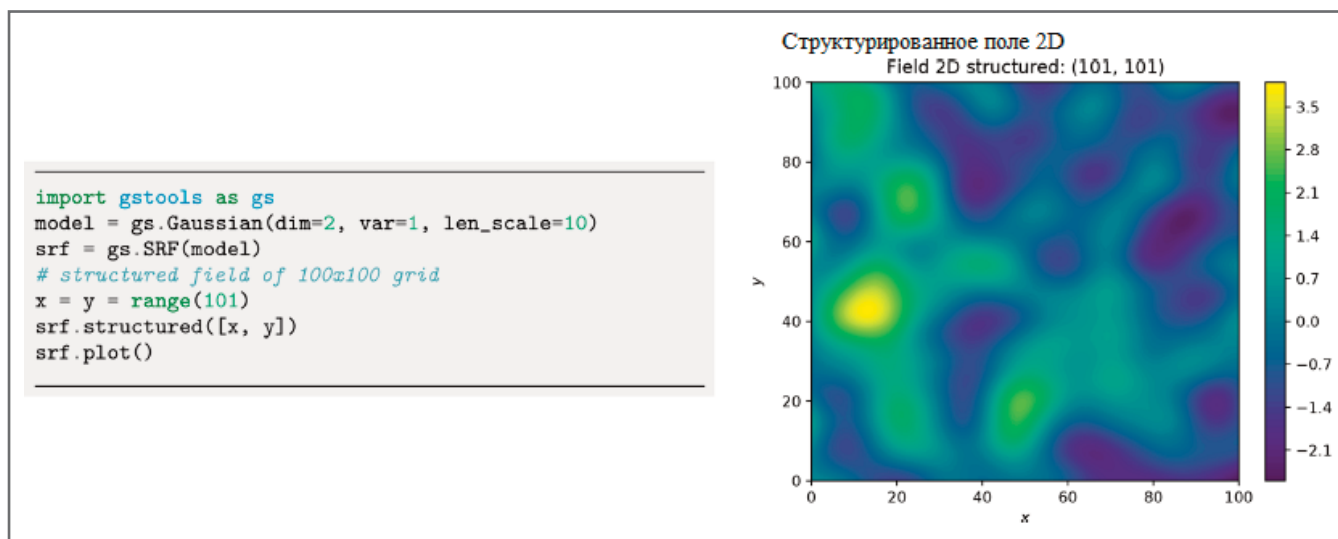


Рис. 13. Генерация структурированного случайного поля по гауссовой вариограмме [1]

возможность определения среднего значения [49] с помощью обычного кригинга или оценки среднего дрейфа на основе заданных функциональных и/или внешних условий дрейфа, как показано на рисунке 11. Пример кригинга с линейной интерполяцией показан на рисунке 12.

Случайные поля ►

Основным элементом пакета программ GSTools, как указывают Мюллер и др. [1], является генератор пространственных случайных полей класса SRF (Spatial Random Field). Для реализации

пространственного случайного поля необходима ковариационная модель. Предоставляются два способа генерации полей – структурированный и неструктурированный. В обоих случаях позиции (positions), в которых будет оцениваться поле, задаются с помощью аргумента (независимой переменной, параметра) pos. В структурированном случае pos содержит по одному кортежу (набору взаимосвязанных величин или записей) на измерение (dimension), каждый из которых определяет разбиение соответствующей оси, в результате чего получается прямолинейная сетка. Для

неструктурированных сеток кортеж pos содержит координаты x, y, z для каждой точки оценки. Класс SRF позволяет управлять базовой генерацией псевдослучайных чисел с помощью начального значения для последующей генерации поля. Пример фрагмента программы приведен на рисунке 13.

Генерация поля выполняется с помощью метода рандомизации [31, 70], который использует спектральную плотность (см. уравнение (6)) модели вариограммы для аппроксимации винеровского процесса в пространстве Фурье с помощью следующей формулы:

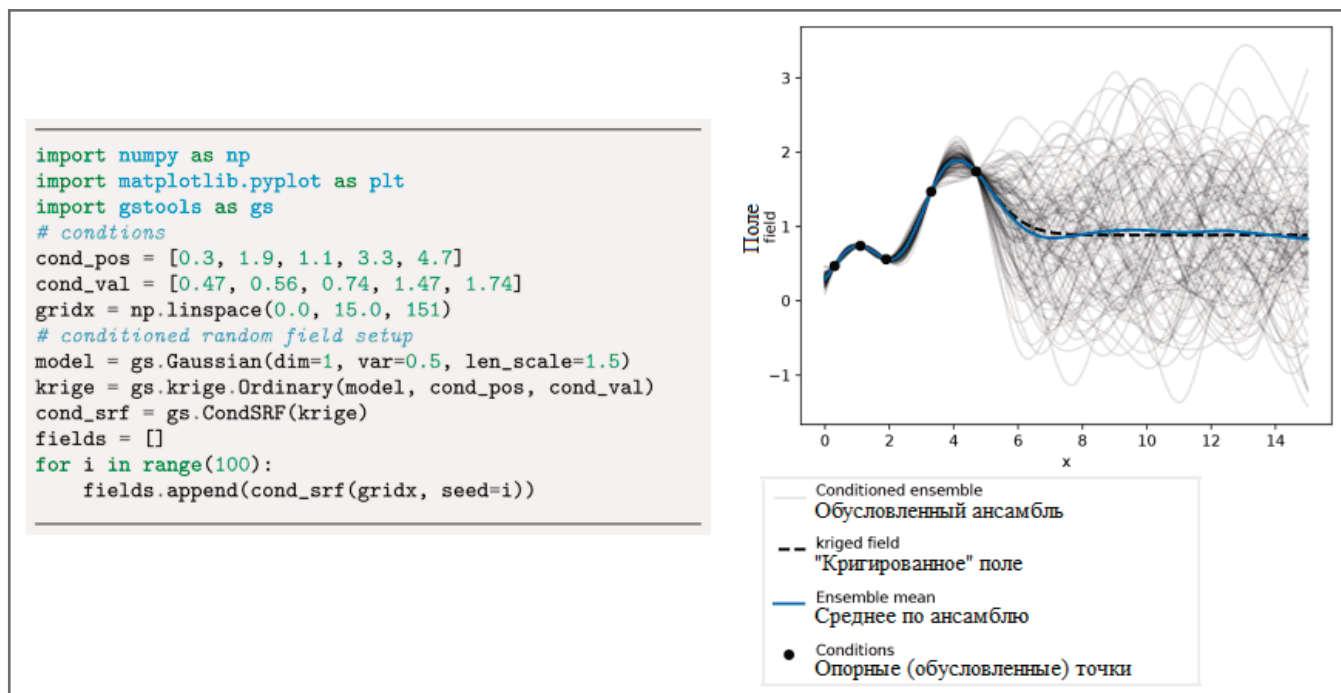


Рис. 14. Пример ансамбля одномерных случайных полей, обусловленных пятью результатами измерений (пятью опорными, или обусловленными, точками). Команды для построения графиков опущены [1]

$$U(x) = \sqrt{\frac{\sigma^2}{N}} \cdot \sum_{i=1}^N (Z_{1,i} \cdot \cos(k_i \cdot x) + Z_{2,i} \cdot \sin(k_i \cdot x)), \quad (25)$$

где N – число учитываемых суммируемых членов (мод) ряда Фурье при аппроксимации; $Z_{1,i}$, $Z_{2,i}$ – взаимно независимые случайные величины, взятые из стандартного нормального распределения; k_i – взаимно независимые случайные выборки, которые извлекаются из спектральной плотности с помощью модуля емее пакета Python для генерации выборки методами Монте-Карло по схеме марковских цепей [72].

Метод рандомизации используется по умолчанию в классе RandMeth. Подпрограммы RandMeth создают изотропные случайные поля. Соответствующая ковариация является радиально симметричной, и спектральная плотность может быть вычислена с помощью преобразования Ханкеля. Анизотропия реализуется путем масштабирования и поворота входных точек. Выполняемые процедуры позволяют пользователям генерировать случайное поле только на основе заданной функции корреляции, ковариации или вариограммы.

Ключевым преимуществом применения метода рандомизации является возможность беспрепятственного расширения сгенерированного пространственного случайного поля, которое при этом сохраняет не только свои статистические свойства, но и свою фактическую реализацию.

Мюллер и др. [1] перечисляют следующие потенциальные области использования метода рандомизации.

1. Моделирование частиц, при котором случайные несжимаемые поля скоростей могут генерироваться точно в местах расположения отдельных частиц (что будет подробнее рассмотрено в статье позже). Это позволяет избежать ошибок интерполяции, возникающих из-за полей скоростей на основе сетки.

2. Если шлейфы (поля) концентраций моделируются в большой области, пространственное случайное поле может быть рассчитано по запросу только для зависящей от времени пространственной протяженности шлейфа.

3. Для высокопроизводительных вычислительных приложений генерация полей может быть напрямую связана с применением метода декомпозиции (разложения) всей исследуемой области на подобласти, в результате чего для каждой подобласти отдельно решается своя задача генерации пространственного случайного поля.

Мюллер и др. [1] называют также два основных класса методов, альтернативных методу рандомизации [31].

1. Разложив ковариационную функцию, можно очень быстро вычислить небольшие пространственные случайные поля. Но по мере увеличения размера поля вычислительные затраты быстро становятся неосуществимыми.

2. Довольно популярным является метод последовательного гауссова моделирования, с помощью которого также могут создаваться обусловленные пространственные случайные поля. Однако могут возникнуть численные проблемы, если лежащая в основе корреляционная функция является гладкой в начале координат. Кроме того, вычислительные затраты также становятся нецелесообразными или даже неподъемными для случайных полей с высоким разрешением [73].

Так же как и подпрограммы кригинга, генератор пространственных случайных полей класса SRF позволяет включать predetermined тренды, нормализаторы и средние значения для большего разнообразия распределений. Особенностью этого класса является возможность выполнять масштабирование дисперсии для учета генерации случайных полей в ячейках сетки с определенным объемом. Таким образом, используется метод увеличения «зернистости» (уменьшения детализации описания при увеличении масштаба моделирования) [74], чтобы изменить масштаб дисперсии в уравнении (25) по каждой целевой точке на основе заданного размера фильтра λ :

$$\sigma^2(\lambda) = \sigma^2 \cdot \left(\frac{\ell^2}{\ell^2 + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2} \right)^{d/2}, \quad (26)$$

где ℓ – длина корреляции; $\lambda = \sqrt[3]{V}$ –

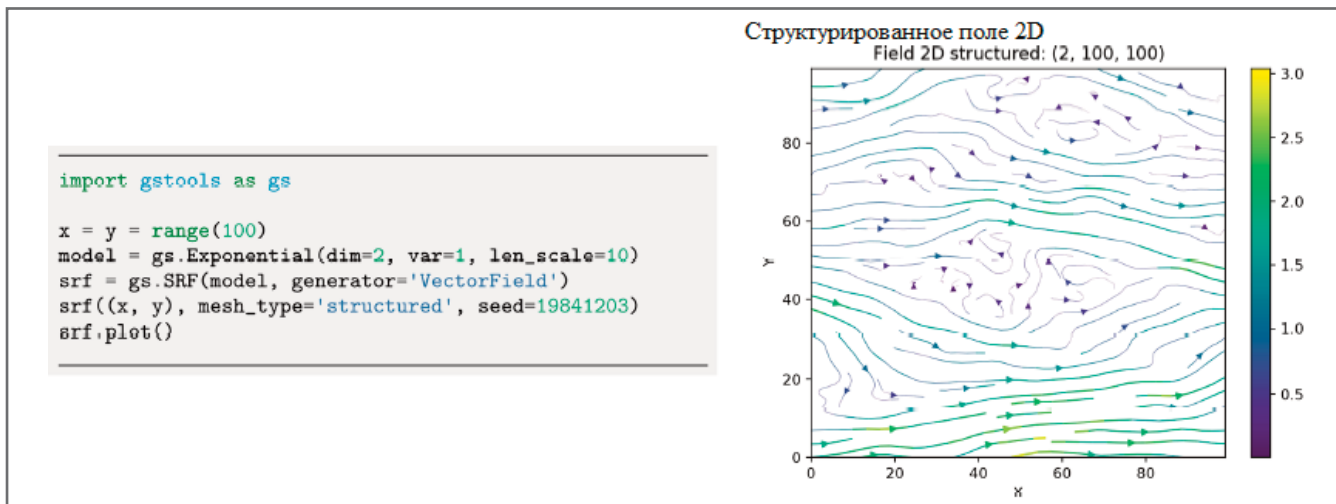


Рис. 15. Генерация структурированного несжимаемого случайного векторного поля с помощью экспоненциальной вариограммы [1]

размер фильтра, получаемый из объема ячейки V в зависимости от размера поля, если ячейка принята в виде гиперкуба.

Этот подход был выведен из уравнения потока грунтовых вод с принятием гауссовой ковариационной модели, поэтому для отличающихся сценариев его следует использовать с осторожностью. Пример будет приведен в данном обзоре позднее.

Обусловленные случайные поля ▶

Мюллер и др. [1] указывают, что при наличии результатов точечных измерений целевой переменной их необходимо учитывать при создании случайных полей. Пакет программ GSTools предоставляет класс CondSRF, объединяющий кригинг и генерацию случайного поля, где сначала получается «кригированное» поле и дисперсия ошибок, а затем генерируется случайное поле с нулевым средним значением, где дисперсия в уравнении (25) заменяется на оцененную дисперсию ошибок. Эта процедура имеет преимущество перед классическим последовательным гауссовым моделированием [47], поскольку:

- 1) для генерации одного случайного поля используется метод рандомизации;
- 2) задачу кригинга нужно решить только один раз, а не последовательно.

На рисунке 14 показан пример ансамбля обусловленных случайных полей в одномерной задаче. Там, где доступны измерения целевых переменных, все реализации удовлетворяют им. Однако случайные поля ведут себя как необусловленные поля (то есть как ансамбль с идентичными параметрами, такими как среднее значение, диспер-

сия и длина корреляции), для которых нет доступных результатов точечных измерений ($x > 6$). Такие характеристики, как дисперсия ансамбля, значительно изменяются с учетом распределения результатов измерений и заданных условий. Среднее по ансамблю и поле кригинга совпадают. Это доказывает, что поле кригинга является наилучшим линейным несмещенным предиктором для заданных данных.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ ▶

Генерация несжимаемого векторного случайного поля ▶

Первым, кто предложил метод рандомизации для изучения диффузии одиночных частиц в несжимаемом случайном поле скоростей, был Крайчман [71]. Он придумал метод рандомизации, который включает в себя проектор (линейный оператор p , действующий в линейном пространстве, или оператор проецирования), обеспечивающий несжимаемость векторного поля.

Как показывают Мюллер и др. [1], используя метод рандомизации (см. формулу (25)) и добавляя проектор $p(k_i)$ к каждому суммируемому члену (моде) ряда, можно получить:

$$u(x) = \bar{U} e_1 - \sqrt{\frac{\sigma^2}{N}} \sum_{i=1}^N p(k_i) \cdot (Z_{1,i} \cos(k_i \cdot x) + Z_{2,i} \sin(k_i \cdot x)); \quad (27)$$

$$p(k_i) = e_1 - \frac{k_{i1}}{|k_i|^2} \cdot k_i, \quad (28)$$

если $\bar{U}$ – средняя скорость (ориентированная на первый базисный вектор e_1), вокруг $\bar{U}$ генерируются случайные

флуктуации с помощью заданной флуктуационной модели и в тоже время гарантируется, что после скоростей остается несжимаемым, то есть выполняется условие $\nabla \cdot U = 0$.

На рисунке 15 представлен пример генерации структурированного несжимаемого случайного векторного поля с помощью экспоненциальной вариограммы.

Такие особенности, как граничные условия, не могут быть смоделированы с помощью указанного метода, но его можно использовать, например, при моделировании движений в массиве водонасыщенного грунта [75] или для изучения турбулентности открытой воды [71].

Преобразования полей ▶

Мюллер и др. [1] напоминают, что GSTools генерирует гауссовы случайные поля, в то время как реальные данные часто не соответствуют распределению Гаусса. Обычно эта проблема разрешается с помощью трансформации данных. Пакет GSTools обеспечивает выполнение ряда соответствующих преобразований (помимо степенных с помощью подмодуля нормализатора, о котором говорилось ранее), таких как:

- 1) binary (бинарное);
- 2) discrete (дискретное);
- 3) boxcox (Бокса – Кокса) [65];
- 4) zinnharvey (Зинна – Харви) [76];
- 5) normal_force_moments (моментов нормальных сил);
- 6) normal_to_lognormal (от нормального до логнормального);
- 7) normal_to_uniform (от нормального до равномерного);
- 8) normal_to_arcsin (от нормального до арксинусного);

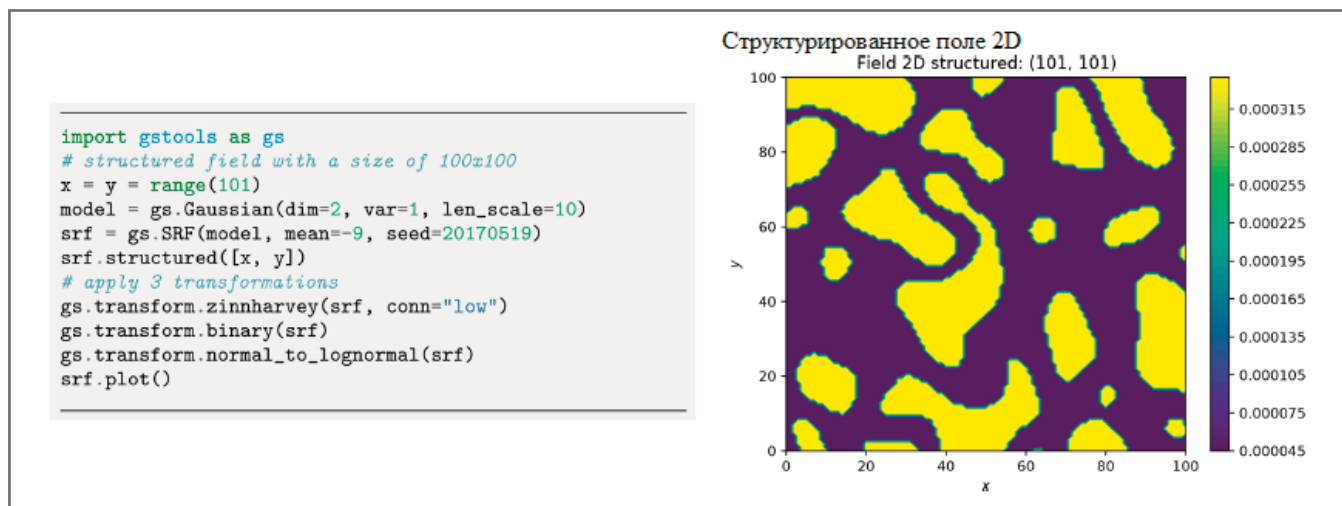


Рис. 16. Пример логарифмически преобразованного бинарного поля с низкими значениями, которые соединяются путем последовательного применения преобразований zinnharvey (Зинна – Харви), binary (бинарного) и lognormal (логнормального) [1]

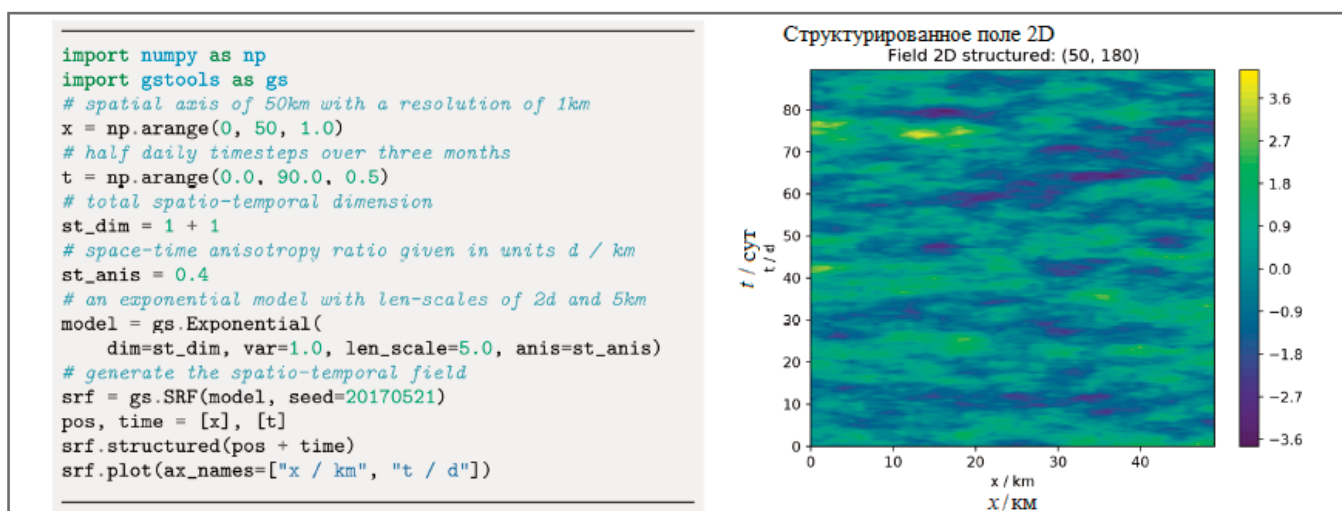


Рис. 17. Пример рабочего процесса генерации пространственно-временного случайного поля с одним пространственным измерением [1]

9) normal_to_uquad (от нормального до U-квадратичного).

Для создания более сложных сценариев можно последовательно комбинировать разные преобразования (пример показан на рисунке 16). Здесь Мюллер и др. [1] обращают внимание на то, что (в отличие от работы нормализаторов) преобразования не могут быть адаптированы к заданным данным, поэтому выбор самого подходящего из них остается за пользователем.

Пространственно-временное моделирование ►

Как указывают Мюллер и др. [1], пространственно-временное моделирование позволяет получить представление о зависящих от времени вероятностных процессах, таких, например, как температура воздуха, атмосферные осадки и соответствующая консолидация грунта, что имеет боль-

шое практическое значение. Пакет GSTools предоставляет метрическую пространственно-временную модель [77] для всех ковариационных моделей, дополняя пространственные измерения временным измерением, что приводит к корреляционной модели следующего вида:

$$C_m(r, \Delta t) = C \left(\sqrt{\sum_{i=1}^d \left(\frac{r_i}{e_i} \right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{\kappa} \right)^2} \right) = C(\sqrt{\tilde{r}^2 + \Delta \tilde{t}^2}), \quad (29)$$

где $\tilde{r}$ – изотропизированное пространственное расстояние, определенное уравнением (7), $\Delta \tilde{t}$ – временное расстояние (интервал времени); $\Delta \tilde{t}$ – изотропизированное временное расстояние (изотропизированный интервал времени); κ – параметр, который учитывает коэффициент пространственно-временной анизотропии и является последней записью массива anis, добав-

ленной к соотношениям пространственной анизотропии.

Реализация этого в программном пакете GSTools позволяет напрямую включать пространственную анизотропию и вращение в пространственно-временную модель. GSTools также поддерживает использование произвольных пространственных измерений в пространственно-временных моделях. На рисунке 17 представлен пример генерации пространственно-временного случайного поля с одним пространственным измерением.

Работа с сетками ►

Чтобы улучшить обработку пространственных случайных полей в качестве входных данных, для решателей моделей на основе уравнений в частных производных (Partial Differential Equations, PDE), таких как метод конечных элементов, GSTools предоставляет ин-

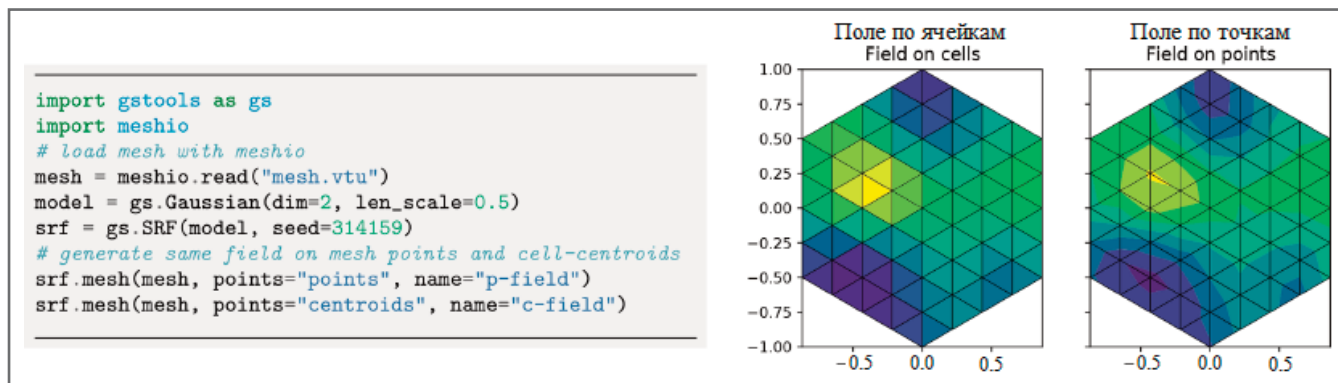


Рис. 18. Генерация пространственных случайных полей на сетках конечных элементов по центроидам ячеек (левое изображение) или по точкам сетки (правое изображение). Команды построения изображений опущены [1]

терфейсы для ряда других пакетов программ, таких как meshio [78], PyVista [79] и ogs5py [80]. При использовании meshio или PyVista сгенерированные поля будут немедленно сохранены в содержимом соответствующих сеток. Имеется два варианта создания поля в заданной сетке: либо по точкам (points=»points»), либо по центроидам ячеек (points=»centroids»), что важно в зависимости от спецификации переменной в численном алгоритме (математической модели). Пример приведен на рисунке 18.

О КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ГЕОСТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ PYTHON ►

GSTools является частью целого набора программных пакетов в системе GeoStat (GeoStat Framework). Они образуют комплексную платформу для геостатистического моделирования на основе языка программирования Python и доступны на сайте веб-сервиса GitHub по адресу github.com/Geostat-Framework. В своей работе [1] Мюллер с соавторами кратко рассказывают о некоторых из этих пакетов и о том, как они взаимодействуют с GSTools, расширяя и усиливая его возможности.

Пакет ogs5py ►

Программный пакет ogs5py [80] предоставляет API (Application Programming Interface – интерфейс, обеспечивающий взаимодействие программных приложений) на основе Python для конечноэлементного пакета OpenGeoSys 5. Последний используется для научного моделирования гидрогеологических процессов, таких как фильтрационные потоки подземных вод, где типичной проблемой является нехватка данных [81]. Примерами могут служить

точечные измерения гидравлического напора в наблюдательных скважинах и кривые, построенные по результатам экспериментов с фильтрацией меченой воды для трассировки ее движения. Для определения коэффициента фильтрации K (коэффициента водопроницаемости K) на основе этих данных требуется система моделирования со стохастической генерацией полей на основе статистических параметров. Комбинированное использование GSTools и ogs5py позволяет пользователю интегрировать геостатистическое моделирование водоносного горизонта с гидрогеологическим моделированием. Пример моделирования испытаний методом опытной откачки подземных вод из скважины будет приведен позже.

Пакеты welltestpy и AnaFlow ►

Для установления характеристик водоносных горизонтов гидрогеологи обычно используют экономичные испытания методом откачки. Программный пакет welltestpy [82] предоставляет инструменты для обработки, построения графиков и анализа результатов испытаний на откачку. Это помогает практикам определять гидрогеологические параметры путем подбора концептуальной гидродинамической модели к опытным данным. Ряд примеров, иллюстрирующих эти возможности, также приведен в welltestpy.

Пакет AnaFlow [54] предоставляет широкий спектр аналитических формул для испытаний на откачку в различных условиях. Классическими примерами являются решения Тима (Thiem) и Тайса (Theis), в которых принимаются однородные свойства водоносного горизонта. Кроме того, AnaFlow предоставляет расширенные версии обоих этих решений, которые учитывают неоднородность водоносного горизонта и позволяют оценивать геостатистические

параметры более высокого порядка, такие как дисперсия и длина корреляции [83, 84].

Пакет PyKrige ►

GSTools предоставляет интерфейс для автономного пакета PyKrige [85] с более специализированными приложениями для выполнения кригинга. После 10 лет независимого развития PyKrige был перенесен в набор программных средств в системе GeoStat Framework, и теперь его функциональность интегрирована с функциональностью других пакетов данного набора. Пока эти пакеты могут обмениваться между собой ковариационными моделями, но в будущем PyKrige станет инструментом кригинга, включая усовершенствованные методы, для всей платформы GeoStat Framework.

Разработка, хранение, поиск и установка ►

Пакет GSTools v1.3 совместим со всеми версиями Python начиная с v3.6, хотя предыдущие версии GSTools совместимы с более старыми версиями Python. Критически важные для производительности части, такие как оценка вариограммы, кригинг и рандомизация (описанные в данной статье ранее), реализованы на основе языка программирования Cython, который упрощает написание модулей кода C/C++ для Python, расширяя возможности последнего (код Cython преобразуется в код C/C++ для последующей компиляции и впоследствии может использоваться как расширение стандартного Python или как независимое приложение со встроенной библиотекой выполнения Cython) [86].

GSTools в основном зависит от среды SciPy – библиотеки Python с открытым исходным кодом, позволяющей управлять данными и визуализировать их с

```
# load data
ids, lat, lon, temp = np.loadtxt(
    os.path.join(".", "data", "temp_obs.txt")).T
# estimate lat-lon variogram
bins = gs.standard_bins(
    (lat, lon), max_dist=np.deg2rad(8), latlon=True)
bin_c, vario = gs.vario_estimate(
    (lat, lon), temp, bin_edges=bins, latlon=True)
# fit geographical model (no nugget)
mod = gs.Spherical(latlon=True, rescale=gs.EARTH_RADIUS)
mod.fit_variogram(bin_c, vario, nugget=False)
# plot yadrenko variogram and estimated variogram
ax = mod.plot("vario_yadrenko", x_max=max(bin_c))
ax.scatter(bin_c, vario)
```

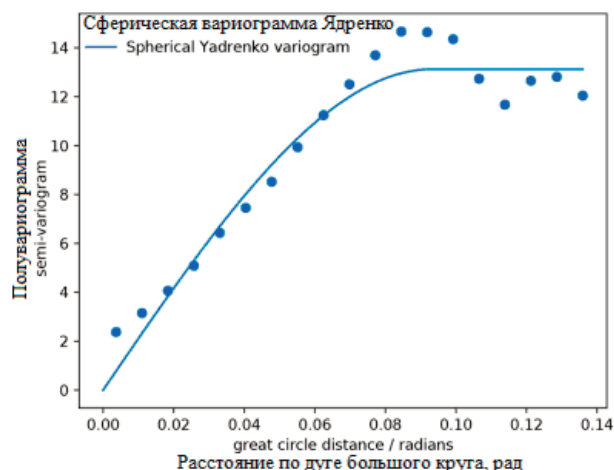


Рис. 19. Оценка вариограммы температуры с использованием сферической ковариационной модели в варианте Ядренко. Масштаб исследованных расстояний составил примерно 0,9 (в радианах), а порог – около 13 [1]

```
# user defined linear drift function
def north_south_drift(la, lo):
    """Return latitude for north-south drift."""
    return la

uk = gs.krige.Universal(
    model=mod,
    cond_pos=(lat, lon),
    cond_val=temp,
    drift_functions=north_south_drift)
```

Рис. 20. Настройка универсального кригинга с использованием функции дрейфа [1]

```
from scipy import stats
# fit linear regression model for latitude-temperature
reg = stats.linregress(lat, temp)
trend = lambda la, lo: reg.intercept + reg.slope * la

dk = gs.krige.Detrended(
    model=mod,
    cond_pos=(lat, lon),
    cond_val=temp,
    trend=trend)
```

Рис. 21. Настройка регрессионного кригинга с использованием модели линейной регрессии [1]

помощью высокоуровневых команд и предназначенной для решения научных и математических задач. Библиотека SciPy построена на базе NumPy (также библиотеки Python) [87, 88].

Для оптимизации усилий проектной команды используется GitHub – веб-сервис для хранения и совместной разработки IT-проектов. Пользователи также имеют возможность общаться там с разработчиками, задавая вопросы на

дискуссионном форуме, поднимая проблемы или улучшая программы и коды с помощью отправки соответствующих запросов.

Все пакеты поставляются с подробной документацией через сайт-сервис readthedocs.org, содержащий ряд руководств, объясняющих функции программ, и полную документацию по API, созданную с использованием сервера Sphinx.

Система непрерывной интеграции обеспечивается с помощью вкладки GitHub Actions, где для обеспечения простой установки наиболее распространенных операционных систем (Windows, Linux, macOS) встроен современный формат распространения пакетов в среде Python – Python Wheel.

Каждый пакет, выпускаемый на GitHub, попадает в PyPI и conda-forge – каталоги и хранилища программного обеспечения на языке Python (pypi.org; conda-forge.org [89]), которые помогают находить и устанавливать соответствующие программы и их комплексы.

С помощью GitHub Actions автоматически и непрерывно выполняется обширный набор модульных тестов.

Совместимость программного обеспечения ►

Чтобы интегрировать GStools в набор пакетов в среде Python, полезных для научных дисциплин (в так называемый научный стек пайтон – Scientific Python Stack), разработчики GStools [1] обеспечили набор интерфейсов для взаимодействия с другими пакетами, такими как рассмотренные выше ogs5py, meshio, PyVista, а также pyevtk (github.com/pyscience-projects/pyevtk) для операций с сетками.

Поддерживаются и другие пакеты для геостатистики, такие как PyKrig (рассмотренный ранее) и SciKit-GStat [90]. Последний ориентирован на вариографию и может использоваться для более детальной оценки вариограмм. Для обоих этих пакетов предусмотрены интерфейсы для преобразования ковариационных моделей GStools в их аналоги в соответствующем пакете и наоборот.

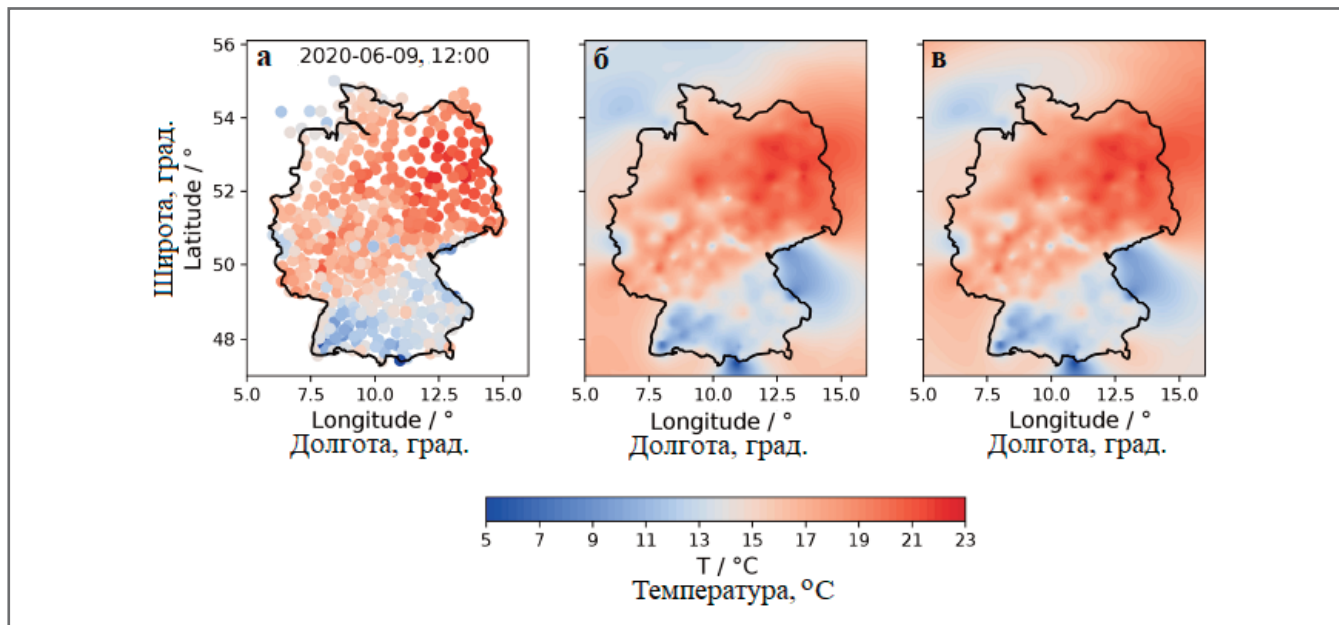


Рис. 22. Значения температуры воздуха, измеренные в метеорологических будках на высоте 2 м над поверхностью земли (а); результаты интерполяции с помощью универсального кригинга с дрейфом в меридиональном направлении с юга на север (б); результаты интерполяции с помощью регрессионного кригинга с трендом в меридиональном направлении с юга на север (в) [1]

С точки зрения Мюллера и др. [1], также стоит упомянуть о пакете *Verde* [91] – библиотеке Python для обработки и привязки пространственных данных к сетке. Некоторые из функций, предоставляемых там, могут быть легко объединены с возможностями инструментов *GStools*, такими как детрендинг (удаление тренда) входных данных при их предварительной обработке.

НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ, ИЛЛЮСТРИРУЮЩИЕ ВОЗМОЖНОСТИ *GStools* ►

Регрессионный кригинг против универсального кригинга: определение температурного тренда в меридиональном направлении ►

Кригинг – это хорошо зарекомендовавший себя метод интерполяции, применяемый во многих естественнонаучных областях. Мюллер и др. [1] сравнивают два варианта включения вспомогательных переменных для вычисления весов кригинга:

1) с помощью регрессионного кригинга (РК), где тренд входных данных оценивается с помощью регрессии, а к остаткам (*residuals* – разностям между входными данными и модельными значениями) применяется простой кригинг;

2) с помощью универсального кригинга (УК), где в качестве внутреннего дрейфа используется модель тренда.

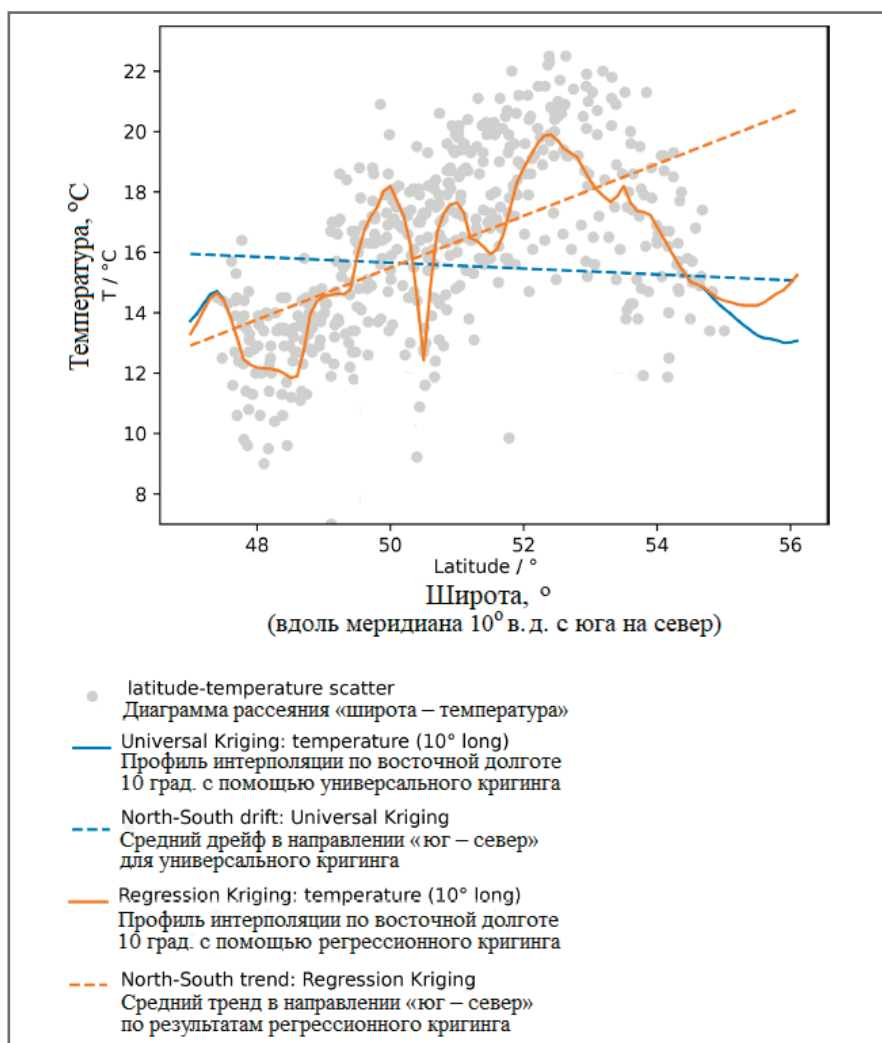


Рис. 23. Диаграмма рассеяния «широта – температура» вдоль восточной долготы 10 град.; средний тренд в направлении «юг – север» для регрессионного кригинга; средний дрейф в направлении «юг – север» для универсального кригинга; профили (сечения) соответствующих интерполяций по восточной долготе 10 град. с помощью регрессионного и универсального кригинга [1]

```

model = OGS(task_root=task_root, task_id="model")
# generate a rectangular 2D mesh (x-z cross section):
# x in [-1,9] (dx=0.025m) & z in [-5,-1] (dz=0.1m)
model.msh.generate(
    "rectangular",
    dim=2,
    mesh_origin=[-1, -5],
    element_no=[400, 40],
    element_size=[0.025, 0.1],
)
# create a x-z mesh by swapping y and z axis
model.msh.swap_axis("y", "z")

```

Рис. 24. Инициализация модели движения подземных вод с помощью класса OGS пакета ogs5py, начатая с генерации простой сетки [1]

```

# set the connectivity for Zinn&Harvey
connectivity = ["mean", "low", "high"]
# rescaling correlation length for zinn&harvey
length_scales = [1, 1.67, 1.67]
seed = gs.random.MasterRNG(0)
# iterate over connectivity types
for conn, len_scale in zip(connectivity, length_scales):
    # create the transmissivity field
    cov_model = gs.Gaussian(
        dim=2, var=2, len_scale=len_scale, anis=0.5)
    srf = gs.SRF(
        model=cov_model, mean=np.log(1e-3), seed=seed())
    # 2d spatial random field in x-z direction
    srf.mesh(model.msh, direction="xz")
    # apply Zinn&Harvey transformation
    if conn != "mean":
        gs.transform.zinnharvey(srf, conn=conn)
    # transform to log-normal
    gs.transform.normal_to_lognormal(srf)

```

Рис. 25. Генерация коррелированных логарифмически нормальных пространственных случайных полей (в классе SRF пакета GStools), адаптированных к настройкам сетки численной модели для трех структур связности после преобразования Зинна – Харви [76] [1]

Эти методы различаются по использованию ковариационной модели. Линейный РК не включает информацию о пространственной корреляции, в то время как УК для вычисления весов кригинга использует функцию дрейфа. Часто считается, что оба метода дают математически равные результаты, но Мюллер и др. [1, 92] показывают, что между ними есть ощутимые различия.

В качестве базы данных для исследования на предмет линейного тренда в меридиональном направлении Мюллер и др. [1] использовали значения температуры, измеренные Немецкой метеорологической службой и взятые из та-

кой библиотеки метеорологических служб на основе языка Python, как пакет Wetterdienst [93]. Они применяли устоявшуюся сферическую ковариационную модель в варианте Ядренко, подходящем для географических координат. Оценка вариограммы и результаты подбора модели показаны на рисунке 19.

На рисунках 20 и 21 показаны настройки таких оценщиков, как универсальный кригинг (включая функцию дрейфа) и регрессионный кригинг соответственно. РК требует предшествующего этапа удаления тренда (с помощью подбора регрессионной модели к дан-

ным и вычисления разницы между наблюдаемыми и модельными значениями). Результаты интерполяции, показанные на рисунке 22, указывают на то, что оба метода дают одинаково хорошие результаты.

На рисунке 23 представлены оцененные средние тренды как для универсального, так и для регрессионного кригинга. Видно, что они являются совершенно разными. Результаты регрессионного кригинга указывают на рост средней температуры с увеличением широты, что кажется правдоподобным, учитывая понижение уровня земли от Альп на юге к Балтийскому морю на севере. Результаты же универсального кригинга показывают обратное: температура уменьшается с увеличением широты. Потенциальным объяснением здесь является общее снижение температуры при удалении от экватора. В то время как средний тренд для УК лучше соответствует профилю (сечению) по долготе 10° (см. рис. 23), средний тренд для РК лучше соответствует диаграмме рассеяния (как и ожидалось).

Моделирование фильтрации подземных вод в неоднородном водоносном горизонте ►

Мюллер и др. [1] указывают, что комбинация программных пакетов ogs5py и GStools позволяет быстро настраивать и проводить моделирование движения подземных вод в неоднородном водоносном горизонте. Критическим этапом здесь является генерация пространственного распределения проницаемости грунта T (водопроводимости, коэффициента водопроводимости T), адаптированного к сетке для численного моделирования.

Далее Мюллер и др. [1] демонстрируют способность GStools генерировать различные структуры взаимодействия и обсуждают их влияние на результаты моделирования на основе базы данных Мюллера и Зеха [94].

Модель движения подземных вод инициализируется с помощью класса OGS пакета ogs5py путем генерации простой сетки (рис. 24) и задания параметров модели и граничных условий. Пространственные случайные поля инициализируются с помощью генератора класса SRF пакета GStools (рис. 25). Путем передачи подкласса model.msh, передаются детали сетки для генерации распределения значений в определенных местах сетки (даже для неструктурированных сеток). Подпрограмма transform.zinnharvey позволяет

генерировать гауссовы системы, в которых средние значения поля не связаны, а области с низкой или высокой водопроницаемостью связаны, используя преобразование Зинна – Харви [76]. Здесь Мюллер и др. [1] обращают внимание на то, что длины корреляции перемасштабируются [95].

Смоделированные «шлейфы» движения подземных вод, помеченных трассирующим индикатором (рис. 26), показывают особые эффекты связности. «Шлейф» остается относительно компактным для классических гауссовых полей, где средние значения связаны. Преобразованные поля приводят к гораздо менее компактным и даже прерывистым динамическим шлейфам, что в основном вызвано торможением или прерыванием фильтрационных потоков подземных вод в связанных областях с низким коэффициентом фильтрации K (коэффициентом водопроницаемости K) и преимущественными потоками в связанных областях с высокой водопроницаемостью.

Моделирование опытной откачки ►

Объединение моделей потоков подземных вод, полученных в пакете программ ogs5ru, со случайными полями, сгенерированными в пакете GSTools, позволяет проводить исследования методом Монте-Карло для оценки их среднего поведения в массиве. Зех и др. [84, 96] использовали такой рабочий процесс, чтобы доказать его применимость для моделирования опытных откачек из скважин при случайных значениях проводимости грунта T . В предложенном ими варианте модель фильтрации подземных вод инициализируется с помощью класса OGS пакета ogs5ru с настройкой параметров модели и граничных условий для генерации сходящегося к скважине фильтрационного потока при откачке. Формирование сетки и шаг по времени могут быть специально адаптированы к условиям неравномерного движения потока. Ансамбли гетерогенных полей проводимости генерируются с помощью класса SRF пакета GSTools, где воспроизводимость контролируется начальным (затравочным) значением и где нормальные поля преобразуются на месте с помощью класса normalizer.LogNormal пакета GSTools (рис. 27).

Использование метода рандомизации (рассмотренного ранее) позволяет адаптировать случайные поля к нерегулярной сетке. Соответствующее уве-

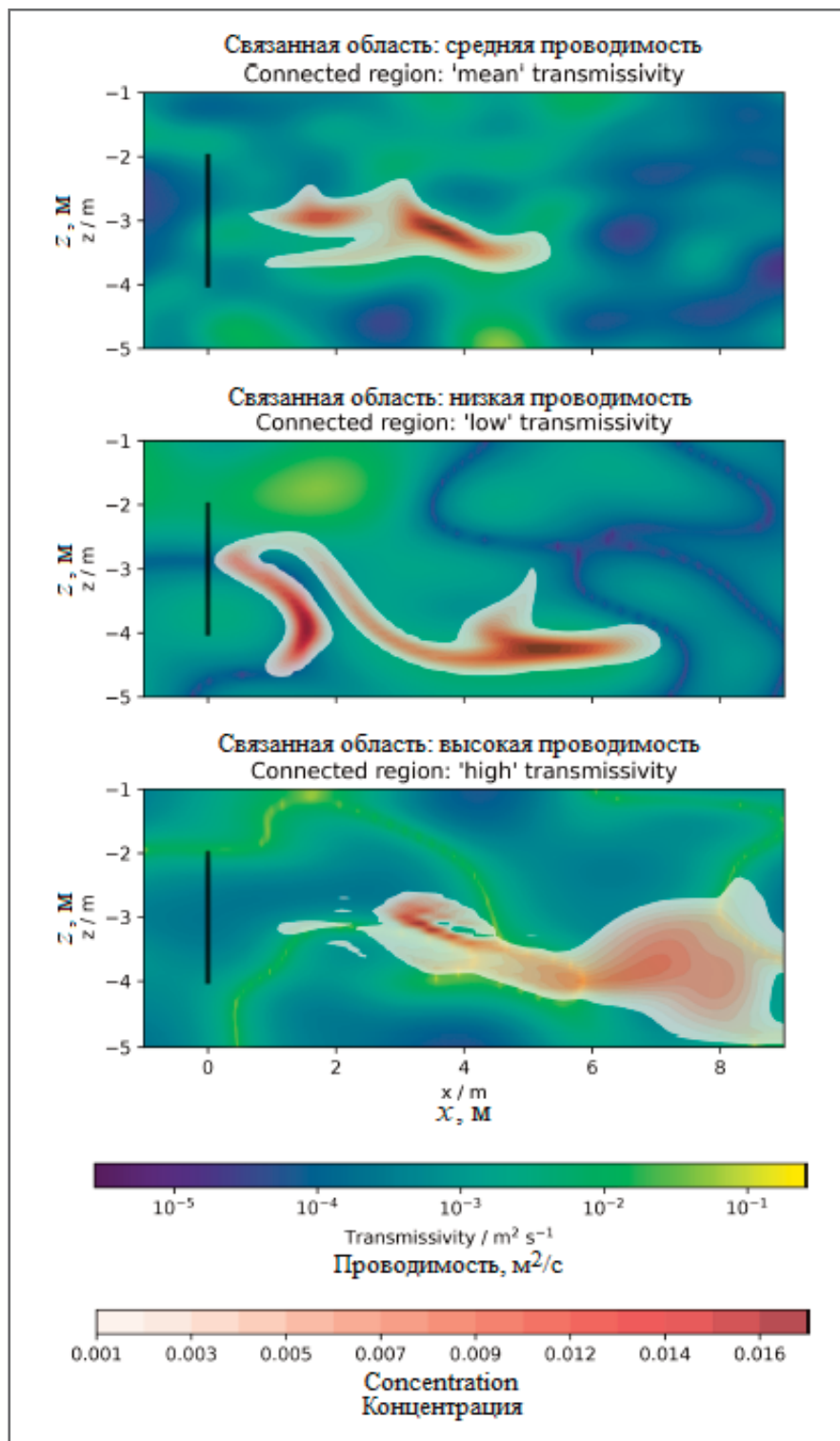


Рис. 26. Результаты моделирования «шлейфов» движения подземных вод, помеченных трассирующим индикатором: пространственно-распределенные «шлейфы» концентрации через 15 суток с распределением проводимости T на заднем плане [1]

личение масштаба дисперсии выполняется методом увеличения «зернистости» (уменьшения детализации описания при увеличении масштаба моделирования) для гауссовых вариограмм с использованием уравнения (26).

Рассчитанные средние значения для ансамбля можно сравнить с аналитическими решениями (рис. 28), такими как решение Тейса для однородных сред

или решение по эффективному понижению уровня и притоку в скважину [84], используя их реализации в пакетах welltestpy и AnaFlow.

Геостатистические тренировочные исследования по водоносному горизонту ►

Мюллер и др. [1] демонстрируют, как оценивать вариограммы и как об-

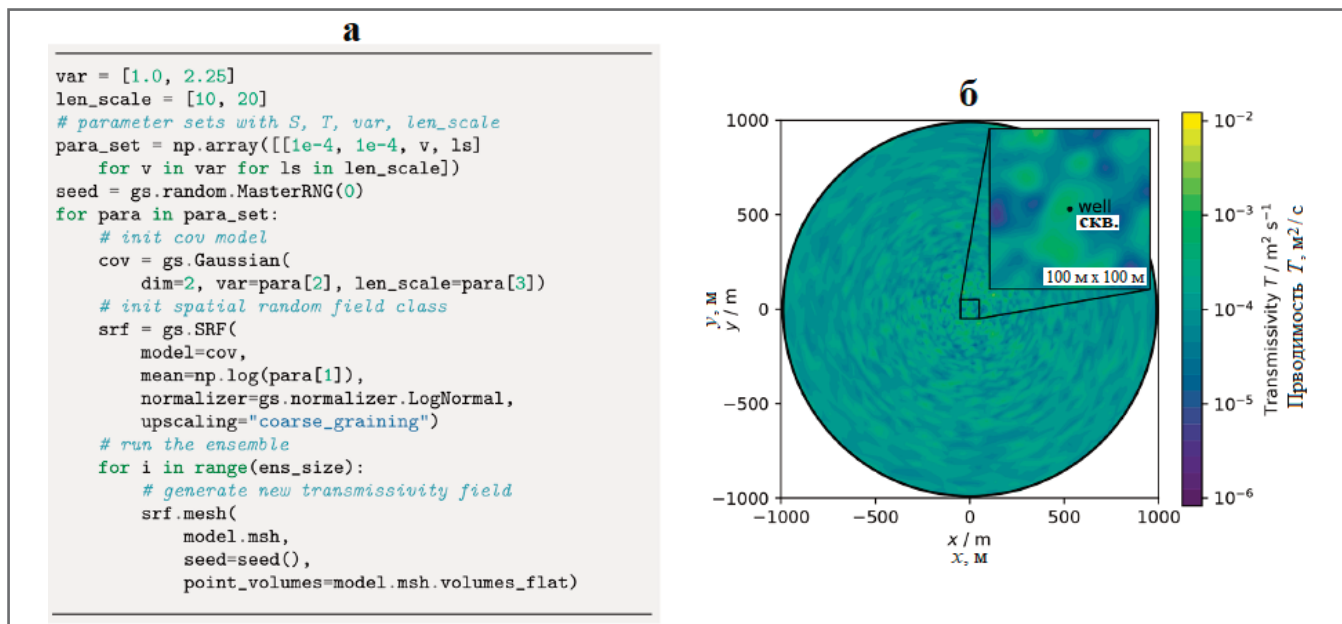


Рис. 27. Последовательность операций для генерации ансамбля полей проводимости T на заданной сетке (а) и одна из реализаций (б) [1]

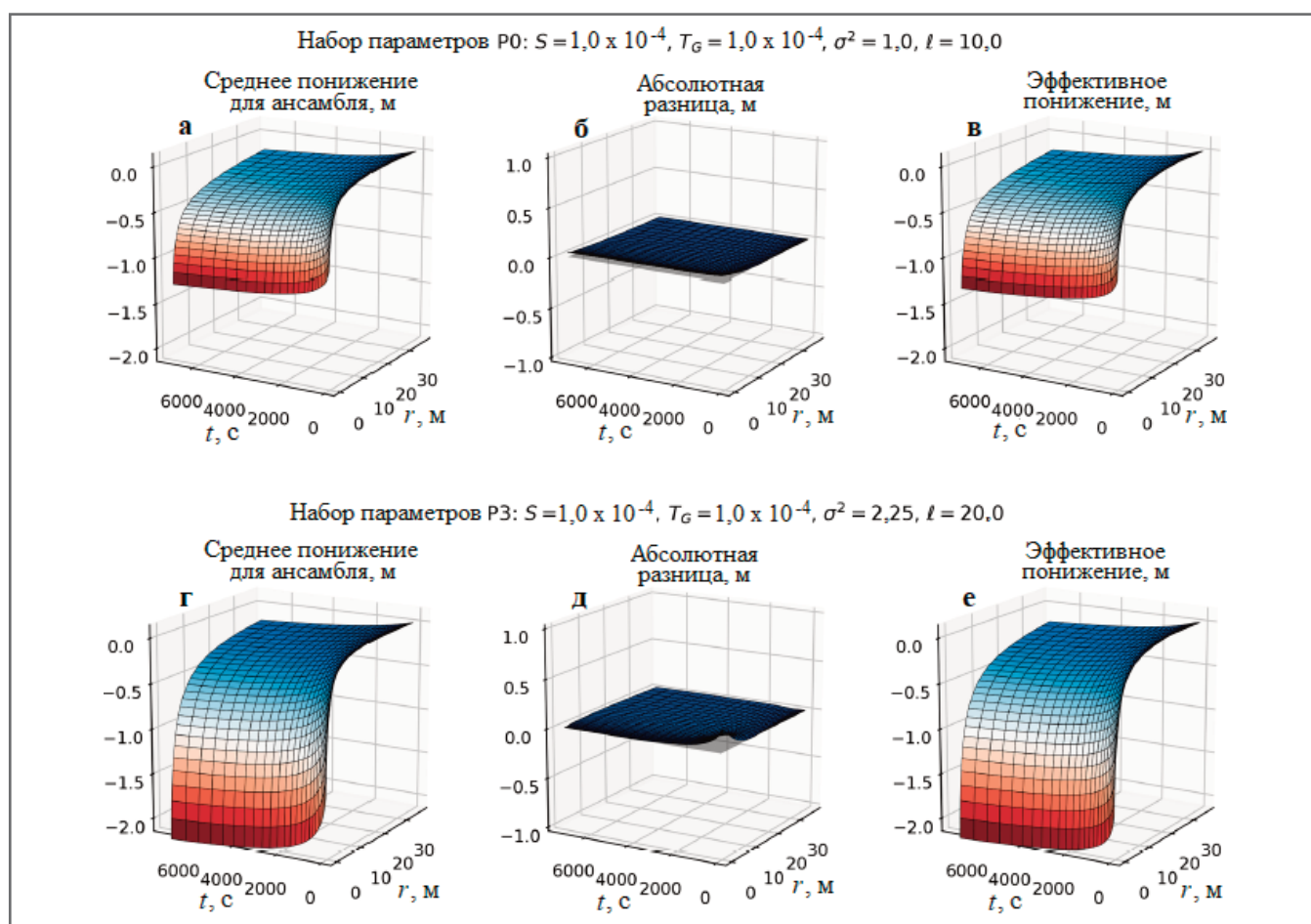


Рис. 28. Сравнение среднего понижения при откачке $h(r, t)$ (а, г) с решением по эффективному напору $h_{cc}(r, t)$ (в, е) для двух наборов параметров. Исчезающе малая абсолютная разница между ними (б, д) показывает, что они практически полностью совпадают [1]

условливать (определять) пространственные случайные поля по наблюдениям, используя данные для виртуального аналога водоносного горизонта в районе немецкого города Хертен [97]. Этот аналог был сформирован по ре-

зультатам обследования ряда обнажений гравийного карьера в долине Рейна на юге Германии. 2D-информация (включая гидравлическую, термическую и химическую) была интерполирована в набор 3D данных. Файлы

последовательности операций представлены в работе Шулера и Мюллера [11].

Определяются пространственные корреляции путем оценки вариограммы с помощью функции `gstools.variogram`. Сначала идентифицируется полная

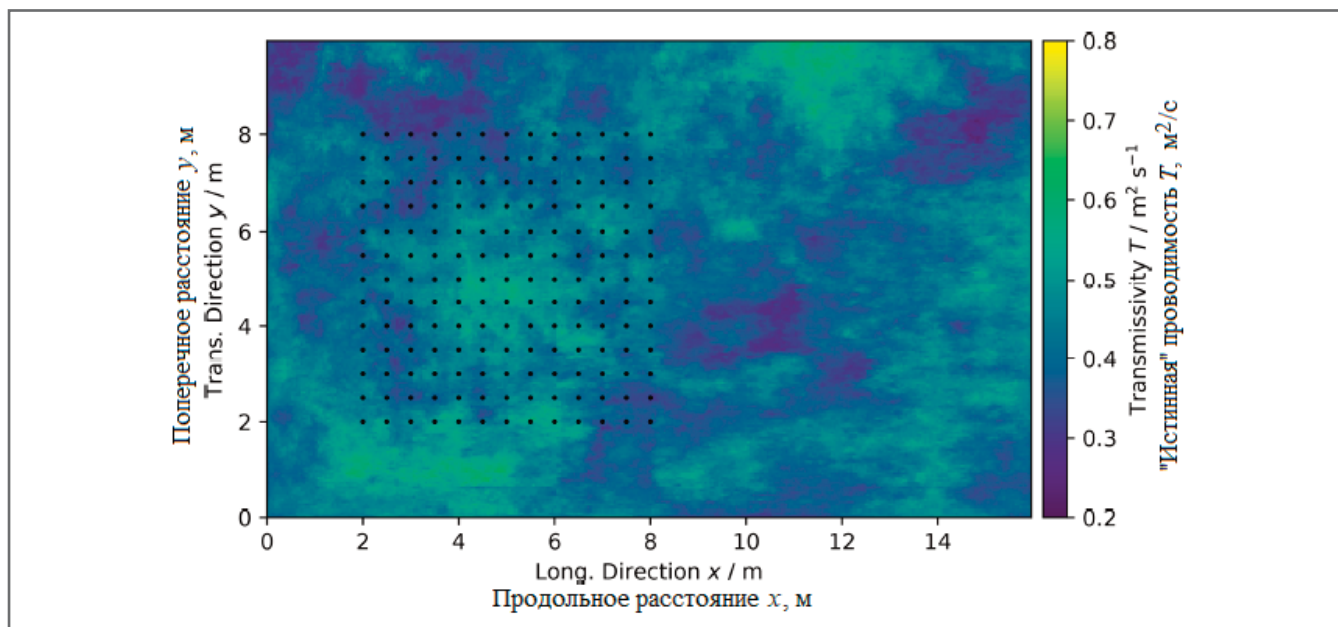


Рис. 29. Пространственное распределение проводимости T виртуального аналога водоносного горизонта города Хертен, принятое за истинное. Черные точки – места виртуальных наблюдений (опорные, или обусловленные, точки) [1]

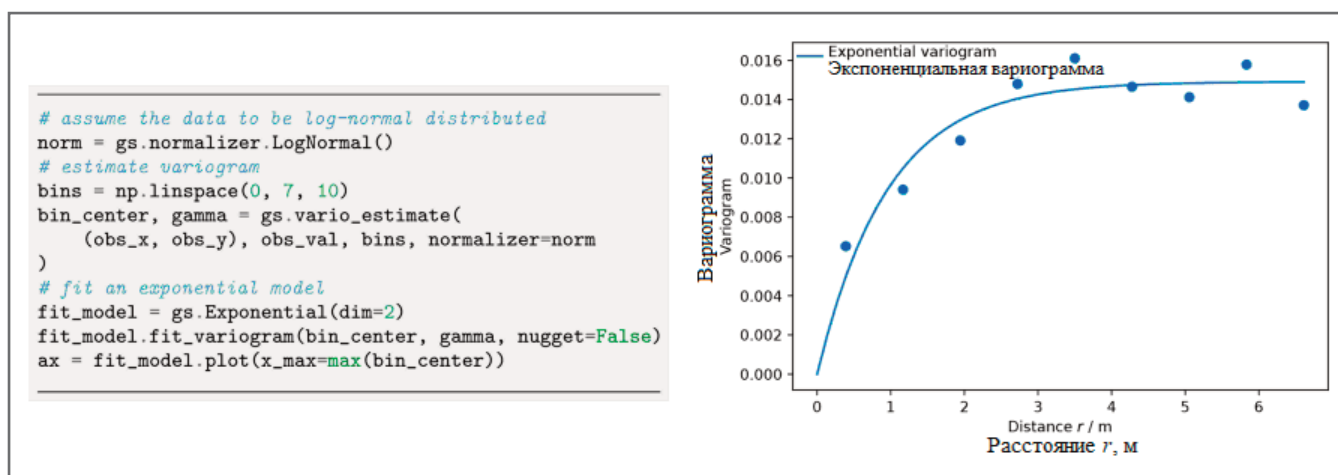


Рис. 30. Оценка вариограммы (слева), а также полученная экспериментальная (точки) и подобранная модельная (кривая) вариограммы для виртуального аналога водоносного горизонта города Хертен [1]

структура проводимости T . Данные по изучаемому аналогу водоносного горизонта приводятся в фациальной структуре (слоях грунта или их группах) с одним значением коэффициента фильтрации K на каждую фацию. Вычисляется проводимость T путем интегрирования коэффициента фильтрации K по вертикальной оси:

$$T(x, y) = \int K(x, y, z) dz. \quad (30)$$

Полученное распределение проводимости T , которое показано на рисунке 29, далее принимается за истинное.

Выбранные точки наблюдений в количестве 13×13 , расположенные по прямоугольной сетке (см. рис. 29), охватывающей подобласть площадью около 42 м^2 , используются для опре-

деления эмпирической вариограммы, показанной на рисунке 30. Затем к этим данным подбирается экспоненциальная ковариационная модель, которая с ними хорошо согласуется (с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,913$).

Далее используется экспоненциальная ковариационная модель, подобранная к эмпирической вариограмме, и ординарный кригинг (Ordinary Kriging) для создания обусловленных пространственных случайных полей в классе CondSRF. На рисунке 31 показана одна из реализаций обусловленного пространственного случайного поля проводимости T и абсолютная разница между «истинной» (см. рис. 29) и обусловленной проводимостью. Разница возрастает по мере

удаления от зоны наблюдений (то есть от опорной, или обусловленной, зоны). Эта тенденция еще лучше видна на срезе проводимости на уровне $y=4 \text{ м}$, показанном на рисунке 32. Стандартное отклонение, рассчитанное на основе 20 реализаций обусловленных пространственных случайных полей, показывает, что отклонения от обусловленного поля значительно ниже вблизи точек наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Пакет программ GStools на основе языка программирования Python предоставляет платформу для геостатистических приложений. Он похож на такие программные пакеты, как gstat на основе языка программирования **R**, или на такие автономные пакеты, как

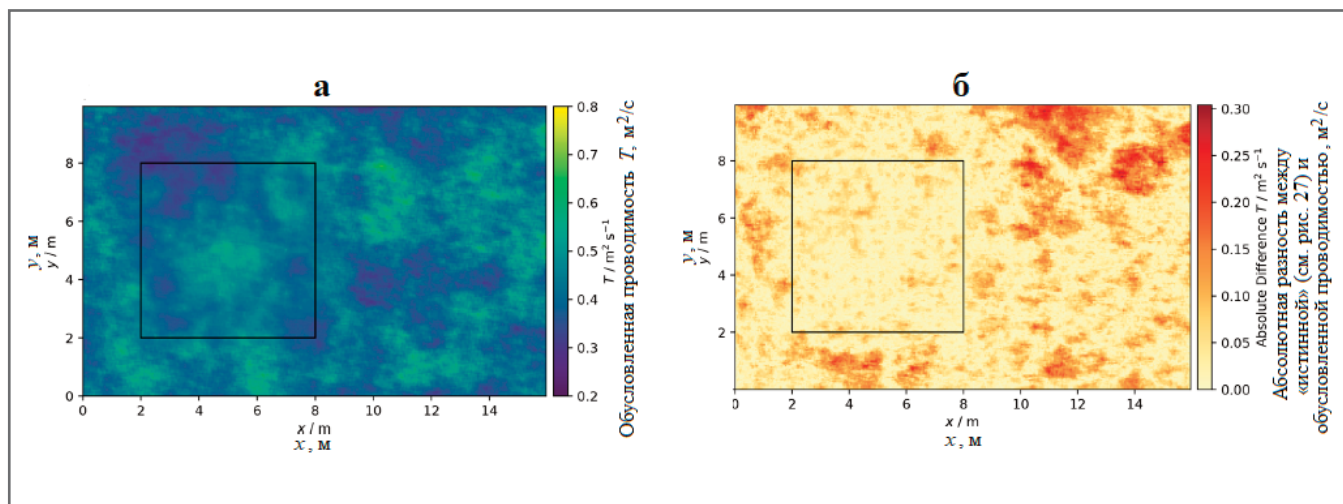


Рис. 31. Одна из реализаций обусловленного пространственного случайного поля проводимости T (а) и абсолютная разница между «истинной» (см. рис. 29) и обусловленной проводимостью, которая показывает увеличение разницы по мере удаления от обусловленной (опорной) зоны, обведенной прямоугольником (б) [1]

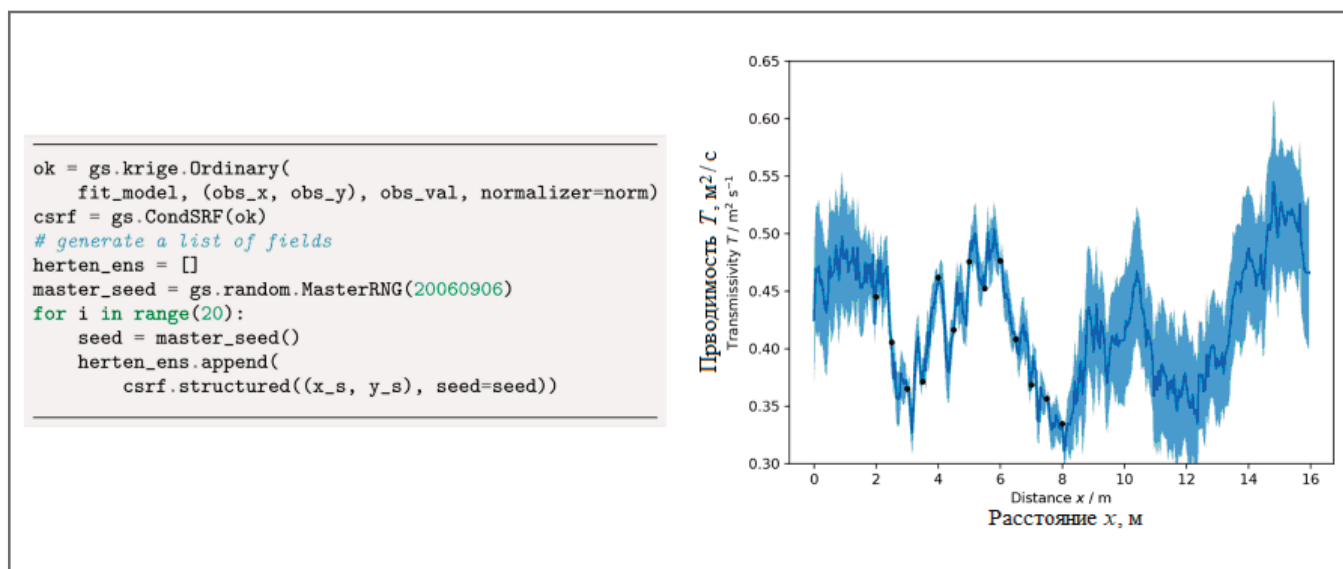


Рис. 32. Генерация ансамбля из 20 обусловленных реализаций и «срез» проводимости $T(x)$ на уровне $y=4$ м. Жирная синяя линия – «истинная» проводимость (см. рис. 29); окрашенные голубым цветом области – диапазоны в 1 стандартное отклонение, рассчитанные на основе 20 реализаций обусловленных пространственных случайных полей; черные точки – точки наблюдений (опорные, или обусловленные) [1]

TPROGS [98], GSLIB [26] и S-GeMS [99]. Однако, по мнению Мюллера и др. [1], такой всесторонний и готовый для использования геостатистический программный пакет в среде Python, как GSTools, имеет преимущества просто благодаря выбору языка программирования, который легко освоить и который широко используется в научном сообществе.

Мюллер и др. [1] подчеркивают, что отличительными особенностями GSTools являются возможность генерации в нем случайного поля и его универсальная ковариационная модель. Кроме того, он совместим и интегрирован с другими пакетами на основе Python, такими как PyKrige [85], ogsSpy [80] и Sci-

Kit-GStat [90], а также предоставляет интерфейсы для пакетов meshio [78] и PyVista [79].

Мюллер и др. [1] подсказывают, что по адресу github.com/GeoStat-Examples можно найти примеры последовательности операций для некоторых задач, которые демонстрируют возможности GSTools и могут служить отправными точками для разработки практиками своих собственных решений геостатистических проблем, с которыми они сталкиваются.

Пакет программ GSTools разрабатывался в рамках системы GeoStat по адресу github.com/GeoStat-Framework/GSTools и доступен по адресу doi.org/10.5281/zenodo.5883346 [34].

GSTools распространяется по лицензии GNU LGPL v3.0.

Документация, которая включает краткое руководство по использованию, несколько подробных руководств и полный обзор по API, доступна по адресу gstools.readthedocs.io/.

Последовательность операций (рабочие процессы) можно найти в отдельных репозиториях по адресам:

github.com/GeoStat-Examples/gstools-temperature-trend [92];

github.com/GeoStat-Examples/gstools-connectivity-and-transport [96];

github.com/GeoStat-Examples/gstools-pumping-test-ensemble [96];

github.com/GeoStat-Examples/gstools-herten-example [58].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ►

1. Muller S., Schuler L., Zech A., Hesse F. GSTools v1.3: a toolbox for geostatistical modelling in Python // *Geosci. Model Dev.* 2022. Vol. 15. P. 3161–3182. doi.org/10.5194/gmd-15-3161-2022. URL: researchgate.net/publication/355409492_GSTools_v13_A_toolbox_for_geostatistical_modelling_in_Python.
2. Krige D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand // *J. S. Afr. I. Min. Metall.* 1951. Vol. 52. P. 119–139.
3. Matheron G. *Traite de geostatistique appliquee*. Volume 1. Editions Technip, 1962. 333 p.
4. Hohn M.: *Geostatistics and Petroleum Geology, computer methods in the geosciences* (2nd edn.). Springer Netherlands, 1999. doi.org/10.1007/978-94-011-4425-4.
5. Kitanidis P. *Introduction to Geostatistics: applications in Hydrogeology* (1st edn.). Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2008. ISBN 9780521587471.
6. Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives // *Geoderma*. 1999. Vol. 89. P. 1–45. doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00078-0.
7. Cecinati F., Wani O., Rico-Ramirez M.A. Comparing approaches to deal with non-gaussianity of rainfall data in kriging-based radar-gauge rainfall merging // *Water Resour. Res.* 2017. Vol. 53. P. 8999–9018. doi.org/10.1002/2016WR020330.
8. Rossi R.E., Mulla D.J., Journel A.G., Franz E.H. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence // *Ecol. Monogr.* 1992. Vol. 62. P. 277–314. doi.org/10.2307/2937096.
9. Sales M.H., Souza C.M., Kyriakidis P.C., Roberts D.A., Vidal E. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: a case study for Rondonia, Brazil // *Ecol. Model.* 2007. Vol. 205. P. 221–230. doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.02.033.
10. Monestiez P., Petrenko A., Leredde Y., Ongari B. Geostatistical analysis of three dimensional current patterns in coastal oceanography: application to the gulf of lions (NW Mediterranean sea) // *geoENV IV – Geostatistics for environmental applications* (edited by Sanchez-Vila X., Carrera J., GomezHernandez J.J.). Dordrecht, Netherlands: Springer, 2004. P. 367–378. doi.org/10.1007/1-4020-2115-1_31.
11. Schuler L., Muller, S. GeoStat – examples/gstoolsherten-example: v1.0 // Zenodo. 2021. doi.org/10.5281/zenodo.5159658.
12. Капутин Ю.Е., Ежов А.И., Хенли С. *Геостатистика в горно-геологической практике*. 1995. 165 с. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. 188 с.
13. Поротов Г.С. *Математические методы моделирования в геологии*. СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2006. 223 с.
14. Демьянов В.В., Савельева Е.А. *Геостатистика: теория и практика* / под ред. Р.В. Арутюняна. М.: Наука, 2010. 327 с.
15. Pyrcz M.J., Deutsch C.V. *Geostatistical reservoir modeling* (2nd edn.). Oxford: Oxford University Press, 2014. ISBN 978-0199731442.
16. Rubin Y. *Applied Stochastic Hydrogeology* (1st edn.). New York: Oxford University Press, 2003. ISBN 9780195138047. doi.org/10.1093/oso/9780195138047.001.0001.
17. Diggle P., Ribeiro P.J. *Model-based Geostatistics*, Springer Series in Statistics (1st edn.). New York: Springer-Verlag, 2007. doi.org/10.1007/978-0-387-48536-2.
18. Banerjee S., Carlin B.P., Gelfand A.E. *Hierarchical modeling and analysis for spatial data* (2nd edn.). Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2014. doi.org/10.1201/b17115.
19. Zhang Y.-K., Zhang D. Forum: the state of Stochastic Hydrology // *Stoch. Env. Res. Risk A.* 2004. Vol. 18. P. 265. doi.org/10.1007/s00477-004-0190-8.
20. Rajaram H. Debates – Stochastic Subsurface Hydrology from theory to practice: Introduction // *Water Resour. Res.* 2016. Vol. 52. P. 9215–9217. doi.org/10.1002/2016WR020066.
21. Neuman S.P. Stochastic groundwater models in practice // *Stoch. Env. Res. Risk A.* 2004. Vol. 18. P. 268–270. doi.org/10.1007/s00477-004-0192-6.
22. Winter C.L.: Stochastic Hydrology: practical alternatives exist // *Stoch. Env. Res. Risk A.* 2004. Vol. 18. P. 271–273. doi.org/10.1007/s00477-004-0198-0.
23. Cirpka O.A., Valocchi A.J. Debates – Stochastic Subsurface Hydrology from theory to practice: does stochastic subsurface hydrology help solving practical problems of contaminant hydrogeology? // *Water Resour. Res.* 2016. Vol. 52. P. 9218–9227. doi.org/10.1002/2016WR019087.
24. Fiori A., Cvetkovic V., Dagan G., et al. Debates – Stochastic Subsurface Hydrology from theory to practice: the relevance of stochastic subsurface hydrology to practical problems of contaminant transport and remediation. What is characterization and stochastic theory good for? // *Water Resour. Res.* 2016. Vol. 52. P. 9228–9234. doi.org/10.1002/2015WR017525.
25. Bellin A., Rubin Y. HYDRO_GEN: a spatially distributed random field generator for correlated properties // *Stoch. Hydrol. Hydraul.* 1996. Vol. 10. P. 253–278. doi.org/10.1007/BF01581869.
26. Deutsch C.V., Journel A.G.: *GSLIB: geostatistical software library and user's guide* // *Applied geostatistics series* (2nd edn.). Oxford University Press, 1997. ISBN 9780195100150.

27. Brouste A., Istas J., Lambert-Lacroix S. On fractional Gaussian random fields simulations // *J. Stat. Softw.* 2008. Vol. 23. P. 1–23. doi.org/10.18637/jss.v023.i01.
28. Rubin Y., Chen X., Murakami H., Hahn M. A Bayesian approach for inverse modeling, data assimilation, and conditional simulation of spatial random fields // *Water Resour. Res.* 2010. Vol. 46. P. W10523. doi.org/10.1029/2009WR008799.
29. Pebesma E.J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package // *Comput. Geosci.* 2004. Vol. 30. P. 683–691. doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.012.
30. Savoy H., Hesse F., Rubin Y.: anchoredDistr: a package for the Bayesian inversion of geostatistical parameters with multi-type and multi-scale data // *R Journal.* 2017. Vol. 9. P. 6–17. doi.org/10.32614/RJ-2017-034.
31. Hesse F., Prykhodko V., Schluter S., Attinger S. Generating random fields with a truncated power-law variogram: a comparison of several numerical methods // *Environ. Modell. Softw.* 2014. Vol. 55. P. 32–48. doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.01.013.
32. Vrugt J.A. Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: Theory, concepts, and MATLAB implementation // *Environ. Modell. Softw.* 2016. Vol. 75. P. 273–316. doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.013.
33. Rubin Y., Chang C.-F., Chen J., Cucchi K., Harken B., Hesse F., Savoy H. Stochastic hydrogeology's biggest hurdles analyzed and its big blind spot // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2018. Vol. 22. P. 5675–5695. doi.org/10.5194/hess-22-5675-2018.
34. Muller S., Schuler L. GeoStat – framework/GSTools: v1.3.5 “Pure Pink” // Zenodo. January 20, 2022. doi.org/10.5281/zenodo.5883346.
35. Embarak O. Data analysis and visualization using Python analyze data to create visualizations for BI systems (1st edn.). Apress, 2018, 394 p.
36. Россум, Г., Ф.Л.Дж. Дрейк, Д.С. Откидач и др. Язык программирования Python. 2001. 454 с. URL: script-coding.com/Python/Otkidach.html.
37. Бизли Д. Python. Подробный справочник (4-е издание). СПб.: Символ-Плюс, 2010. 864 с. (пер. с англ.).
38. Буйначев С.К., Боклаг Н.Ю. Основы программирования на языке Python. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. 91 с.
39. Ковалевский Е. Геологическое моделирование на основе геостатистики. Студенческое лекционное турне EAGE, 2011–2012. URL: petroportal.ru/uploads/library/10_4b6fc13e7ef16f780697332a41680c31.pdf.
40. Uzielli M., Lacasse S., Nadim F., Phoon K.K. Soil variability analysis for geotechnical practice // *Proceedings of the 2nd International workshop on characterisation and engineering properties of natural soils.* Singapore, 2006.
41. Isaaks E.H., Srivastava R.M. An Introduction to Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.
42. Yan-lin S., Ai-ling Z.A., You-bin H., Ke-yan X. 3D geological modeling and its application under complex geological conditions // *Procedia Engineering.* 2011. Vol. 12. P. 41–46.
43. Каневский М.Ф., Демьянов В.В., Савельева Е.А., Чернов С.Ю., Тимонин В.А. Элементарное введение в геостатистику // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов.* Москва: ВИНТИ, 1999. № 11.
44. Bohling G. Introduction to geostatistics and variogram analysis // *Kansas Geological Survey.* 2005. Vol. 1. P. 1–20.
45. Armstrong M. Geostatistics (in 2 volumes). Kluwer Academic Publishers, 1989. 1027 p.
46. Phoon K.K., Kulhawy F.H. Characterization of geotechnical variability // *Canadian Geotechnical Journal.* 1999. Vol. 36. P. 612–624.
47. Webster R., Oliver M.A. Geostatistics for environmental scientists (2nd edn.). John Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-0-470-02858-2.
48. Di Federico V., Neuman S.P. Scaling of random fields by means of truncated power variograms and associated spectra // *Water Resour. Res.* 1997. Vol. 33. P. 1075–1085. doi.org/10.1029/97WR00299.
49. Wackernagel H. Multivariate Geostatistics: an introduction with applications (3rd edn.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. ISBN 978-3-540-44142-7. doi.org/10.1007/978-3-662-05294-5.
50. Rasmussen C.E., Williams C.K. I. Gaussian processes for machine learning (1st edn.). The MIT Press, 2005. ISBN 9780262256834. doi.org/10.7551/mitpress/3206.001.0001.
51. Chiles J.-P., Delfiner P. Geostatistics: modeling spatial uncertainty // *Wiley Series in Probability and Statistics* (edited by Balding D.J., et al.). John Wiley & Sons, 2012. doi.org/10.1002/9781118136188.
52. Matern B. Spatial variation – stochastic models and their applications to some problems in forest survey sampling investigations // *Reports of the Forest Research Institute of Sweden.* 1960. Vol. 49. P. 1–144.
53. Wendland H. Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree // *Adv. Comput. Math.* 1995. Vol. 4. P. 389–396. doi.org/10.1007/BF02123482.
54. Muller S., Hesse F., Attinger S., Zech A. The extended generalized radial flow model and effective conductivity for truncated power law variograms // *Adv. Water Resour.* 2021. Vol. 156. P. 104027. doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.104027.
55. Abramowitz M., Stegun I.A. Handbook of mathematical functions (10th edn.). New York: Dover Publications, 1972. ISBN 978-0-486-61272-0.
56. Murray S.G., Poulin F.J.: hankel: a Python library for performing simple and accurate Hankel transformations // *The Journal of Open Source Software.* 2019. Vol. 4. P. 1397. doi.org/10.21105/joss.01397,

57. Ogata H. A numerical integration formula based on the Bessel functions // *Publ. Res. I. Math. Sci.* 2005. Vol. 41. P. 949–970. doi.org/10.2977/prims/1145474602.
58. Rudin W. *Fourier analysis on group* (1st edn.). Wiley Interscience, John Wiley & Sons, 1990. ISBN 9780470744819. doi.org/10.1002/9781118165621.
59. Goldstein H. *Classical mechanics* (2nd edn.). Addison-Wesley, 1980. 672 p. ISBN 9780201029185.
60. Fiori S. A closed-form expression of the instantaneous rotational lurch index to evaluate its numerical approximation // *Symmetry*. 2019. Vol. 11. № 10. P. 1208. doi.org/10.3390/sym11101208.
61. Lantuejoul C., Freulon X., Renard D. Spectral simulation of isotropic Gaussian random fields on a sphere // *Math. Geosci.* 2019. Vol. 51. P. 999–1020. doi.org/10.1007/s11004-019-09799-4.
62. Sturges H.A. The choice of a class interval // *J. Am. Stat. Assoc.* 1926. Vol. 21. P. 65–66. doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161.
63. Dagan G. *Flow and transport in porous formations* (1st edn.). Berlin, Heidelberg: Springer, 1989. doi.org/10.1007/978-3-642-75015-1.
64. Eliason S.R.: *Maximum likelihood estimation: Logic and practice* (1st edn.). Thousand Oaks, CA, US: Sage Publications, 1993. ISBN 9781506315904.
65. Box G.E.P., Cox D.R. An analysis of transformations // *J. Roy. Stat. Soc. B.* 1964. Vol. 26. P. 211–243. doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x.
66. Yeo I., Johnson R.A. A new family of power transformations to improve normality or symmetry // *Biometrika*. 2000. Vol. 87. P. 954–959. doi.org/10.1093/biomet/87.4.954.
67. John J.A., Draper N.R. An alternative family of transformations // *J. Roy. Stat. Soc. C-App.* 1980. Vol. 29. P. 190–197. doi.org/10.2307/2986305.
68. Manly B.F.J. Exponential data transformations // *J. Roy. Stat. Soc. D-Stat.* 1976. Vol. 25. P. 37–42. doi.org/10.2307/2988129.
69. Laekemariam F., Kibret K., Mamo T., Shiferaw H. Accounting spatial variability of soil properties and mapping fertilizer types using geostatistics in southern Ethiopia // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2018. Vol. 9. № 1. P. 124–137.
70. Mohammadi H., Riche R.L., Durrande N., Touboul E., Bay X. An analytic comparison of regularization methods for Gaussian processes [preprint]. May 5, 2017. arXiv:1602.00853.
71. Kraichnan R. Diffusion by a random velocity field // *Phys. Fluids*. 1970. Vol. 13. P. 22–31. doi.org/10.1063/1.1692799.
72. Foreman-Mackey D., Hogg D.W., Lang D., Goodman J. emcee: the MCMC hammer // *Publ. Astron. Soc. Pac.* 2013. Vol. 125. P. 306–312. doi.org/10.1086/670067.
73. Emery X. Testing the correctness of the sequential algorithm for simulating Gaussian random fields // *Stoch. Env. Res. Risk A.* 2004. Vol. 18. P. 401–413. doi.org/10.1007/s00477-004-0211-7.
74. Attinger S. Generalized coarse graining procedures for flow in porous media // *Computat. Geosci.* 2003. Vol. 7. P. 253–273.
75. Schuler L., Suciu N., Knabner P., Attinger S. A time dependent mixing model to close PDF equations for transport in heterogeneous aquifers // *Adv. Water Resour.* 2016. Vol. 96. P. 55–67. doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.06.012.
76. Zinn B., Harvey C.F. When good statistical models of aquifer heterogeneity go bad: a comparison of flow, dispersion, and mass transfer in connected and multivariate Gaussian hydraulic conductivity fields // *Water Resour. Res.* 2003. Vol. 39. P. 1051. doi.org/10.1029/2001WR001146.
77. Cressie N., Wikle C.K. *Statistics for spatio-temporal data* // *Wiley Series in Probability and Statistics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-471-69274-4.
78. Schlomer N., McBain G.D., Luu K. et al. nschloe/meshio: None // *Zenodo*. June 4, 2021. doi.org/10.5281/zenodo.4900671.
79. Sullivan C.B., Kaszynski A.A. PyVista: 3D plotting and mesh analysis through a streamlined interface for the Visualization Toolkit (VTK) // *Journal of Open Source Software*. 2019. Vol. 4. P. 1450. doi.org/10.21105/joss.01450.
80. Muller S., Zech A., Hesse F. ogs5py: a Python – API for the OpenGeoSys 5 Scientific Modeling Package // *Groundwater*. 2020. Vol. 59. P. 117–122. doi.org/10.1111/gwat.13017.
81. Kolditz O., Bauer S., Bilke L., et al. OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media // *Environ. Earth Sci.* 2012. Vol. 67. P. 589–599. doi.org/10.1007/s12665-012-1546-x.
82. Muller S., Leven C., Dietrich P., Attinger S., Zech A. How to find aquifer statistics utilizing pumping tests? Two field studies using welltestpy // *Groundwater*. 2021. Vol. 60. P. 137–144. doi.org/10.1111/gwat.13121.
83. Zech A., Schneider C.L., Attinger S. The extended Thiem's solution – including the impact of heterogeneity // *Water Resour. Res.* 2012. Vol. 48. P. W10535. doi.org/10.1029/2012WR011852.
84. Zech A., Muller S., Mai J., Hesse F., Attinger S. Extending Theis' solution: using transient pumping tests to estimate parameters of aquifer heterogeneity // *Water Resour. Res.* 2016. Vol. 52. P. 6156–6170. doi.org/10.1002/2015WR018509.
85. Murphy B., Muller S., Yurchak R. GeoStatFramework/PyKriging: v1.6.0 // *Zenodo*. 2021. doi.org/10.5281/zenodo.4661732.

86. Behnel S., Bradshaw R., Citro C., Dalcin L., Seljebotn D.S., Smith K. Cython: the best of both worlds // *Computing in Science Engineering*. 2011. Vol. 13. P. 31–39. doi.org/10.1109/MCSE.2010.118.
87. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., et al. SciPy1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // *Nat. Methods*. 2020. Vol. 17. P. 261–272. doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2.
88. Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J., et al. Array programming with NumPy // *Nature*. 2020. Vol. 585. P. 357–362. doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2.
89. Conda-forge community: the conda-forge project: community based software distribution built on the conda package format and ecosystem // *Zenodo*. 2015. doi.org/10.5281/zenodo.4774217.
90. Malicke M. SciKit-GStat 1.0: a SciPy-flavored geostatistical variogram estimation toolbox written in Python // *Geosci. Model Dev.* 2022. Vol. 15. P. 2505–2532. doi.org/10.5194/gmd-15-2505-2022.
91. Uieda L. Verde: processing and gridding spatial data using Green's functions // *Journal of Open Source Software*. 2018. Vol. 3. P. 957. doi.org/10.21105/joss.00957.
92. Muller S. GeoStat-Examples/gstools-temperature-trend: v1.0 // *Zenodo*. August 4, 2021. doi.org/10.5281/zenodo.5159728.
93. Gutzmann B., Motl A., Lassahn D., Kamenshchikov I., Bachmann M., Schrammel M. earthobservations/wetterdienst: add units. May 4, 2021 // *Zenodo*. doi.org/10.5281/zenodo.4737739.
94. Muller S., Zech A. GeoStat – Examples/gstoolsconnectivity-and-transport: v1.0 // *Zenodo*. 2021. doi.org/10.5281/zenodo.5159578.
95. Gong R., Haslauer C.P., Chen Y., Luo J. Analytical relationship between Gaussian and transformed-Gaussian spatially distributed fields // *Water Resour. Res.* 2013. Vol. 49. P. 1735–1740. doi.org/10.1002/wrcr.20143, 2013.
96. Muller S., Zech A. GeoStat – Examples/gstoolspumping-test-ensemble: v1.0 // *Zenodo*. 2021. doi.org/10.5281/zenodo.4891875.
97. Bayer P., Huggenberger P., Renard P., Comunian A. Three-dimensional high resolution fluvio-glacial aquifer analog. Part 1. Field study // *J. Hydrol.* 2011. Vol. 405. P. 1–9. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.038.
98. Carle S. F. T-PROGS: transition probability geostatistical software, version 2.1 // *Tech. Rep.* Davis: University of California, 1999. URL: gmsdocs.aquaveo.com/t-progs.pdf.
99. Remy N. S-GeMS: the Stanford geostatistical modeling software: a tool for new algorithms development // *Geostatistics Banff 2004: Quantitative Geology and Geostatistics*. 2005. Vol. 14. P. 865–871. doi.org/10.1007/978-1-4020-3610-1_89.

REFERENCES ►

1. Muller S., Schuler L., Zech A., Hesse F. GSTools v1.3: a toolbox for geostatistical modelling in Python. *Geosci. Model Dev.* 2022. 15: 3161–3182. doi.org/10.5194/gmd-15-3161-2022. URL: researchgate.net/publication/355409492_GSTools_v13_A_toolbox_for_geostatistical_modelling_in_Python.
2. Krige D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. S. Afr. I. Min. Metall.* 1951. 52: 119–139.
3. Matheron G. *Traite de geostatistique appliquee*. Volume 1. Editions Technip, 1962. 333 p.
4. Hohn M.: *Geostatistics and Petroleum Geology, computer methods in the geosciences*, 2 edn. Springer Netherlands, 1999. doi.org/10.1007/978-94-011-4425-4.
5. Kitanidis P. *Introduction to Geostatistics: applications in Hydrogeology*, 1st edn. Cambridge University Press, Cambridge, New York, 2008. ISBN 9780521587471.
6. Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*. 1999. 89: 1–45. doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00078-0.
7. Cecinati F., Wani O., Rico-Ramirez M.A. Comparing approaches to deal with non-gaussianity of rainfall data in kriging-based radar-gauge rainfall merging. *Water Resour. Res.* 2017. 53: 8999–9018. doi.org/10.1002/2016WR020330.
8. Rossi R.E., Mulla D.J., Journel A.G., Franz E.H. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecol. Monogr.* 1992. 62: 277–314. doi.org/10.2307/2937096.
9. Sales M.H., Souza C.M., Kyriakidis P.C., Roberts D.A., Vidal E. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: a case study for Rondonia, Brazil. *Ecol. Model.* 2007. 205: 221–230. doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.02.033.
10. Monestiez P., Petrenko A., Leredde Y., Ongari B. Geostatistical analysis of three dimensional current patterns in coastal oceanography: application to the gulf of lions (NW Mediterranean sea). In: *geoENV IV – Geostatistics for environmental applications*, edited by: Sanchez-Vila X., Carrera J., GomezHernandez J.J. Springer Netherlands, Dordrecht, 2004. 367–378. doi.org/10.1007/1-4020-2115-1_31.
11. Schuler L., Muller, S. GeoStat – examples/gstoolsherten-example: v1.0. *Zenodo*. 2021. doi.org/10.5281/zenodo.5159658.
12. Kaputin Yu.E., Ezhov A.I., Henli S. *Geostatistika v gorno-geologicheskoy praktike [Geostatistics in mining-and-geological practice]*. 1995. 165 s. Apatity: KNTs RAN, 1995. 188 s. (in Russian).
13. Porotov G.S. *Matematicheskiye metody modelirovaniya v geologii [Mathematical methods of modeling in Geology]*. SPb.: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvenniy gorniy institut (tekhnicheskij universitet), 2006. 223 s. (in Russian).

14. Demianov V.V., Savelyeva E.A. Geostatistika: teoriya i praktika [Geostatistics: theory and practice] / pod red. R.V. Arutyunyan. M.: Nauka, 2010. 327 s. (in Russian).
15. Pyrcz M.J., Deutsch C.V. Geostatistical reservoir modeling, 2 edn. Oxford University Press, Oxford, 2014. ISBN 978-0199731442.
16. Rubin Y. Applied Stochastic Hydrogeology, 1st edn. Oxford University Press, New York, 2003. ISBN 9780195138047. doi.org/10.1093/oso/9780195138047.001.0001.
17. Diggle P., Ribeiro P.J. Model-based Geostatistics, Springer Series in Statistics, 1st edn. Springer-Verlag, New York, 2007. doi.org/10.1007/978-0-387-48536-2.
18. Banerjee S., Carlin B.P., Gelfand A.E. Hierarchical modeling and analysis for spatial data, 2nd edn. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, 2014. doi.org/10.1201/b17115.
19. Zhang Y.-K., Zhang D. Forum: the state of Stochastic Hydrology. Stoch. Env. Res. Risk A. 2004. 18: 265. doi.org/10.1007/s00477-004-0190-8.
20. Rajaram H. Debates – Stochastic Subsurface Hydrology from theory to practice: Introduction. Water Resour. Res. 2016. 52: 9215–9217. doi.org/10.1002/2016WR020066.
21. Neuman S.P. Stochastic groundwater models in practice. Stoch. Env. Res. Risk A. 2004. 18: 268–270. doi.org/10.1007/s00477-004-0192-6.
22. Winter C.L.: Stochastic Hydrology: practical alternatives exist. Stoch. Env. Res. Risk A. 2004. 18: 271–273. doi.org/10.1007/s00477-004-0198-0.
23. Cirpka O.A., Valocchi A.J. Debates – Stochastic Subsurface Hydrology from theory to practice: does stochastic subsurface hydrology help solving practical problems of contaminant hydrogeology? Water Resour. Res. 2016. 52: 9218–9227. doi.org/10.1002/2016WR019087.
24. Fiori A., Cvetkovic V., Dagan G., et al. Debates – Stochastic Subsurface Hydrology from theory to practice: The relevance of stochastic subsurface hydrology to practical problems of contaminant transport and remediation. What is characterization and stochastic theory good for? Water Resour. Res. 2016. 52: 9228–9234. doi.org/10.1002/2015WR017525.
25. Bellin A., Rubin Y. HYDRO_GEN: a spatially distributed random field generator for correlated properties. Stoch. Hydrol. Hydraul. 1996. 10: 253–278. doi.org/10.1007/BF01581869.
26. Deutsch C.V., Journel A.G.: GSLIB: geostatistical software library and user's guide, Applied geostatistics series, 2nd edn. Oxford University Press, 1997. ISBN 9780195100150.
27. Brouste A., Ista J., Lambert-Lacroix S. On fractional Gaussian random fields simulations. J. Stat. Softw. 2008. 23: 1–23. doi.org/10.18637/jss.v023.i01.
28. Rubin Y., Chen X., Murakami H., Hahn M. A Bayesian approach for inverse modeling, data assimilation, and conditional simulation of spatial random fields. Water Resour. Res. 2010. 46: W10523. doi.org/10.1029/2009WR008799.
29. Pebesma E.J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. Comput. Geosci. 2004. 30: 683–691. doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.012.
30. Savoy H., Hesse F., Rubin Y.: anchoredDistr: a package for the Bayesian inversion of geostatistical parameters with multi-type and multi-scale data. R Journal. 2017. 9: 6–17. doi.org/10.32614/RJ-2017-034.
31. Hesse F., Prykhodko V., Schluter S., Attinger S. Generating random fields with a truncated power-law variogram: a comparison of several numerical methods. Environ. Modell. Softw. 2014. 55: 32–48. doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.01.013.
32. Vrugt J.A. Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: Theory, concepts, and MATLAB implementation. Environ. Modell. Softw. 2016. 75: 273–316. doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.013.
33. Rubin Y., Chang C.-F., Chen J., Cucchi K., Harken B., Hesse F., Savoy H. Stochastic hydrogeology's biggest hurdles analyzed and its big blind spot. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2018. 22: 5675–5695. doi.org/10.5194/hess-22-5675-2018.
34. Muller S., Schuler L. GeoStat – framework/GSTools: v1.3.5 “Pure Pink”. Zenodo. January 20, 2022. doi.org/10.5281/zenodo.5883346.
35. Embarak O. Data analysis and visualization using Python analyze data to create visualizations for BI systems, 1st edn. Apress, 2018, 394 p.
36. Rossum G., Dreyk F.L.Dzh., Otkidach D.S., i dr. Yazyk programmirovaniya Python [Python programming language]. 2001, 454 c. URL: script-coding.com/Python/Otkidach.html (in Russian).
37. Beazley D. Python. Essential Reference, 4th edn. Addison-Wesley, 2010. 860 p.
38. Buynachev S.K., Boklag N.Yu. Osnovy programmirovaniya na yazyke Python [Basics of programming in Python]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo un-ta, 2014. 91 c. (in Russian).
39. Kovalevskiy E. Geological modelling on the base of Geostatistics. EAGE Student Lecture Tour (SLT), 2011–2012. URL: petroportal.ru/uploads/library/10_4b6fc13e7ef16f780697332a41680c31.pdf (in Russian).
40. Uzielli M., Lacasse S., Nadim F., Phoon K.K. Soil variability analysis for geotechnical practice. In: Proceedings of the 2nd international workshop on characterisation and engineering properties of natural soils. Singapore, 2006.
41. Isaaks E.H., Srivastava R.M. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, Inc. New York, 1989. 561 p.

42. Yan-lin S., Ai-ling Z.A., You-bin H., Ke-yan X. 3D geological modeling and its application under complex geological conditions. *Procedia Engineering*. 2011. 12: 41–46.
43. Kanevskiy M.F., Demyanov V.V., Savelyeva E.A., Chernov S.Yu., Timonin V.A. *Elementarnoye vvedeniye v geostatistiku. Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnih resursov*. Moskva, VINITI, 1999. № 11 (in Russian).
44. Bohling G. Introduction to geostatistics and variogram analysis. Kansas Geological Survey. 2005. 1: 1–20.
45. Armstrong M. *Geostatistics* (in 2 volumes). Kluwer Academic Publishers, 1989. 1027 p.
46. Phoon K.K., Kulhawy F.H. Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*. 1999. 36: 612–624.
47. Webster R., Oliver M.A. *Geostatistics for environmental scientists*, 2nd edn. John Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-0-470-02858-2.
48. Di Federico V., Neuman S.P. Scaling of random fields by means of truncated power variograms and associated spectra. *Water Resour. Res.* 1997. 33: 1075–1085. doi.org/10.1029/97WR00299.
49. Wackernagel H. *Multivariate Geostatistics: an introduction with applications*, 3-d edn. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2003. ISBN 978-3-540-44142-7. doi.org/10.1007/978-3-662-05294-5.
50. Rasmussen C.E., Williams C.K. I. *Gaussian processes for machine learning*, 1st edn. The MIT Press, 2005. ISBN 9780262256834. doi.org/10.7551/mitpress/3206.001.0001.
51. Chiles J.-P., Delfiner P. *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*, 2nd edn. Wiley Series in Probability and Statistics (edited by Balding D.J., et al.). John Wiley & Sons, 2012. doi.org/10.1002/9781118136188.
52. Matern B. Spatial variation – stochastic models and their applications to some problems in forest survey sampling investigations. *Reports of the Forest Research Institute of Sweden*. 1960. 49: 1–144.
53. Wendland H. Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Adv. Comput. Math.* 1995. 4: 389–396. doi.org/10.1007/BF02123482.
54. Muller S., Hesse F., Attinger S., Zech A. The extended generalized radial flow model and effective conductivity for truncated power law variograms. *Adv. Water Resour.* 2021. 156: 104027. doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.104027, 2021.
55. Abramowitz M., Stegun I.A. *Handbook of mathematical functions*, 10th edn. Dover Publications, New York, 1972. ISBN 978-0-486-61272-0.
56. Murray S.G., Poulin F.J.: hankel: a Python library for performing simple and accurate Hankel transformations, *The Journal of Open Source Software*. 2019. 4: 1397. doi.org/10.21105/joss.01397,
57. Ogata H. A numerical integration formula based on the Bessel functions. *Publ. Res. I. Math. Sci.* 2005. 41: 949–970. doi.org/10.2977/prims/1145474602.
58. Rudin W. *Fourier analysis on groups*, 1st edn. Wiley Interscience, John Wiley & Sons, 1990. ISBN 9780470744819. doi.org/10.1002/9781118165621.
59. Goldstein H. *Classical mechanics*, 2nd edn. Addison-Wesley, 1980. 672 p. ISBN 9780201029185.
60. Fiori S. A closed-form expression of the instantaneous rotational lurch index to evaluate its numerical approximation. *Symmetry*. 2019. 11 (10): 1208. doi.org/10.3390/sym11101208.
61. Lantuejoul C., Freulon X., Renard D. Spectral simulation of isotropic Gaussian random fields on a sphere. *Math. Geosci.* 2019. 51: 999–1020. doi.org/10.1007/s11004-019-09799-4.
62. Sturges H.A. The choice of a class interval. *J. Am. Stat. Assoc.* 1926. 21: 65–66. doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161.
63. Dagan G. *Flow and transport in porous formations*, 1st edn. Springer, Berlin, Heidelberg, 1989. doi.org/10.1007/978-3-642-75015-1.
64. Eliason S.R.: *Maximum likelihood estimation: Logic and practice*, 1st edn. Sage Publications, Thousand Oaks, CA, US, 1993. ISBN 9781506315904.
65. Box G.E.P., Cox D.R. An analysis of transformations. *J. Roy. Stat. Soc. B.* 1964. 26: 211–243. doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x.
66. Yeo I., Johnson R.A. A new family of power transformations to improve normality or symmetry. *Biometrika*. 2000. 87: 954–959. doi.org/10.1093/biomet/87.4.954.
67. John J.A., Draper N.R. An alternative family of transformations. *J. Roy. Stat. Soc. C-App.* 1980. 29: 190–197. doi.org/10.2307/2986305.
68. Manly B.F.J. Exponential data transformations. *J. Roy. Stat. Soc. D-Stat.* 1976. 25: 37–42. doi.org/10.2307/2988129.
69. Laekemariam F., Kibret K., Mamo T., Shiferaw H. Accounting spatial variability of soil properties and mapping fertilizer types using geostatistics in southern Ethiopia. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2018. 49 (1): 124–137.
70. Mohammadi H., Riche R.L., Durrande N., Touboul E., Bay X. An analytic comparison of regularization methods for Gaussian processes [preprint]. May 5, 2017. arXiv:1602.00853.
71. Kraichnan R. Diffusion by a random velocity field. *Phys. Fluids*. 1970. 13: 22–31. doi.org/10.1063/1.1692799.
72. Foreman-Mackey D., Hogg D.W., Lang D., Goodman J. emcee: the MCMC hammer. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 2013. 125: 306–312. doi.org/10.1086/670067.
73. Emery X. Testing the correctness of the sequential algorithm for simulating Gaussian random fields. *Stoch. Env. Res. Risk A*. 2004. 18: 401–413. doi.org/10.1007/s00477-004-0211-7.

74. Attinger S. Generalized coarse graining procedures for flow in porous media. *Computat. Geosci.* 2003. 7: 253–273.
75. Schuler L., Suci N., Knabner P., Attinger S. A time dependent mixing model to close PDF equations for transport in heterogeneous aquifers. *Adv. Water Resour.* 2016. 96: 55–67. doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.06.012.
76. Zinn B., Harvey C.F. When good statistical models of aquifer heterogeneity go bad: a comparison of flow, dispersion, and mass transfer in connected and multivariate Gaussian hydraulic conductivity fields. *Water Resour. Res.* 2003. 39: 1051. doi.org/10.1029/2001WR001146.
77. Cressie N., Wikle C.K. *Statistics for spatio-temporal data.* Wiley Series in Probability and Statistics. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey: 2011. ISBN 978-0-471-69274-4.
78. Schlomer N., McBain G.D., Luu K. et al. nschloe/meshio: None. Zenodo. June 4, 2021. doi.org/10.5281/zenodo.4900671.
79. Sullivan C.B., Kaszynski A.A. PyVista: 3D plotting and mesh analysis through a streamlined interface for the Visualization Toolkit (VTK). *Journal of Open Source Software.* 2019. 4: 1450. doi.org/10.21105/joss.01450.
80. Muller S., Zech A., Hesse F. ogs5py: a Python – API for the OpenGeoSys 5 Scientific Modeling Package. *Groundwater.* 2020. 59: 117–122. doi.org/10.1111/gwat.13017.
81. Kolditz O., Bauer S., Bilke L., et al. OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media. *Environ. Earth Sci.* 2012. 67: 589–599. doi.org/10.1007/s12665-012-1546-x.
82. Muller S., Leven C., Dietrich P., Attinger S., Zech A. How to find aquifer statistics utilizing pumping tests? Two field studies using welltestpy. *Groundwater.* 2021. 60: 137–144. doi.org/10.1111/gwat.13121.
83. Zech A., Schneider C.L., Attinger S. The extended Thiem's solution – including the impact of heterogeneity. *Water Resour. Res.* 2012. 48: W10535. doi.org/10.1029/2012WR011852.
84. Zech A., Muller S., Mai J., Hesse F., Attinger S. Extending Theis' solution: using transient pumping tests to estimate parameters of aquifer heterogeneity. *Water Resour. Res.* 2016. 52: 6156–6170. doi.org/10.1002/2015WR018509.
85. Murphy B., Muller S., Yurchak R. GeoStatFramework/PyKrig: v1.6.0. Zenodo. 2021. doi.org/10.5281/zenodo.4661732.
86. Behnel S., Bradshaw R., Citro C., Dalcin L., Seljebotn D.S., Smith K. Cython: the best of both worlds. *Computing in Science Engineering.* 2011. 13: 31–39. doi.org/10.1109/MCSE.2010.118.
87. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nat. Methods.* 2020. 17: 261–272. doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2.
88. Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J., et al. Array programming with NumPy. *Nature.* 2020. 585: 357–362. doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2.
89. Conda-forge community: the conda-forge project: community based software distribution built on the conda package format and ecosystem. Zenodo. 2015. doi.org/10.5281/zenodo.4774217.
90. Malicke M. SciKit-GStat 1.0: a SciPy-flavored geostatistical variogram estimation toolbox written in Python. *Geosci. Model Dev.* 2022. 15: 2505–2532. doi.org/10.5194/gmd-15-2505-2022.
91. Uieda L. Verde: processing and gridding spatial data using Green's functions. *Journal of Open Source Software.* 2018. 3: 957. doi.org/10.21105/joss.00957.
92. Muller S. GeoStat-Examples/gstools-temperature-trend: v1.0. Zenodo. August 4, 2021. doi.org/10.5281/zenodo.5159728.
93. Gutzmann B., Motl A., Lassahn D., Kamenshchikov I., Bachmann M., Schrammel M. earthobservations/wetterdienst: add units. May 4, 2021. Zenodo. doi.org/10.5281/zenodo.4737739.
94. Muller S., Zech A. GeoStat – Examples/gstoolsconnectivity-and-transport: v1.0. Zenodo. 2021. doi.org/10.5281/zenodo.5159578.
95. Gong R., Haslauer C.P., Chen Y., Luo J. Analytical relationship between Gaussian and transformed-Gaussian spatially distributed fields. *Water Resour. Res.* 2013. 49: 1735–1740. doi.org/10.1002/wrcr.20143, 2013.
96. Muller S., Zech A. GeoStat – Examples/gstoolspumping-test-ensemble: v1.0. Zenodo. 2021. doi.org/10.5281/zenodo.4891875.
97. Bayer P., Huggenberger P., Renard P., Comunian A. Three-dimensional high resolution fluvio-glacial aquifer analog. Part 1. Field study. *J. Hydrol.* 2011. 405: 1–9. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.038.
98. Carle S. F. T-PROGS: transition probability geostatistical software, version 2.1. Tech. Rep. University of California, Davis, 1999. URL: gmsdocs.aquaveo.com/t-progs.pdf.
99. Remy N. S-GeMS: the Stanford geostatistical modeling software: a tool for new algorithms development. *Geostatistics Banff 2004. Quantitative Geology and Geostatistics.* 2005. 14: 865–871. doi.org/10.1007/978-1-4020-3610-1_89.

Информация об авторе

БОЛДЫРЕВ ГЕННАДИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ

Директор по научной работе и инновациям
ООО НПП «Геотек», д. т. н., г. Пенза, Россия

Information about the author

GENNADIY G. BOLDYREV

DSc (Technical Sciences), Director of Research and
Innovation at OOO NPP «Geotek», Penza, Russia



ВЛИЯНИЕ РАЗРЕШЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА НА ОЦЕНКУ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА ШАПА ПРОВИНЦИИ ЛАОКАЙ, ВЬЕТНАМ)

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 16.01.2022. Принята к публикации 03.02.2023. Дата публикации 06.02.2023

© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2022

ФОМЕНКО И.К.

Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия, ifolga@gmail.com
Адрес: ул. Миклухо-Маклая, д. 23, Россия, 117997, г. Москва

ЗЫОНГ В.Б.

Ханойский горно-геологический университет, г. Ханой, Вьетнам, duongvanbinh@humg.edu.vn
Адрес: ул. Вьен, д. 18, г. Ханой, 100000, Вьетнам
Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия
Адрес: ул. Миклухо-Маклая, д. 23, г. Москва, 117997, Россия

НГУЕН Ч.К.

Институт геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий, г. Ханой, Вьетнам, kien.mgri@gmail.com
Адрес: ул. Чуаланг, д. 84, г. Ханой, 100000, Вьетнам

СИРОТКИНА О.Н.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия, onsirotkina@gmail.com
Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия

ГОРОБЦОВ Д.Н.

Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия, dngorobtsov@mail.ru
Адрес: ул. Миклухо-Маклая, д. 23, г. Москва, 117997, Россия

АННОТАЦИЯ

В настоящем исследовании изучалось влияние пространственного разрешения цифровой модели рельефа (ЦМР) на достоверность оценки оползневой опасности в Шапе провинции Лаокай (Вьетнам). Для решения поставленной задачи был использован модифицированный метод анализа иерархий (МАНР) при двух разных разрешениях ЦМР – 30 м (модель МАНР30) и 10 м (модель МАНР10). Обе модели учитывали следующие факторы оползнеобразования: крутизну склонов; состав грунтов; расстояние от активных разломов; вертикальное расчленение рельефа; горизонтальное расчленение рельефа; обводненность массивов; количество осадков; тип растительности. В результате район исследования был разделен на пять зон по оползневой опасности: очень низкой, низкой, средней, высокой и очень высокой. Достоверность карт определялась с использованием обучающей выборки (91 оползень – обучающая выборка; 39 оползней – данные для проверки). Выполненные исследования показали, что модель МАНР10 является более достоверной по сравнению с моделью МАНР30. Таким образом, качество оценки оползневой опасности имеет прямую корреляцию с пространственным разрешением цифровой модели рельефа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

оползневая опасность; цифровая модель рельефа (ЦМР); модифицированный метод анализа иерархий; факторы оползнеобразования; пространственное разрешение ЦМР; район Шапа; Вьетнам.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Фоменко И.К., Зыонг В.Б., Нгуен Ч.К., Сироткина О.Н., Горобцов Д.Н. Влияние разрешения цифровой модели рельефа на оценку оползневой опасности (на примере района Шапа провинции Лаокай, Вьетнам) // Геоинфо. 2022. № 12. С. 38–44
doi: 10.58339/2949-0677-2022-4-12-38-44

INFLUENCE OF DEM RESOLUTION ON LANDSLIDE HAZARD ASSESSMENT (A CASE STUDY IN SAPA DISTRICT, LAOCAI PROVINCE, VIETNAM)

Original paper

Received 16.01.2022. Accepted 03.02.2023. Published 06.02.2023.

© Independent electronic journal "GeoInfo", 2022

IGOR K. FOMENKO*

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI), Moscow, Russia, ifolga@gmail.com
Address: 23 Miklukho-Maklay st., 117997, Moscow, Russia

VAN B. DUONG

Hanoi University of Mining and Geology; Hanoi, Vietnam, duongvanbinh@humg.edu.vn
Address: 18 Vien st., Hanoi, 100000, Vietnam
Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI), Moscow, Russia
Address: 23 Miklukho-Maklay st., 117997, Moscow, Russia

TRUNG K. NGUYEN

Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam, kien.mgri@gmail.com
Address: 84 Chua Lang st., Hanoi, 10000, Vietnam

OLGA N. SIROTKINA

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, onsirotkina@gmail.com
Address: 1 Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

DENIS N. GOROBTSOV

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI), Moscow, Russia, dngorobtsov@mail.ru
Address: 23, Miklukho-Maklay st., 117997, Moscow, Russia

ABSTRACT

This study was carried out in the Sapa district of the Lao Cai province to examine how the accuracy of the landslide hazard assessment is affected by the resolution of the digital elevation model (DEM). Therefore, two different DEM resolutions (30 meters – MAHP30 model; 10 meters – MAHP10 model) were used in this study to address this issue. Simultaneously, we employed a GIS-based modified analytic hierarchy process approach (AHP) for building landslide assessment models. Based on data availability, the following landslide conditioning factors were considered for each of the models: slope; soil composition; distance from active faults; relative relief; horizontal relief; the degree of soil mass waterlogging; precipitation; type of vegetation. As a result, the study area was divided into five landslide hazard zones: of very low, low, moderate, high, and very high landslide hazard. Afterward, the accuracy of the landslide hazard maps were evaluated using training data (91 landslides) and testing data (39 landslides). The model validation results indicated that the MAHP10 model is more reliable than the MAHP30 model in assessing landslide hazards in this study. Therefore, the spatial resolution of the digital elevation model has a direct relationship with the quality of the landslide hazard assessment that was performed.

KEYWORDS:

landslide hazard; digital elevation model (DEM); modified analytic hierarchy process; landslide conditioning factors; spatial resolution of DEM; Sapa district, Vietnam.

FOR CITATION:

Fomenko I.K., Duong V.B., Nguyen T.K., Sirotkina O.N., Gorobtsov D.N. Vliyaniye razresheniya cifrovoy modeli rel'yefa na otsenku opolznevoy opasnosti (na primere rayona Shapa provintsii Laokay, V'yetnam) [Influence of DEM resolution on landslide hazard assessment (a case study in Sapa district, Laocai province, Vietnam)]. GeoInfo. 2022. 12: 38–44 doi: 10.58339/2949-0677-2022-4-12-38-44 (in Russian).

Введение

Качество имеющихся исходных данных играет важную роль в достоверности результатов моделирования оползневой опасности. Одним из наиболее значимых параметров для выполнения анализа является информация о рельефе местности [1].

Цифровая модель рельефа (ЦМР) может быть создана с использованием различных методов, включая наземную съемку, аэрофотограмметрию, дистанционное лазерное зондирование с помощью лидара (LiDAR – Light Detection and Ranging) и дистанционное радиолокационное зондирование с помощью интерферометрического радара с син-

тезированной апертурой (InSAR – Interferometric Synthetic Aperture Radar).

Качество ЦМР может быть оценено на основе ее пространственного разрешения – величины, определяющей количество точек (элементов растрового изображения) на единицу площади (или единицу длины). Разрешение растровой структуры данных может быть охарактеризовано в терминах размера ячеек сетки. Выбор оптимального размера зависит от целей исследований и масштаба анализа [2].

Объект исследований

Лаокай – одна из северных провинций Вьетнама, наиболее подверженная

оползневым процессам [3]. Расположенный на ее северо-западе район Шапа (рис. 1) находится примерно в 38 км от города Лаокай и в 376 км от Ханоя. Он имеет площадь 675,8 км² и высоту над уровнем моря от 150 м до более чем 3000 м.

Район Шапа столкнулся с проблемой активизации оползневых и эрозийных процессов вследствие сельскохозяйственного освоения и развития туризма [4].

Оценка оползневой опасности является важнейшим компонентом национальной стратегии предотвращения и уменьшения последствий стихийных бедствий. Главной задачей при прове-

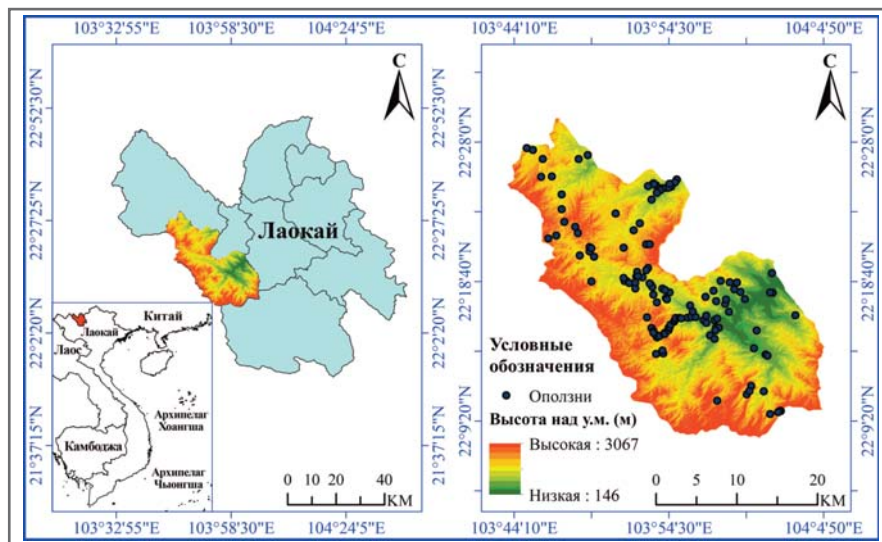


Рис. 1. Расположение района исследований

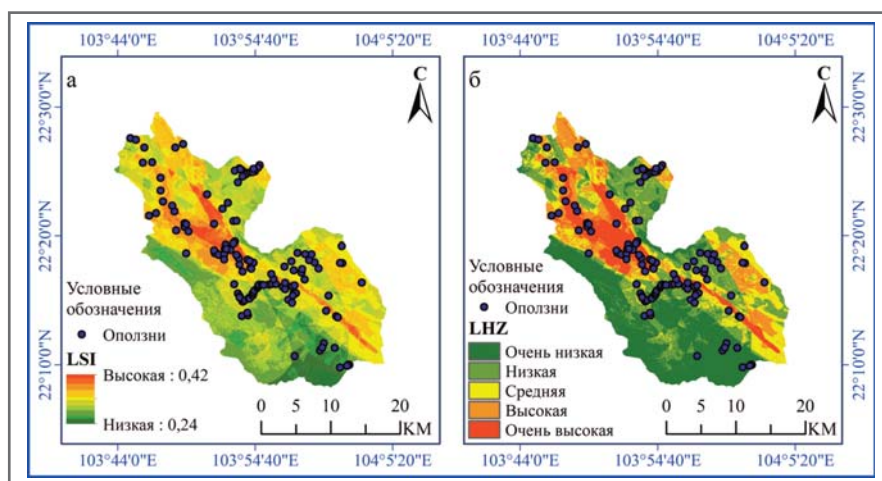


Рис. 2. Карты оползневой восприимчивости (а), и оползневой опасности (б) с применением модели МАНР30

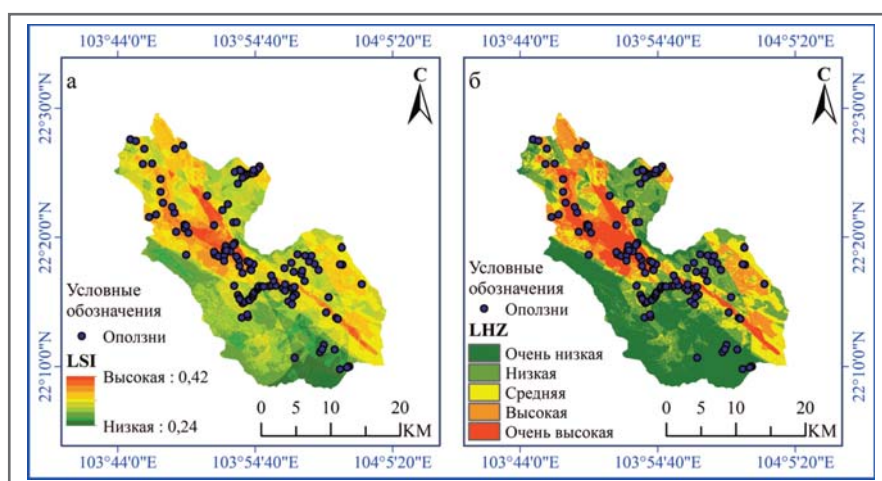


Рис. 3. Карты оползневой восприимчивости (а) и оползневой опасности (б) с применением модели МАНР10

дении анализа оползневой опасности является определение условий оползнеобразования, под которыми следует понимать всю совокупность природных и

антропогенных факторов, нарушающих равновесие грунтовых масс [5]. Для каждой территории набор таких условий может существенно отличаться.

Разработка карты оползневой опасности зависит от сложной взаимосвязи между проявлениями оползней и оползневыми факторами. Переменные, которые способствовали составлению карт, были выбраны на основе обзора литературы и подробных полевых исследований [6]. Обе модели учитывали следующие факторы оползнеобразования:

- 1) крутизну склонов;
- 2) состав грунтов;
- 3) расстояние от активных разломов;
- 4) вертикальное расчленение рельефа;
- 5) горизонтальное расчленение рельефа;
- 6) обводненность массивов;
- 7) количество осадков;
- 8) тип растительности.

Важнейшим элементом, необходимым для определения достоверности выполненной оценки оползневой опасности, является информация о фактическом распределении существующих проявлений оползневых процессов, которая отображается на карте инвентаризации оползней (LIM) [7]. При составлении таких карт фокусируется внимание на определении границ оползней и игнорируются особенности оползневых деформаций. Наряду с отображением пространственного распределения оползней карта инвентаризации может включать другие виды информации, такие как: геометрические характеристики оползня (размеры, площадь, глубина захвата склонового массива оползневыми деформациями), особенности геологического строения (литология, структура, свойства грунтов) и особенности гидрогеологических условий [8].

В районе исследования было выявлено в общей сложности 130 оползней, при этом наименьшая площадь оползня составила 395,6 м², а самая большая – 70447,4 м². Большинство оползней было зафиксировано в коммуне Чунгчай, в центре района Шапа, в коммунах Лаочай, Таван и Банхо (см. рис. 1).

Методы исследования ►

Метод анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process – АНП), предложенный Т.Л. Саати [9, 10], предоставляет экспертам относительно простой и эффективный способ измерения объективных и субъективных факторов посредством попарных относительных сравнений и вычисления соответствующих приоритетов шкалы отношений. Он является примером полуквантитативного подхода – многокритериального анализа [11].

Ранее выполненные исследования [12–14] показали, что основным недостатком классической формулировки АНР является необходимость использования экспертных оценок, что вносит определенный субъективизм в результат оценки региональной оползневой опасности.

В настоящем исследовании был использован модифицированный метод анализа иерархий (МАНР) [12, 15, 16] при двух разных разрешениях ЦМР – 30 м (модель МАНР30) и 10 м (модель МАНР10). В исследовании Ч.К. Нгуена [5] модель МАНР30 использовалась для оценки оползневой опасности в северо-западной регионе провинции Лаокай, который включал район Батсат, район Шапа и город Лаокай. Модель МАНР10 была использована авторами для оценки оползневой опасности в районе Шапа [15]. Основным критерием для определения значимости фактора в МАНР является форма функции распределения выявленных оползней по информационным классам рассматриваемого фактора [16].

Результаты и обсуждение ►

В результате были получены карты, на которых район исследования был разделен на пять зон по оползневой опасности – очень низкой, низкой, средней, высокой и очень высокой.

Достоверность карт определялась с использованием обучающей выборки (91 оползень – обучающая выборка; 39 оползней – данные для проверки).

Зоны очень высокой и очень низкой оползневой опасности вызывают наибольший интерес для анализа, поскольку категории неустойчивости/устойчивости для них выражены наиболее контрастно. Уровень достоверности, полу-

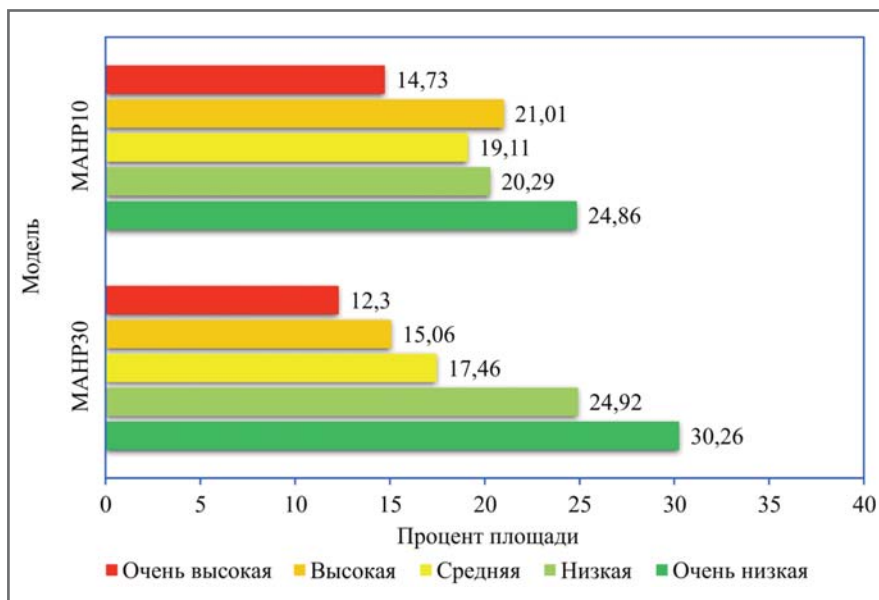


Рис. 4. Распределение зон оползневой опасности по площади (%) с использованием моделей МАНР30 и МАНР10

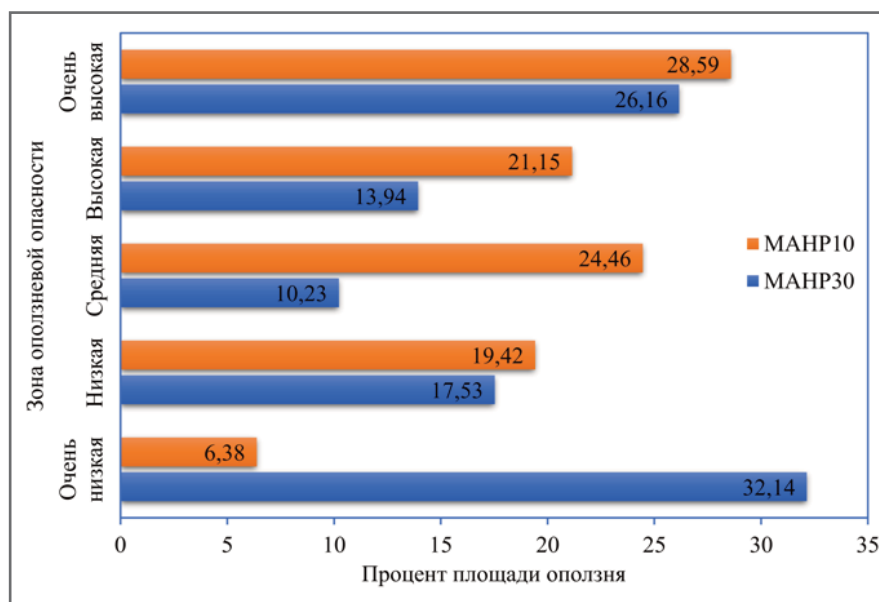


Рис. 5. Сравнение распределения процентов площадей оползней с использованием обучающей выборки

Таблица 1. Распределение оползней по классам оползневой опасности

Модель	Процент площади (%)		Оползневая опасность				
			очень низкая	низкая	средняя	высокая	очень высокая
МАНР30	класса		30,26	24,92	17,46	15,06	12,30
	оползня	обучение	32,14	17,53	10,23	13,94	26,16
		проверка	8,60	37,66	25,26	17,21	11,27
МАНР10	класса		24,86	20,29	19,11	21,01	14,73
	оползня	обучение	6,38	19,42	24,46	21,15	28,59
		проверка	3,76	13,63	19,80	41,85	20,96

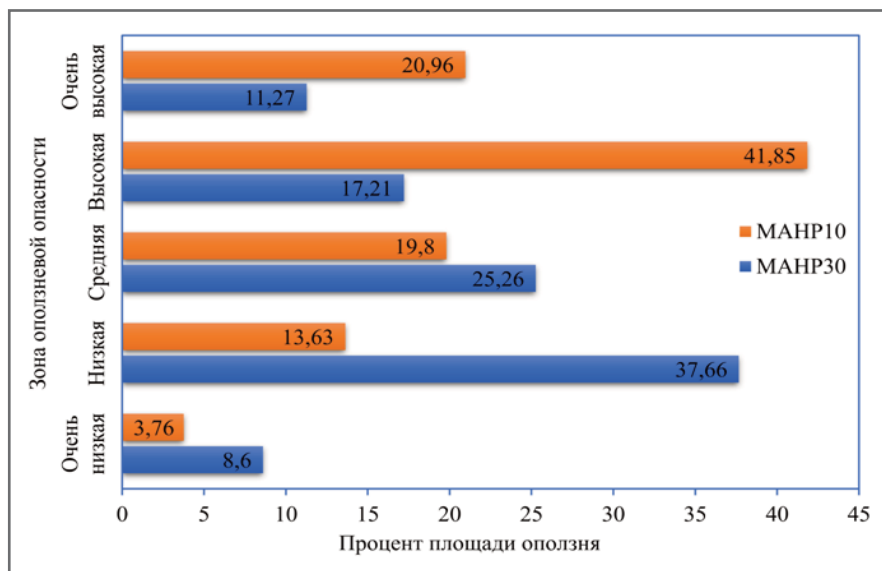


Рис. 6. Сравнение распределения процентов площадей оползней с использованием данных проверки

ченный для этих двух зон имеет определяющее значение для оценки точности карт оползневой восприимчивости и опасности (рис. 2, 3).

Распределение зон оползневой опасности по площади приведено на рисунке 4 и в таблице 1. Площадь зоны очень низкой оползневой опасности составляет 30,26% на карте, построенной на основе ЦМР с разрешением 30 м

(МАНР30), и 24,86% на карте, построенной на основе ЦМР с разрешением 10 м (МАНР10). Зона очень высокой оползневой опасности занимает 12,3 и 14,73% соответственно.

Чтобы оценить, какая модель является более достоверной, было изучено распределение оползней в пределах зон, выделенных по степени опасности, с использованием результатов по обучаю-

щей выборке и данных проверки (рис. 5, 6).

Анализ по площади под кривой ошибок (AUC ROC) также показал, что при использовании ЦМР более высокого разрешения достоверность модели увеличивается (рис. 7). Таким образом, можно сделать вывод, что качество оценки оползневой опасности имеет прямую корреляцию с пространственным разрешением цифровой модели рельефа.

Заключение ►

Выполненный анализ показал, что модель МАНР10 является более достоверной (площадь оползней в зоне очень высокой опасности, полученная с использованием обучающей выборки, составила 28,59%; площадь оползней, полученная в зоне очень высокой опасности с использованием данных проверки, составила 20,96%), по сравнению с моделью МАНР30 (площади оползней составили соответственно 26,16 и 11,27%). Аналогичные результаты получены и для зоны с очень низкой опасностью. В модели МАНР10 ее площадь составила 6,38% (для обучающей выборки) и 3,76% (для данных проверки), в модели МАНР30 – 32,14% и 8,6% соответственно. **и**

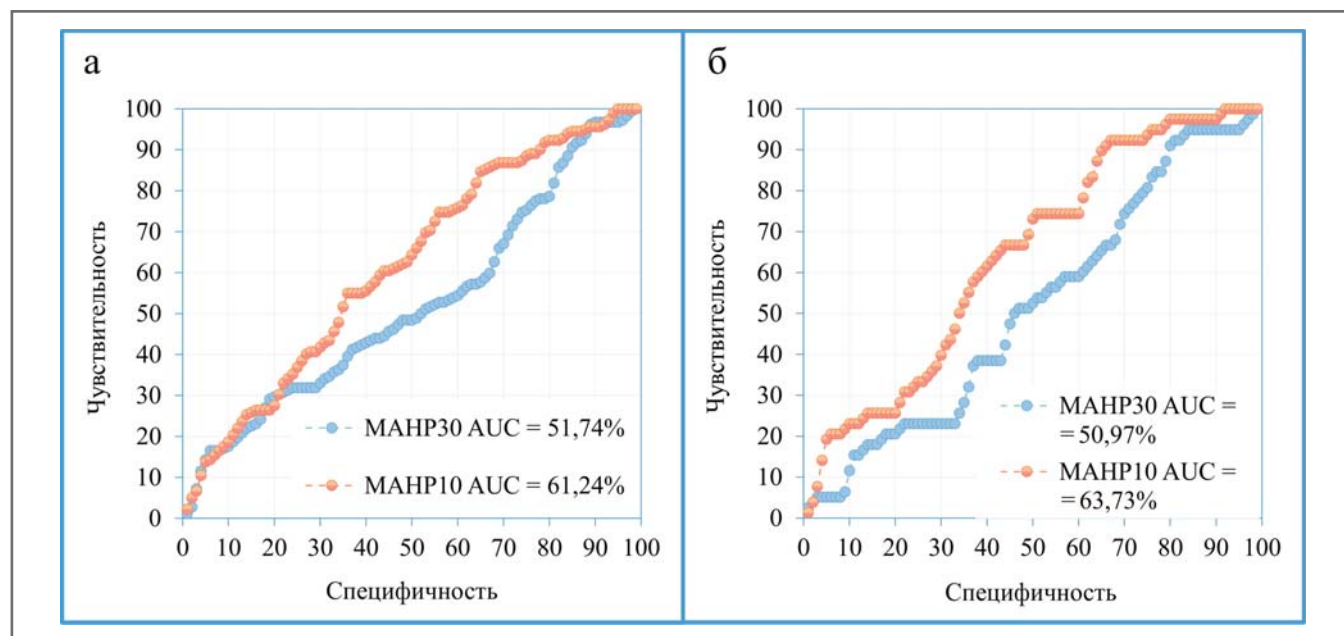


Рис. 7. Кривые успеха (а) и прогнозирования (б) для моделей МАНР30 и МАНР10 по результатам анализа по площади под кривой ошибок (AUC ROC)

Список литературы ►

1. Tran T.V., Lee G., An H., Kim M. Comparing the performance of TRIGRS and TiVaSS in spatial and temporal prediction of rainfall-induced shallow landslides // Environmental Earth Sciences. 2017. Vol. 76. № 8. P. 1–16. URL: doi.org/10.1007/s12665-017-6635-4.

2. Chang K.-T., Merghadi A., Yunus A.P., et al. Evaluating scale effects of topographic variables in landslide susceptibility models using GIS-based machine learning techniques // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. № 1. URL: doi.org/10.1038/s41598-019-48773-2.
3. Thanh N.K., Miyagi T., Isurugi S., et al. Developing recognition and simple mapping by UAV/SfM for local resident in mountainous area in Vietnam – a case study in Po Xi Ngai community, Laocai province // *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*. Volume 2. From Mapping to Hazard and Risk Zonation: WLF 2020 (eds: Guzzetti F., Mihalić Arbanas S., et al.). Cham: Springer International Publishing, 2021. P. 103–109. URL: doi.org/10.1007/978-3-030-60227-7_10.
4. Dang K.B., Burkhard B., Muller F., Dang V.B. Modelling and mapping natural hazard regulating ecosystem services in Sapa, Lao Cai province, Vietnam // *Paddy and Water Environment*. 2018. Vol. 16. № 4. P. 767–781. URL: doi.org/10.1007/s10333-018-0667-6.
5. Нгуен Ч.К. Научно-методические основы региональной оценки риска от оползневых процессов (на примере района Северо-Западный Лаокай Вьетнама): дис ... к.г.-м. н. Москва: МГРИ-РГГРУ, 2008.
6. Getachew N., Meten M. Weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping of Kabi-Gebro locality, Gundomeskel area, Central Ethiopia // *Geoenvironmental Disasters*. 2021. Vol. 8. № 1. URL: doi.org/10.1186/s40677-021-00177-z.
7. Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy // *Geomorphology*. 1999. Vol. 31. № 1. P. 181–216. URL: doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1.
8. Su Z., Chow J.K., Tan P.S., et al. Deep convolutional neural network-based pixel-wise landslide inventory mapping // *Landslides*. 2021. Vol. 18. № 4. P. 1421–1443. URL: doi.org/10.1007/s10346-020-01557-6.
9. Саати Т.Л. Принятие решений – метод анализа иерархий (пер. с англ.) // Радио и связь, М., 1993.
10. Saaty T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures // *Journal of Mathematical Psychology*. 1977. Vol. 15. № 3. P. 234–281. URL: doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5.
11. Saaty T.L., Vargas L. Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process // *International Series in Operations Research & Management Science*. US, New York: Springer, 2001.
12. Нгуен Ч.К., Фоменко И.К., Пендин В.В., Нгуен К.Т. Применение метода анализа иерархий при региональной оценке оползневой опасности (на примере района Северо-Западный Лаокай, Вьетнам) // *Геоинформатика*. 2017. № 2. С. 53–66.
13. Hasekiogullari G.D., Ercanoglu M. A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: a case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey) // *Natural Hazards*. 2012. Vol. 63. № 2. P. 1157–1179. URL: doi.org/10.1007/s11069-012-0218-1.
14. Kayastha P., Dhital M.R., De Smedt F. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, West Nepal // *Computers & Geosciences*. 2013. Vol. 52. P. 398–408. URL: doi.org/10.1016/j.cageo.2012.11.003.
15. Зыонг В.Б., Фоменко И.К., Бу Х.Д., et al. Региональная оценка оползневой опасности модифицированным методом анализа иерархий в геоинформационной системе (на примере района Шапа провинции Лаокай Вьетнама) // *Инженерная геология*. 2021. Т. 16. № 2. С. 6–20. URL: doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-2-6-20.
16. Зыонг М.Х., Фоменко И.К., Пендин В.В. Региональный прогноз оползневой опасности для района Ха Лонг-Кам Фа на северо-востоке Вьетнама // *Инженерная геология*. 2013. № 1. С. 46–54.

References ►

1. Tran T.V., Lee G., An H., Kim M. Comparing the performance of TRIGRS and TiVaSS in spatial and temporal prediction of rainfall-induced shallow landslides. *Environmental Earth Sciences*. 2017. 76 (8): 1–16. URL: doi.org/10.1007/s12665-017-6635-4.
2. Chang K.-T., Merghadi A., Yunus A.P., et al. Evaluating scale effects of topographic variables in landslide susceptibility models using GIS-based machine learning techniques. *Scientific Reports*. 2019. 9 (1). URL: doi.org/10.1038/s41598-019-48773-2.
3. Thanh N.K., Miyagi T., Isurugi S., et al. Developing recognition and simple mapping by UAV/SfM for local resident in mountainous area in Vietnam – a case study in Po Xi Ngai community, Laocai province. *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*. Volume 2. From Mapping to Hazard and Risk Zonation: WLF 2020 (eds: Guzzetti F., Mihalić Arbanas S., et al.). Cham: Springer International Publishing, 2021, 103–109. URL: doi.org/10.1007/978-3-030-60227-7_10.
4. Dang K.B., Burkhard B., Muller F., Dang V.B. Modelling and mapping natural hazard regulating ecosystem services in Sapa, Lao Cai province, Vietnam. *Paddy and Water Environment*. 2018. 16 (4): 767–781. URL: doi.org/10.1007/s10333-018-0667-6.
5. Nguen Ch.K. Nauchno-metodicheskiye osnovy regional'noy otsenki riska ot opolznevykh protsessov (na primere rayona Severo-Zapadnyi Laokai V'etnama): dis ... k.g.-m. n. [Scientific and methodological bases of the regional assessment of risks from landslide processes (by the example of the North-Western Lao Cai region of Vietnam): PhD thesis] MGRI-RGGRU, Moskva, 2008 (in Rus.).
6. Getachew N., Meten M. Weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping of Kabi-Gebro locality, Gundomeskel area, Central Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*. 2021. 8 (1). URL: doi.org/10.1186/s40677-021-00177-z.
7. Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*. 1999. 31 (1): 181–216. URL: doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1.
8. Su Z., Chow J.K., Tan P.S., et al. Deep convolutional neural network-based pixel-wise landslide inventory mapping. *Landslides*. 2021. 18 (4): 1421–1443. URL: doi.org/10.1007/s10346-020-01557-6.

9. Saaty T.L. Prinyatie reshenii – metod analiza iyerarhii (per. s angl.) [Decision making – a method of analyzing hierarchies]. Radio i svyaz', Moskva, 1993 (in Rus.).
10. Saaty T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology. 1977. 15 (3): 234–281. URL: doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5.
11. Saaty T.L., Vargas L. Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process. International Series in Operations Research & Management Science. Springer, New York, US, 2001.
12. Nguen Ch.K., Fomenko I.K., Pendin V.V., Nguen K.T. Primeneniye metoda analiza iyerarhii pri regional'noy otsenke opolznevoy opasnosti (na primere rayona Severo-Zapadnyi Laokay, V'yetnam) [Application of the hierarchy analysis method for the regional assessment of landslide hazards (by the example of the North-Western Lao Cai district, Vietnam)]. Geoinformatika. 2017. 2: 53–66 (in Rus.).
13. Hasekiogullari G.D., Ercanoglu M. A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: a case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey). Natural Hazards. 2012. 63 (2): 1157–1179. URL: doi.org/10.1007/s11069-012-0218-1.
14. Kayastha P., Dhital M.R., De Smedt F. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, West Nepal. Computers & Geosciences. 2013. 52: 398–408. URL: doi.org/10.1016/j.cageo.2012.11.003.
15. Zyong V.B., Fomenko I.K., Vu H.D., et al. Regional'naya otsenka opolznevoy opasnosti modifitsirovannyim metodom analiza iyerarhii v geoinformatsionnoy sisteme (na primere rayona Shapa provintsii Laokay V'yetnama) [Regional assessment of landslide hazards by a modified method of analyzing hierarchies in a geographic information system (by the example of the Shapa district of the Lao Cai province, Vietnam)]. Inzhenernaya Geologiya. 2021. 16. 2: 6–20. URL: doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-2-6-20 (in Rus.).
16. Zyong M.H., Fomenko I.K., Pendin V.V. Regional'nyi prognoz opolznevoy opasnosti dlya rayona Ha Long-Kam Fa na severo-vostoke V'yetnama [Regional landslide hazard forecast for the Ha Long Cam Pha area in the north-east of Vietnam]. Inzhenernaya Geologiya. 2013. 1: 46–54 (in Rus.).

Информация об авторах

ФОМЕНКО ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ

Профессор кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), д.г.-м.н., г. Москва, Россия

ЗЫОНГ ВАН БИНЬ

Преподаватель кафедры инженерной геологии факультета наук о Земле и геологической инженерии Ханойского горно-геологического университета, г. Ханой, Вьетнам; аспирант кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия

НГУЕН ЧУНГ КИЕН

Старший научный сотрудник отдела гидрогеологии и инженерной геологии института геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий, г. Ханой, Вьетнам

СИРОТКИНА ОЛЬГА НИКОЛАЕВНА

Старший научный сотрудник кафедры динамической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

ГОРОБЦОВ ДЕНИС НИКОЛАЕВИЧ

Заведующий кафедрой инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), к.г.-м.н., г. Москва, Россия

Information about the authors

IGOR K. FOMENKO

DSc (Geology and Mineralogy); Professor in the Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI); Moscow, Russia

VAN B. DUONG

Lecturer of the Department of Engineering Geology, Faculty of Geosciences and GeoEngineering, Hanoi University of Mining and Geology; Hanoi, Vietnam; Postgraduate Student of the Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI), Moscow, Russia

TRUNG K. NGUYEN

Senior Research Scientist of the Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

OLGA N. SIROTKINA

PhD (Geology and Mineralogy); Senior Research Scientist of the Department of Dynamic Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

DENIS N. GOROBTSOV

PhD (Geology and Mineralogy). Head of Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI); Moscow, Russia

ООО НПП «ГЕОТЕК» - ВЕДУЩИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ, МЕРЗЛЫХ, КРУПНООБЛОМОЧНЫХ И СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ.

ПРИБОРЫ КРИОЛОГИЧЕСКИЕ СЕРИИ СТАНДАРТ

**ХИТ
продаж**

Прибор компрессионный
криологический ГТ 1.1.11



Прибор срезной
криологический ГТ 1.2.14



Прибор шариковый штамп
криологический ГТ 1.6.2



Температура окружающей среды $+5 (\pm 2) ^\circ\text{C}$

Прибор разработан для эксплуатации в холодильной камере (камера не входит в состав прибора)

ВОЗМОЖНОСТИ:

- автоматизированный режим испытания с поддержанием заданной отрицательной температуры каждого образца;
- прибор работает при пониженных температурах;
- автоматическое управление температурой образца;
- испытание до трех образцов в одном приборе;
- измерение температуры каждого образца.

ПРИБОРЫ ОБЕСПЕЧИВАЮТ ПРОВЕДЕНИЕ СЛЕДУЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ:

- **Прибор компрессионный криологический ГТ.1.1.11**
-испытание по ГОСТ 12248.10-2020 на сжатие и сжатие с оттаиванием;
- **Прибор срезной криологический ГТ 1.2.14**
-испытания по ГОСТ 12248.8-2020 на срез по поверхности смерзания;
-испытания по ГОСТ Р56726-2015 по определению касательных сил морозного пучения;
- **Прибор шариковый штамп криологический ГТ 1.6.2**
-испытания по ГОСТ 12248.7-2020 шариковым штампом.

ПОЧЕМУ ВЫБИРАЮТ НАС



Высокое качество



Выгодная цена



Надежный сервис



Экономия бюджета
испытаний

440004, Россия, г. Пенза, ул. Центральная, строение 1М,
+7(8412) 999-189, 8-800-200-16-05 (звонок по России бесплатный),
sales@npp-geotek.ru, npp-geotek.com

*На правах рекламы



ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА ПОД СКАЛИСТЫМ УСТУПОМ ОТ КАМНЕПАДОВ: РЕШЕНИЯ «МАККАФЕРРИ» ВО ФРАНЦИИ

Обзорная статья

Поступила в редакцию 13.12.2022. Принята к публикации 16.01.2023. Дата публикации 06.02.2023.

© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2022

ГОРБАЧЁВА Т.М.

ООО «Габионы Маккаферри СНГ», г.
Москва, Россия, info@ru.maccferri.com
Адрес: Россия, 115280, г. Москва,
ул. Ленинская Слобода, д. 26, корп. С,
БЦ «Омега-2», оф. 224

АННОТАЦИЯ

Два года назад на мысе Сисье в коммуне Ла-Сен-сюр-Мер во Франции был реализован интересный сложный проект инженерной защиты от камнепадов. Проведенную работу подробно описали в своей статье [1] начальник департамента предотвращения природных рисков французского отделения компании Massaferrri Альберто Гримо и инженер по геотехнике и предотвращению природных рисков геотехнической компании IMSRN Селин Хауи. Представим краткий обзор материалов их статьи [1] с некоторыми собственными профессиональными дополнениями.

Рассмотрен пример установки системы динамических противокамнепадных барьеров длиной 362 м и прочностью 8600 кДж, предназначенной для защиты станции «Амфитрия» на мысе Сисье, на которой очищаются сточные воды французского города Тулон на Лазурном Берегу. Размеры конструкций основаны на исследованиях возможных траекторий падения скальных обломков, проведенных для определения выдерживаемой энергии удара, длины и высоты барьера. Особое внимание было уделено экологии участка с учетом наличия чувствительных видов растений и животных. Этот критерий обусловил выбор инженерного решения, его реализацию и этапы установки барьера.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

скалистый уступ; камнепад; станция очистки сточных вод; инженерная защита; камнеулавливающий (противокамнепадный) барьер; динамический барьер; выдерживаемая энергия удара; полевые испытания; экологические требования.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Горбачёва Т.М. Обеспечение безопасности объекта под скалистым уступом от камнепадов: решения «Маккаферри» во Франции // ГеоИнфо. 2022. № 12. С. 46–55 doi: 10.58339/2949-0677-2022-4-12-46-55

ENSURING THE SAFETY OF AN OBJECT SITUATED UNDER A ROCKY LEDGE AGAINST ROCKFALLS: MACCAFERRI SOLUTIONS IN FRANCE

Review paper

Received 13.12.2022. Accepted 16.01.2023. Published 06.02.2023.

© Independent electronic journal "GeoInfo", 2022

TAT'YANA M. GORBACHEVA

ООО "Gabiony Maccaferri SNG"

[Gabions Maccaferri CIS LLC], Moscow,

Russia, info@ru.maccaferri.com

Address: 26C Leninskaya Sloboda st.,

BTs «Omega-2», off. 224, Moscow,

115280, Russia

ABSTRACT

Two years ago, an interesting complex project of engineering protection against rockfalls was implemented at Cape Sicie in the commune of La Seine-sur-Mer in France. That work was described in detail in the article [1] by Alberto Grimod (the head of the natural risk prevention department of the French branch of the Maccaferri company) and Celine Haouy (an engineer on geotechnics and natural risks prevention of the IMSRN geotechnical company). A brief overview of the materials of their article with some of our own professional additions is presented here.

The paper considers an example of installing a system of dynamic rockfall barriers (having a length of 362 m and a strength of 8600 kJ). The system is designed to protect the Amphitria wastewater treatment plant that treats the wastewater from the city of Toulon on the Cote d'Azur. The dimensions of the constructions of the barrier are based on studies of possible trajectories of falling rocky blocks. Those studies were carried out to determine the impact energy withstood, length and height of the rockfall barrier. Special attention was paid to the ecology of the site, taking into account the presence of sensitive plant and animal species. That criterion determined the chosen engineering solution, its implementation, and the installation stages of the barrier.

KEYWORDS:

rocky ledge; rockfall; wastewater treatment plant; engineering protection; rockfall barrier; dynamic barrier; impact energy withstood; field tests; environmental requirements.

FOR CITATION:

Gorbacheva T.M. Obespecheniye bezopasnosti ob"ekta pod skalistym ustupom ot kamnepadov: resheniya «Makkaferri» vo Frantsii [Ensuring the safety of an object situated under a rocky ledge against rockfalls: Maccaferri solutions in France]. GeoInfo. 2022. 12: 46–55 doi: 10.58339/2949-0677-2022-4-12-46-55 (in Russian).

Введение ►

В 2017 году городская агломерация Тулона (департамент Вар, регион Прованс – Альпы – Лазурный берег, Франция) поручила проектному бюро IMSRN разработать и реализовать проект обеспечения безопасности станции очистки сточных вод «Амфитрия» на мысе Сисье в коммуне Ла-Сен-сюр-Мер. Эта станция расположена у подножия достаточно высокого скалистого уступа. Перед подрядчиком были поставлены две задачи: восстановить существующие защитные сооружения и укрепить ранее незащищенные участки скалы.

Первые исследования, выполненные на месте в 2017 году, привели к неутешительным выводам: защитные сооружения, установленные до начала строительства станции «Амфитрия» в 1990-х годах, подверглись сильной коррозии. Вероятными причинами этого были названы близость к морю и едкие выхлопы из вытяжных труб станции. В результате обследования эти защитные сооружения были признаны нефункционирующими.

Экологические требования ►

Большое внимание при разработке проекта было уделено соблюдению стро-

гих экологических требований. Кроме того, специалисты IMSRN стремились максимально вписать защитные сооружения в существующий ландшафт, не причинив при этом вреда местным растениям, многие из которых относятся к редким видам. Требования экологов в данном случае абсолютно не были формальными и даже привели к пересмотру одного из проектных решений.

Изначально проектировщиками было принято решение установить камнеулавливающие барьеры, способные перехватывать и удерживать скальные обломки с высокой суммарной кинетической энергией (5000 кДж), которые ча-

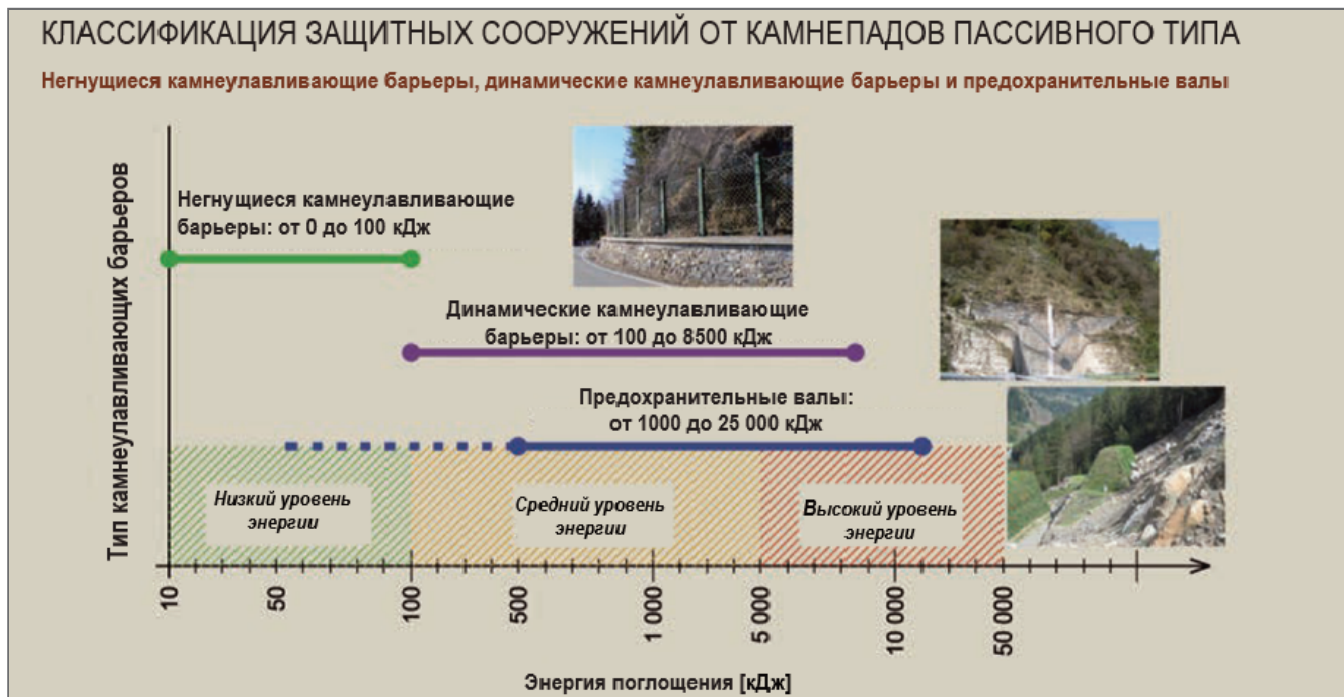


Рис. 1. Классификация противокамнепадных сооружений пассивного типа: негнущиеся камнеулавливающие барьеры, гибкие динамические камнеулавливающие барьеры и предохранительные валы

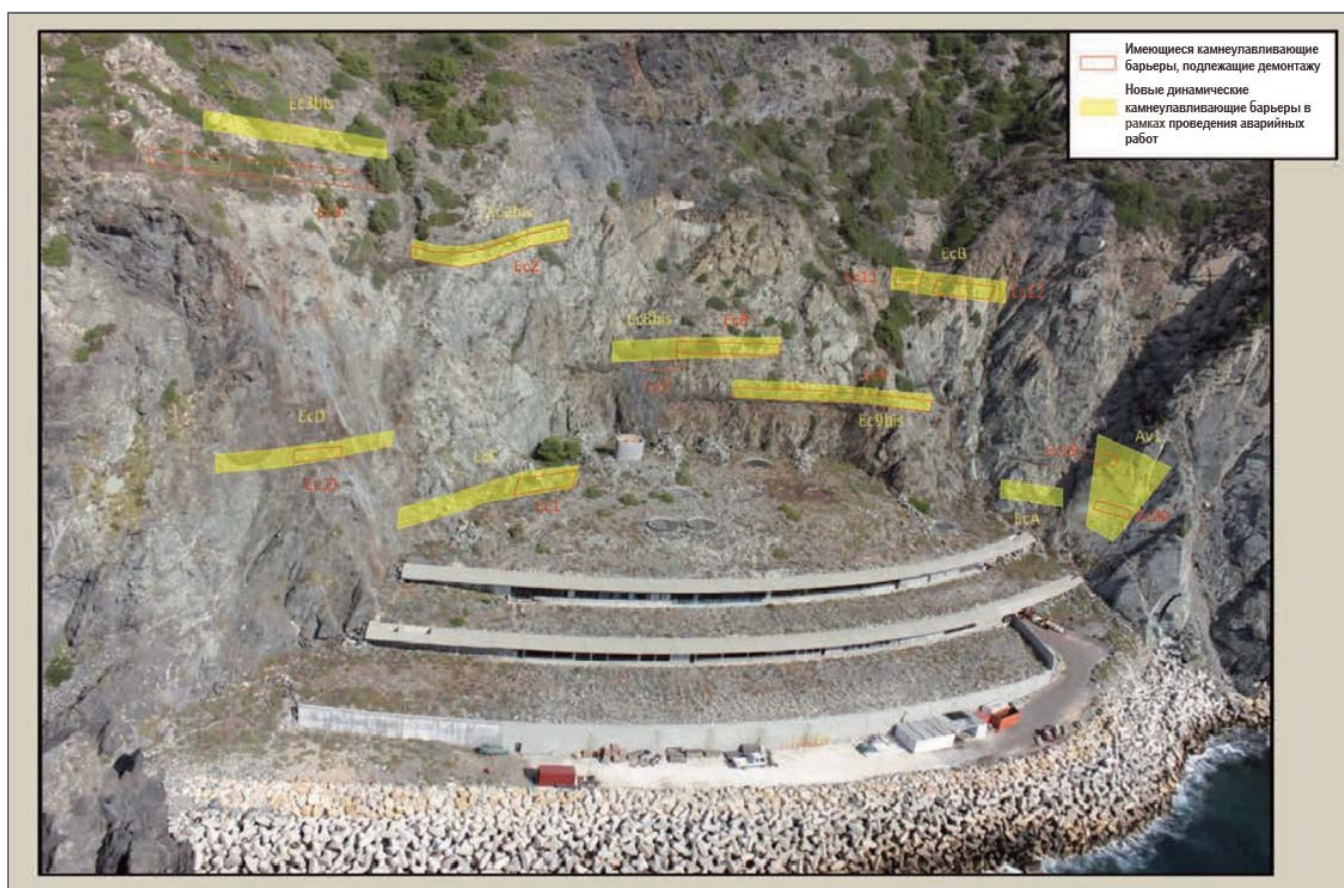


Рис. 2. Предлагаемая схема установки новых динамических камнеулавливающих барьеров

ще всего устанавливаются на территории Франции. При этом 3D-моделирование показало, что для соответствия требованиям безопасности необходимо установить противокамнепадные барьеры

в два ряда, расположенные друг над другом. Но экологи выступили против этого. В результате было разработано другое решение: установить камнеулавливающие барьеры, способные погло-

щать энергию ударов величиной 8000 кДж. Это позволило ограничиться их установкой в один ряд за счет увеличения высоты перехвата каменных блоков большего объема.



Рис. 3. Схема комплектующих камнеулавливающего барьера, соответствующего требованиям ETAG 027 (EAD 340059-00-0106)

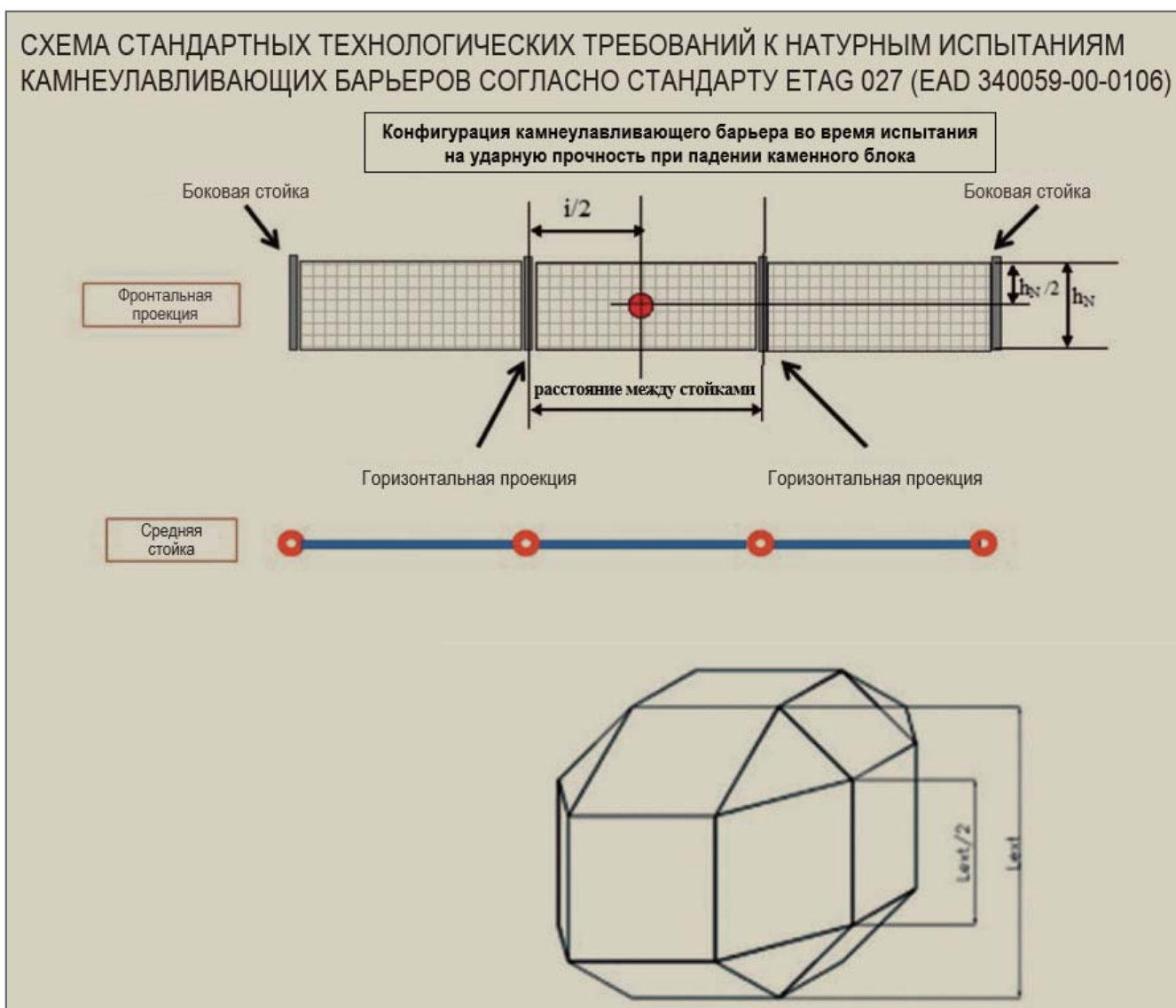


Рис. 4. Схема стандартных технологических требований к полевым испытаниям камнеулавливающих барьеров согласно стандарту ETAG 027 (EAD 340059-00-0106)

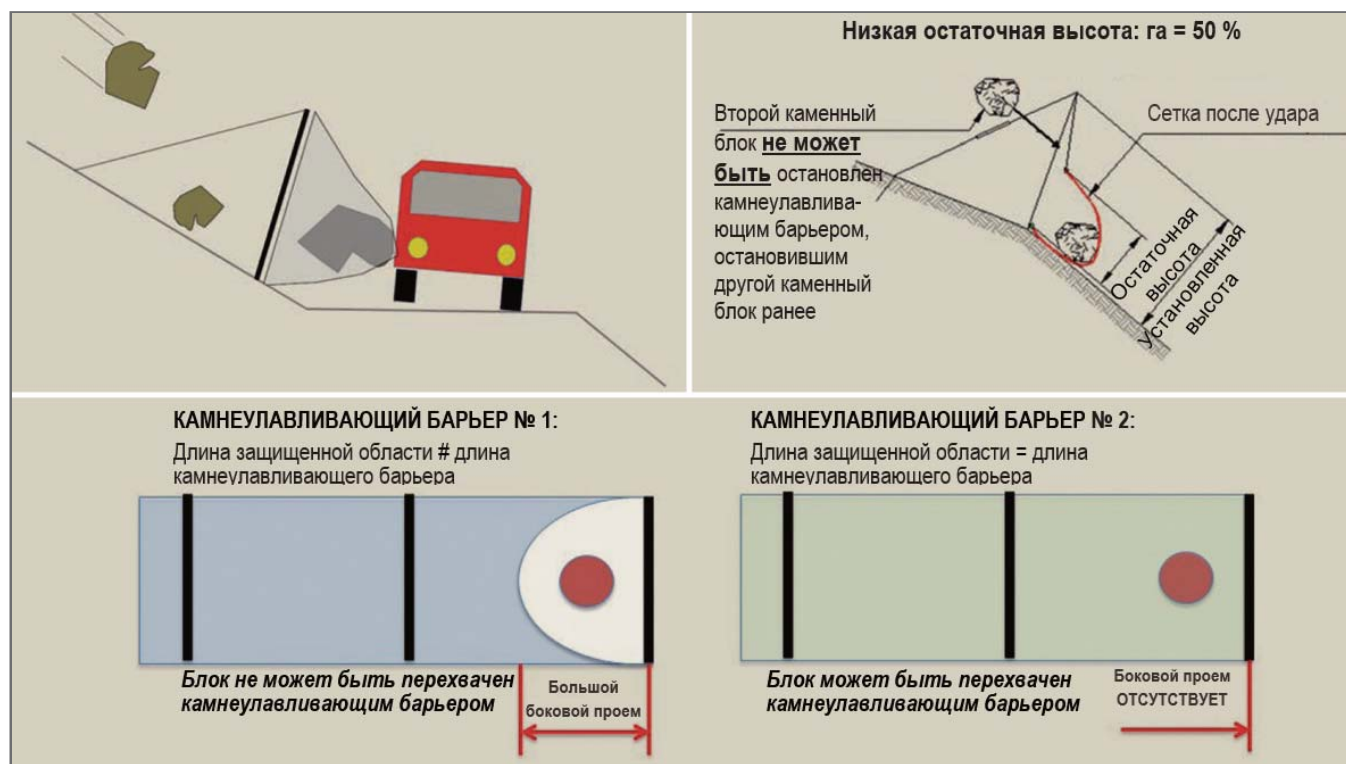


Рис. 5. Характеристики камнеулавливающих барьеров: деформация, остаточная высота, боковое отверстие



Рис. 6. Полевые испытания камнеулавливающего барьера

Таблица 1. Эксплуатационные характеристики динамического камнеулавливающего барьера RMC 850/A, полученные в ходе полевых испытаний

Показанные эксплуатационные характеристики	Испытания МЭУ	Тест SEL-1	Тест SEL2
Энергия удара	8644 кДж (категория энергии удара: 8)	3149 кДж	3176 кДж
Остаточная высота	57,6 % (категория по остаточной высоте: А)	76,2 %	Н/Д
Динамическое деформирование	8,10 м	5,60 м	6,55 м
Боковое отверстие	0,00 м	0,00 м	Н/Д

Таблица 2. Виды защиты от коррозии разных комплектующих

Комплектующие комплекса сооружений	Антикоррозийная защита	Расчетная норма
Стойки и опорная плита стоек	Горячее цинкование Антикоррозийная краска*	Стандарт горячего цинкования EN ISO 1461 ACQPA C5M H
Сетка MacRing	Сплав 95 % цинка + 5 % алюминия класса А	Стандарт NF EN 10244-2. Проволока стальная и изделия из нее. Покрываются из цветных металлов на стальной проволоке.
Проволочная сетка двойного кручения	Сплав 95 % цинка + 5 % алюминия класса А	Стандарт NF EN 10244-2. Проволока стальная и изделия из нее. Покрываются из цветных металлов на стальной проволоке.
Тросы и тросовые оттяжки	Сплав 95 % цинка + 5 % алюминия класса А	Стандарт NF EN 10264-2. Проволока стальная и изделия из нее. Проволока стальная канатная. Проволока холоднотянутая из нелегированной стали для канатов общего назначения.
Соединительные скобы, кабельные стяжки и металлические фитинги	Горячее цинкование	Стандарт горячего цинкования EN ISO 1461
Стержневые анкеры (основание стойки)		
Двойные спиральные тросовые анкеры (тросовые оттяжки)	Оцинковка класса А + внешняя защита головки анкера многослойной трубой из полимерного материала	Стандарт NF EN 10264-2. Проволока стальная и изделия из нее. Проволока стальная канатная. Проволока холоднотянутая из нелегированной стали для канатов общего назначения.

* Краска была нанесена как для защиты от коррозии, так и для уменьшения визуального воздействия на стальные элементы благодаря серому матовому цвету RAL 7042.

После этого в проекте осталось учесть два предложения экологов: отдать предпочтение созданию новых барьеров взамен имеющихся защитных сооружений и по возможности установить противокамнепадные системы в нижней части скального массива, где растительный покров является более редким и воздействие на ландшафт будет меньше.

Выбор типа защитных сооружений ►

При помощи 3D-моделирования проектное бюро IMSRN рассмотрело различные варианты для того, чтобы предложить генеральному заказчику возможные технические решения (рис. 1).

В рамках аварийно-восстановительных работ предпочтение отдавалось так называемым пассивным решениям в целях обеспечения защиты всего скально-

го массива. При этом цель заключалась в том, чтобы «закрыть» склон новыми камнеулавливающими барьерами, соответствующими европейским стандартам ETAG 027.

Исходя из всех имевшихся условий было решено установить на горном склоне динамические камнеулавливающие барьеры. Данные системы относятся к защитным сооружениям пассивного типа, поскольку они, как правило, устанавливаются в зонах транзита каменного материала. Их можно использовать непосредственно перед объектами инфраструктуры, в то время как зоны отрыва обломков бывают рассредоточенными, а топографические или экономические ограничения могут не позволить использовать иной тип защиты. Цель таких барьеров состоит в замедлении и остановке летящих вниз каменных блоков, имеющих высокую кинетическую энергию (от 100 до 8000 кДж и более).

Небольшое количество точек соприкосновения барьеров с поверхностью позволяет устанавливать их на крутых склонах, на вертикальных обрывах, в узких расщелинах, где концентрации камнепадов бывают высокими [1] (рис. 2).

Динамические камнеулавливающие барьеры состоят из:

- опорных конструкций (металлических стоек), предназначенных для поддержания перехватывающих конструкций;
- перехватывающих конструкций (металлических сеток), роль которых состоит в непосредственном поглощении энергии удара за счет упругой и/или пластической деформации и передачи энергии на опорные конструкции и соединительные элементы;
- соединительных элементов (тросов, тормозных устройств и пр.), передающих нагрузки на анкерные фундаменты и грунтовое основание [2] (рис. 3).

Таблица 3. Стандарт ISO 17745 (панели кольчужные из стальной проволоки), определяющий долговечность продукции в зависимости от окружающей среды и покрытия металлической проволоки

Уровень среды площадки (в соответствии со стандартом ISO 9223:2012 «Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная агрессивность атмосферы», таблица 4)	Покрытие	Класс (ISO 7989-2. Стальная проволока и проволочные изделия. Металлические покрытия из цветного металла стальной проволоки. Цинковое покрытие или покрытие из сплава на основе цинка)	Расчетный срок службы изделия (в годах)
Низкая агрессивность: (C2) Сухие условия работы Зона умеренного климата, атмосферная среда с низким уровнем загрязнения, соответствующая, например, сельской местности, небольшим городам (расположенным на высоте более 100 м над уровнем моря). Зона сухого или холодного климата, атмосферная среда с кратковременными периодами осадков, соответствующая, например, пустыням, субарктическим районам.	Цинк	A	25
	Сплав цинка (95 %) и алюминия (15 %)	A	50
		B	25
	Современное металлическое покрытие	A B	120 50
Средняя агрессивность: (C3) Сухие условия работы Зона умеренного климата, атмосферная среда со средним уровнем загрязнения и небольшим влиянием хлористых соединений, соответствующая, например, городским районам, прибрежным районам с низким уровнем осаднения хлористых соединений, таким как субтропической и тропической зоне, атмосферной среде с низким уровнем загрязнения.	Цинк	A	10
	Сплав цинка (95 %) и алюминия (15 %)	A	25
		B	10
	Современное металлическое покрытие	A B	50 25
Высокая агрессивность: (C4) Мокрые условия работы Зона умеренного климата, атмосферная среда с высоким уровнем загрязнения или значительным воздействием хлористых соединений, соответствующая, например, загрязненным городским районам, промышленным районам, прибрежным районам, без брызг соленой воды, подвергающихся сильному воздействию противогололедных солей, соответствующая, например, субтропической и тропической зоне, атмосферной среде со средним уровнем загрязнения, промышленным зонам, прибрежным зонам, укрытиям на береговой линии.	Сплав цинка (95 %) и алюминия (15 %)	A	10
	Современное металлическое покрытие	A B	25 10

Полевые испытания (согласно ETAG 027 и EAD 340059-00-0106) ►

Для определения эффективности работы и сравнения поведения динамических камнеулавливающих барьеров Европейская организация технических оценок (ЕОТА) в 2008 году опубликовала руководство ETAG 027, которое в июле 2018 года было заменено европейским нормативным документом по технической оценке EAD 340059-00-0106 (рис. 4–6). На сегодняшний день это фактически мировой стандарт для противокамнепадных барьеров. Согласно данному документу любой камнеулавливающий барьер должен быть испытан в условиях, приближенных к естественным. (В России используются стандарты [2, 3 и др.])

В том числе стандартизирована и процедура проведения полномасштабных полевых испытаний противокамнепадных барьеров. К единым стандартам приведены следующие параметры и условия:

- форма, размер и плотность каменного блока, используемого для испытаний;
- геометрия тестируемого камнеулавливающего барьера;
- характеристики воздействия;
- минимальная скорость удара (около 90 км/ч).

Кроме того, испытательная площадка должна иметь возможность запуска каменного блока как по вертикали, так и по наклонной траектории и должна обеспечивать отсутствие помех между каменным блоком и защитным сооружением во время удара. При этом необходимо про-

вести три испытания на двух камнеулавливающих барьерах: первый комплекс сооружений должен выдержать удар с максимальной энергией, которую он должен поглотить (MEL, Maximum Energy Level), приблизительно равную 3000 кДж. Второй комплекс сооружений, эквивалентный первому, должен остановить два последовательных удара с энергией эксплуатационной пригодности (SEL, Service Energy Level), составляющей около 1000 кДж (то есть $MEL \geq 3 SEL$).

Динамический камнеулавливающий барьер, выдерживающий энергию удара 8600 кДж (RMC 850/A) ►

Для защиты объекта на мысе Сисье был выбран динамический камнеулавли-



Рис. 7. Монтаж защитных систем при помощи вертолета

вающий барьер от компании Massafert, выдерживающий энергию удара 8600 кДж (RMC 850/A). Это первый во Франции динамический противокамнепадный барьер мощностью более 5000 кДж.

Полевые испытания RMC 850/A проводились на полигоне Massafert в Беллуно (Италия). Окончательный вариант имел следующие характеристики:

- энергоемкость E выше заявленной проектной, то есть более 8000 кДж (на момент проведения работ данный динамический камнеулавливающий барьер блочного типа был обладателем самых высоких эксплуатационных характеристик на рынке с точки зрения поглощения энергии удара по результатам испытаний для сертификации CE на соответствие требованиям технических регламентов Евросоюза);
- остаточная высота категории А ($\geq 50\%$ от номинальной высоты);
- отсутствие бокового отверстия;

- более низкий вес комплектующих для облегчения работы вертолета при установке;

- сертифицированная высота от 7,0 до 8,0 м, что соответствует техническим требованиям проекта.

Что касается защиты от коррозии различных элементов, входящих в защитный комплекс, выбор пал на покрытия, которые на момент проведения работ имели наилучшие характеристики на рынке в соответствии с испытаниями для сертификации CE.

Строительство защитных сооружений ►

С учетом статуса секретного объекта, а также в связи с наличием серьезных экологических ограничений работы проводились в течение трех лет в несколько этапов (в частности, для соблюдения периодов воспроизводства биологических видов, находящихся под охраной).

Этап 1: с ноября 2018 г. по февраль 2019 г. – завершение строительства первой части камнеулавливающих барьеров;

Этап 2: с августа 2019 г. по февраль 2020 г. – возведение второй части камнеулавливающих барьеров и накопительного «кармана»;

Этап 3: с августа 2020 г. по февраль 2021 г. – завершение работ по установке камнеулавливающих барьеров и закрепление неустойчивых мест, представляющих опасность от высокой до очень высокой и, вероятно, несущих угрозу превышения энергоемкости камнеулавливающих барьеров.

Для соответствия экологическим требованиям были приняты различные меры для ограничения вредного воздействия на участок со стороны строительства. В частности:

- охраняемые виды растений были отмечены цветными флажками, чтобы

облегчить их идентификацию и не допустить их повреждения;

- были размечены пешеходные дорожки и установлены деревянные настилы для предотвращения развития эрозии почв;
- установка камнеулавливающих барьеров была выполнена с оптимальным учетом экологических и топографических ограничений участка строительства; длина модулей была адаптирована для того, чтобы избежать установки анкеров в местах нахождения растений;
- была использована специальная процедура демонтажа прежних противокаменных барьеров с разрезанием сетчатых панелей во избежание выкорчевывания охраняемых видов растений;
- был изучен график работ с целью ограничения негативного воздействия

на ландшафт (в частности, для этапов доставки конструкций вертолетом был составлен план полетов с учетом экологической чувствительности).

При транспортировке конструкций вертолетом были заранее смонтированы опоры с передними и боковыми тросовыми оттяжками и гасителями энергии. Общий вес данных комплектующих составил менее 1000 кг, что было пределом возможности для вертолетной заброски.

Наличие сильного ветра и значительная высота стоек (почти 9 м) потребовали установки оттяжек вниз по склону во избежание опрокидывания стоек вверх по склону на начальном этапе монтажа.

В целом, установка камнеулавливающих барьеров осуществлялась быстро и легко за счет вертолетной заброски комплектующих (рис. 7).

Заключение ►

Несомненно, успешное осуществление проекта по защите от камнепадов станции очистки сточных вод «Амфитрия» на мысе Сисье во Франции имело огромное значение для экологии города Тулон, Лазурного Берега и Средиземного моря.

Однако представленные в статье материалы могут быть очень полезны для спонсоров, заказчиков, проектировщиков и строителей, занимающихся инженерной защитой объектов инфраструктуры от камнепадов и других опасных склоновых процессов и в России, а также в остальных странах СНГ.

Материалы о противокаменных барьерах широко представлены в том числе на страницах журнала «Геоинфо» (например, [4–8 и др.]). **и**

Источники ►

1. Grimod A., Haouy C. Securisation du front rocheux surplombant la station d'épuration Amphitria du cap Sicie a La Seyne-Sur-Mer [Protection of the rock face overhanging the Amphitria sewage plant of cape Sicie at Seyne-sur-Mer] // Travaux. Juin 2020. № 960. P. 37–45 (in Fr.).
2. СНиП 22-02-2003. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. М.: Росстрой, 2004.
3. ВСН 02-73. Указания по расчету снеговалавных нагрузок при проектировании сооружений. М.: Московское отделение Гидрометиздата, 1973.
4. Горбачева Т.М. Татьяна Горбачева: в России необходимо создать качественную нормативную базу по инженерной защите // Геоинфо. 28.09.2022. URL: geoinfo.ru/product/maccaferri/tatyana-gorbacheva-v-rossii-neobhodimo-sozdat-kachestvennuyu-normativnuyu-bazu-po-inzhenernoj-zashchite-47674.shtml.
5. В защите от опасных склоновых явлений залогом безопасности является компетенция // Геоинфо. 12.08.2022. URL: geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/v-zashchite-ot-opasnyh-sklonovyh-yavlenij-zalogom-bezopasnosti-yavlyatsya-kompetenciya-47429.shtml.
6. Кукло И.А. Об инновационном защитном покрытии для конструкций из стальной проволоки // Геоинфо. 24.12.2021. URL: geoinfo.ru/product/kuklo-ivan-aleksandrovich/ob-innovacionnom-zashchitnom-pokrytii-dlya-konstrukcij-iz-stalnoj-provoloki-46062.shtml.
7. Кукло И.А. Решения инженерной защиты прилегающих территорий ГЭС от камнепадов // Геоинфо. 15.11.2021. URL: geoinfo.ru/product/kuklo-ivan-aleksandrovich/resheniya-inzhenernoj-zashchity-prilegayushchih-territorij-gehs-ot-kamnepadov-45787.shtml.
8. Кукло И.А. Решения Маккаферри: эффективная защита от камнепадов // Геоинфо. 19.08.2021. URL: geoinfo.ru/product/kuklo-ivan-aleksandrovich/resheniya-makkaferri-ehffektivnaya-zashchita-ot-kamnepadov-45108.shtml.

References ►

1. Grimod A., Haouy C. Securisation du front rocheux surplombant la station d'épuration Amphitria du cap Sicie a La Seyne-Sur-Mer [Protection of the rock face overhanging the Amphitria sewage plant of cape Sicie at Seyne-sur-Mer] // Travaux. Juin 2020. № 960. P. 37–45 (in Fr.).
2. SNiP 22-02-2003. Inzhenernaya zashchita territoriy, zdaniy i sooruzheniy ot opasnyh geologicheskikh protsessov. Osnovniye polozheniya [Engineering protection of territories, buildings and structures from hazardous geological processes. Basic provisions.]. М.: Rosstroy, 2004 (in Rus.).
3. VSN 02-73. Ukazaniya po raschetu snegolavinyh nagruzok pri proyektirovanii sooruzheniy [Guidelines for the calculation of snow-avalanche loads for the design of structures]. М.: Moskovskoye otdeleniye Gidrometizdata, 1973 (in Rus.).
4. Gorbacheva T.M. Tat'yana Gorbacheva: v Rossii neobhodimo sozdat' kachestvennuyu normativnuyu bazu po inzhenernoy zashchite [Tat'yana Gorbacheva: in Russia, it is necessary to create a high-quality regulatory framework for engineering protection]. Geoinfo. 28.09.2022. URL: geoinfo.ru/product/maccaferri/tatyana-gorbacheva-v-rossii-neobhodimo-sozdat-kachestvennuyu-normativnuyu-bazu-po-inzhenernoj-zashchite-47674.shtml (in Rus.).

5. 5.V zashchite ot opasnyh sklonovyh yavleniy zalogom bezopasnosti yavlyatsya kompetentsiya [In protection against dangerous slope phenomena, the guarantee of safety is competence]. Geoinfo. 12.08.2022. URL: geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/v-zashchite-ot-opasnyh-sklonovyh-yavlenij-zalogom-bezopasnosti-yavlyatsya-kompetenciya-47429.shtml (in Rus.).
6. 6.Kuklo I.A. Ob innovatsionnom zashchitnom pokrytii dlya konstruktsiy iz stal'noy provoloki [On the innovative protective coating for steel wire structures]. Geoinfo. 24.12.2021. URL: geoinfo.ru/product/kuklo-ivan-aleksandrovich/ob-innovatsionnom-zashchitnom-pokrytii-dlya-konstrukcij-iz-stalnoj-provoloki-46062.shtml (in Rus.).
7. 7.Kuklo I.A. Resheniya inzhenernoy zashchity prilegayushchih territoriy GES ot kamnepadov [Solutions for engineering protection of adjacent territories of a HPP against rockfalls]. Geoinfo. 15.11.2021. URL: geoinfo.ru/product/kuklo-ivan-aleksandrovich/resheniya-inzhenernoj-zashchity-prilegayushchih-territorij-gehs-ot-kamnepadov-45787.shtml (in Rus.).
8. 8.Kuklo I.A. Resheniya Makkaferri: ehffektivnaya zashchita ot kamnepadov [Maccaferri solutions: effective rockfall protection]. Geoinfo. 19.08.2021. URL: geoinfo.ru/product/kuklo-ivan-aleksandrovich/resheniya-makkaferri-ehffektivnaya-zashchita-ot-kamnepadov-45108.shtml (in Rus.).

Информация об авторе

ГОРБАЧЁВА ТАТЬЯНА МИХАЙЛОВНА

Руководитель направления «Инженерная защита от опасных геологических процессов» ООО «Габiony Маккаферри СНГ»

Information about the author

TAT'YANA M. GORBACHEVA

Head of the domain on engineering protection against hazardous geological processes at the ООО “Gabiony Maccaferri SNG” [Gabions Maccaferri CIS LLC]

EngGeo

инженерно-геологические
изыскания

8 (499) 110-06-51

Программный комплекс EngGeo Обработка и хранение результатов инженерно-геологических изысканий



ОСНОВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

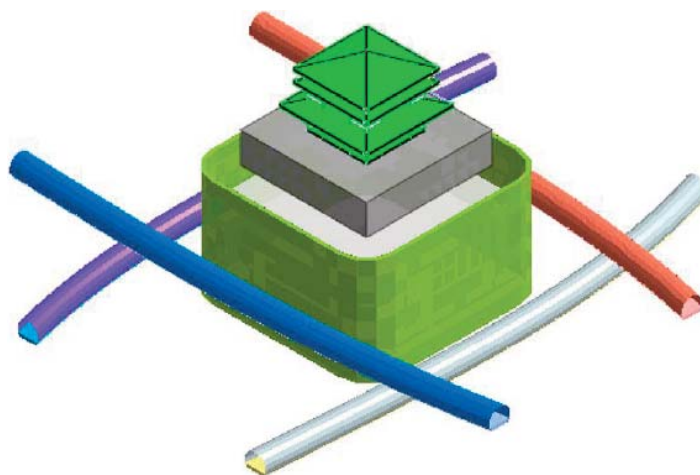
- полный комплекс лабораторных испытаний грунтов и вод;
- полевые испытания грунтов;
- статистическая обработка результатов испытаний;
- выходные ведомости и таблицы в форматах Word и Excel;
- использование сетевой или локальной базы данных объектов работ;
- построение колонок скважин и разрезов в графической среде AutoCAD (AutoCAD LT является отдельной линейкой продуктов и не поддерживается), nanoCAD или MicroStation;

По вопросам приобретения или обновления Вы можете написать на sales@enggeo.net

Обратиться в поддержку можно по адресу support@enggeo.net

Или обратиться по телефону +7 (499) 110-06-51

WWW.ENGCEO.RU



ВОЗДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИЙ, ВЫЗВАННЫХ РАБОТОЙ МЕТРО, НА КОЛОКОЛЬНУЮ БАШНЮ В СИАНЕ (КИТАЙ)

Репринт, переводная статья

Поступила в редакцию: 01.12.2022. Принята к публикации: 15.12.2022. Дата публикации: 06.02.2023.

© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2022

Лай Цз.

Автодорожный факультет Чанъаньского университета
Адрес: г. Сиань, 710064, пров. Шаньси, Китай

Ню Ф.

Автодорожный факультет Чанъаньского университета
Адрес: г. Сиань, 710064, пров. Шаньси, Китай

Ван К.

Автодорожный факультет Чанъаньского университета,
372836091@qq.com
Адрес: г. Сиань, 710064, пров. Шаньси, Китай
Первый китайский железнодорожный проектно-
изыскательский институт (FSDI) Китайской
железнодорожной строительной корпорации (CRCC)
Адрес: г. Сиань, 710043, пров. Шаньси, Китай

Чэнь Цз.

Автодорожный факультет Чанъаньского университета
Адрес: г. Сиань, 710064, пров. Шаньси, Китай

Цю Цз.

Автодорожный факультет Чанъаньского университета,
870133597@qq.com
Адрес: г. Сиань, 710064, пров. Шаньси, Китай

Фань Х.

Автодорожный факультет Чанъаньского университета
Адрес: г. Сиань, 710064, пров. Шаньси, Китай

Ху Чж.

Факультет гражданского строительства
Шицзячжуанского университета Тедао
Адрес: г. Шицзячжуан, 050043, пров. Хэбэй, Китай

АННОТАЦИЯ

Продолжаем знакомить наших читателей с использованием программной продукции южнокорейской компании MIDAS IT, основанной в 2000 году в Сеуле. Программы, разработанные в этой компании, используются в 136 странах мира для моделирования, комплексного проектирования и анализа в области транспортного, геотехнического, промышленного и гражданского строительства и обеспечивают безопасность, эффективность и конкурентоспособность инженерных проектов. В том числе с помощью продуктов MIDAS IT был спроектирован знаменитый небоскреб Бурдж Халифа в Дубае ОАЭ и прекрасный трехкилометровый вантовый мост Русский в российском Владивостоке. В 2013 году было открыто российское представительство этой компании – ООО «МИДАС». На территории РФ сейчас представлено три конечноэлементных расчетных комплекса MIDAS IT, адаптированных для соответствия требованиям российских нормативных документов, – midas GTS NX, midas Civil и midas FEA NX. Программа midas GTS NX предназначена для комплексных геотехнических расчетов, моделирования и анализа поведения грунтов и их взаимодействий с инженерными конструкциями.

Сегодня представляем адаптированный и немного сокращенный перевод статьи «Динамическое воздействие вибраций, вызванных работой метро, на уплотненное грунтовое основание Колокольной башни», которая была опубликована в 2016 году на английском языке в журнале SpringerPlus и находится в открытом доступе (онлайн). Авторами указанной статьи являются специалисты из Чанъаньского университета (г. Сиань, Китай) и Шицзячжуанского университета Тедао (г. Шицзячжуан, Китай) – Цзиньсин Лай, Фаньюань Ню, Кэ Ван, Цзяньсюнь Чэнь, Цзюньлин Цю, Хаобо Фань и Чжинань Ху. Ссылка на эту работу приведена в конце перевода.

Колокольная башня в городе Сиань провинции Шаньси является средневековым архитектурным памятником Китая, охраняемым государством. Вибрации, вызванные работой метро, могут оказать на нее негативное влияние. В статье рассказывается о трехмерном конечноэлементном моделировании для прогнозирования максимальной скорости колебаний (peak period velocity, PPV) в уплотненном грунтовом основании и цоколе башни, когда под ними проходят поезда метро. Численные прогнозы показали значительное влияние мер по демпфированию вибраций путей под идущими поездами, которые, очевидно, могут и на практике снизить скорости колебаний грунтового основания и самой башни. При этом максимальное снижение PPV ее цоколя может достигнуть 78,91%. Интересно, что результаты расчетов в модели и данные полевых испытаний (пока не таких расширенных, как исследование моделей) оказались в хорошем соответствии друг с другом.

Предложенный вид прогноза может использоваться в качестве инструмента принятия решений и управления для оценки рисков, связанных с влиянием вибраций от работы метро на здания и сооружения в городских районах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

вибрации от метро; Колокольная башня Сианя; метод конечных элементов (МКЭ); тоннель; максимальная скорость колебаний (PPV).

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Лай Цз., Нью Ф., Ван К., Чэнь Цз., Цю Цз., Фань Х., Ху Чж. Воздействие вибраций, вызванных работой метро, на Колокольную башню в Сиане (Китай) // ГеоИнфо. 2022. № 12. С. 56–72

THE EFFECTS OF METRO-INDUCED VIBRATIONS ON THE BELL TOWER IN XI'AN (CHINA)

Translated paper

Received 01.12.2022. Accepted 15.12.2022. Published 06.02.2023.

© Independent electronic journal "GeoInfo", 2022

JINXING LAI

School of Highway, Chang'an University
Address: Xi'an 710064, Shaanxi, China

FANGYUAN NIU

School of Highway, Chang'an University
Address: Xi'an 710064, Shaanxi, China

KE WANG

School of Highway, Chang'an University,
372836091@qq.com
Address: Xi'an 710064, Shaanxi, China
China Railway First Survey and Design Institute Group Co.
Ltd., China Railway Construction Corporation Ltd.
Address: Xi'an 710043, Shaanxi, China

JIANXUN CHEN

School of Highway, Chang'an University
Address: Xi'an 710064, Shaanxi, China

JUNLING QIU

School of Highway, Chang'an University,
870133597@qq.com
Address: Xi'an 710064, Shaanxi, China

HAOBO FAN

School of Highway, Chang'an University
Address: Xi'an 710064, Shaanxi, China

ZHINAN HU

School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University
Address: Shijiazhuang 050043, Hebei, China

ABSTRACT

We are continuing to familiarize our readers with the use of software products of the South Korean company MIDAS IT founded in 2000 in Seoul. The programs developed in this company are used in 136 countries of the world for modeling, integrated design and analysis in the field of transport, geotechnical, industrial and civil construction. They ensure the safety, efficiency and competitiveness of engineering projects. Among other things, the famous Burj Khalifa skyscraper in Dubai (UAE) and the beautiful three-kilometer cable-stayed Russian Bridge in Russian Vladivostok were designed with the help of MIDAS IT products. In 2013, the Russian representative office (LLC "MIDAS") of this company was opened (midasoft.ru/; geoinfo.ru/brand/midas-it/). Three MIDAS IT finite element software products adapted to meet the requirements of the Russian regulatory documents are currently presented in the territory of the Russian Federation. They are midas GTS NX, midas Civil, and midas FEA NX. The midas GTS NX program is designed for geotechnical calculations, modeling and analysis of the behavior of soils and their interactions with engineering structures.

Today, we present to the readers a slightly reduced and adapted translation of the article "Dynamic effect of metro-induced vibration on the rammed earth base of the Bell Tower" published in 2016 in English in the journal "SpringerPlus". It is in open access (online). The authors of this article are specialists from Chang'an University (Xi'an, China) and Shijiazhuang Tiedao University (Hebei, China). They are Jinxing Lai, Fangyuan Niu, Ke Wang, Jianxun Chen, Junling Qiu, Haobo Fan, and Zhinan Hu. A bibliographic reference to this paper is given at the end of the translation. Xi'an Bell Tower (the Bell Tower) is a state-level ancient relic in China. The vibrations caused by the metro will exert adverse effect on the Bell Tower. This paper aims at presenting 3D FEM models to predict the peak period velocity

(PPV) of the pedestal and rammed earth base of the tower when metro trains passing under them. The numerical predictions indicated that the mitigating effect of shock absorption measures for the metro tracks are significant. They can obviously decrease the vibrations of the pedestal and soil base of the Bell Tower, and the maximum decrease of PPV of the pedestal can be 78.91%. The calculation results were compared with those of field tests. They were found to be in good agreement.

The proposed prediction type has the potential to be developed as a decision and management tool for the evaluation of the risks associated with the influence of metro-induced vibrations on buildings in urban areas.

KEYWORDS:

metro-induced vibrations; Bell Tower; finite element method (FEM); tunnel; peak period velocity (PPV).

FOR CITATION:

Lai J., Niu F., Wang K., Chen J., Qiu J., Fan H., Hu Z. Vozdeystviye vibratsiy, vyzvannyh rabotoy metro, na Kolokol'nyu bashnyu v Siane (Kitay) [The effects of metro-induced vibrations on the Bell Tower in Xi'an (China)]. *GeoInfo*. 2022. 12: 56–72

ВВЕДЕНИЕ

Будучи одной из четырех наиболее древних столиц в мире, Сиань успел побывать столицей тринадцати династий в истории Китая. Достопримечательность этого города Колокольная башня является ценным архитектурным памятником. Ее история насчитывает более 600 лет, но в течение такого долгого времени ее прочность постепенно ослабевала. К тому же сейчас в Сиане наблюдается бум строительства метро, что неизбежно вызовет вибрации этой башни, даже малейшие из которых постепенно могут привести к ее усталостно-механическому разрушению.

В 1970–1990-х годах некоторые исследователи анализировали закономерности деформирования и разрушения древних зданий и сооружений под воздействием вибраций в соответствии с полевыми испытаниями (Mata, 1971; Rueker, 1982; Ellis, 1987; Clemente, Rinaldis, 1998). В то же время некоторые европейские и американские специалисты проводили исследования по защите архитектурных памятников от вибраций, вызванных движением транспорта (Lang, 1971; Dawn, Stanworth, 1979; Kurzweil, 1979). Позже использовались и такие более новые методы, как создание искусственных нейронных сетей и численное моделирование для изучения вибраций зданий и сооружений при сейсмических воздействиях (Degrande, De Roeck, 1998; Degrande, Lombaert, 2001; Lombaert et al., 2006; Real et al., 2015; Real, 2014; Lai et al., 2014, 2015a, 2016b; Ye et al. 2014; Li et al., 2013; Han, Jia, 2015; Han et al., 2014).

В последние годы некоторые ученые исследовали структурные и механические характеристики зданий и сооружений под действием энергии вибраций. Например, доктор Цзя Инсюнь и его коллеги изучали влияние вибраций на

архитектурные памятники со стороны линий пекинского метро № 6 и № 8 (Luo et al., 2015; Yu, Fang, 2006; Jia et al., 2009; Xie, 2008). Их результаты показали, что динамические реакции конструкций древнего здания, вызванные вибрациями от прохождения поезда метро, менялись в зависимости от горизонтального и вертикального состояний.

Чтобы лучше понять такие воздействия и найти пути сохранения архитектурных памятников в соответствующих условиях, были проведены измерения вибраций на перевале Ханьгу рядом с железнодорожной линией Лунхай в китайском городском округе Лоян (Ye et al., 2015) и последующий анализ полученных данных методом конечных элементов. Результаты показали, что от вибраций окружающей среды древний памятник может защититься, например, изолирующая траншея.

Другой пример. Чтобы обеспечить безопасность и устойчивость тоннеля метро при взрывных работах для сноса путепровода, Чжао и др. (Zhao et al., 2015) предложили композитные защитные конструкции из металла и резины и выполнили проверочный расчет безопасности тоннеля метро на основе этих защитных мер с помощью численного моделирования, после чего система композитной защиты была дополнительно оптимизирована.

Авторами данной статьи было изучено влияние вибраций от работы метро на уплотненное грунтовое основание и цоколь Колокольной башни Сианя, что может быть ценным опытом для охраны подобных культурных реликвий. Чтобы оценить устойчивость башни, сначала были проведены полевые изыскания в целях получения инженерных характеристик ее грунтового

основания и цоколя и построения соответствующей конечноэлементной модели. Кроме того, было рассмотрено множество стандартов вибрационной безопасности зданий и найдены наиболее подходящие из них для Колокольной башни. Авторы создали трехмерные конечноэлементные модели для имитации эксплуатационного режима при наличии или отсутствии амортизации путей метро и при различных скоростях поездов. И наконец, результаты расчетов были сопоставлены с данными полевых испытаний для проверки правильности итогов выполненного исследования.

О КОЛОКОЛЬНОЙ БАШНЕ СИАНЯ

Колокольная башня, символ Сианя (рис. 1), была построена во времена династии Мин (в 1384 году. – *Ред.*) и представляла собой классическую китайскую постройку из кирпича и дерева. (Сначала ее возвели, чтобы изгнать мифического подземного змея, который якобы вызывал частые землетрясения в Сиане, но потом землетрясения надолго прекратились и здание стало выполнять новую функцию. В башне повесили большой колокол, который каждое утро возвещал о начале трудового дня, откуда в итоге и пошло ее название. В 1582 году ее разобрали и вновь собрали на заново построенном фундаменте в новом центре выросшего города, а в 1739 году реконструировали. Башня имеет высоту 36 м и опирается на квадратный цоколь из зеленого кирпича площадью 1377 м² и высотой 8,6 м. Выше она имеет три деревянных яруса с темно-зелеными черепичными крышами, углы которых приподняты вверх. Интересно, что при ее строительстве использовались не гвозди, а только пазы и выступы на



Рис. 1. Колокольная башня Сианя



Рис. 2. Одна из трещин, обнаруженных внутри Колокольной башни



Рис. 3. Один из расслоившихся кирпичей, обнаруженных в цоколе Колокольной башни

самых конструкциях. Внутри здание имеет спиралевидную лестницу и украшено традиционными узорами эпох Цин и Мин. Сегодня в Колокольной башне находится музей восковых фигур императоров династий Цинь, Хань и Тан и музей музыкальных инструментов, а также представлена антикварная мебель Цинской эпохи. Вечером она ярко подсвечивается снаружи (ru.wikipedia.org/wiki/Колокольная_башня; advantour.com/rus/china/xian/bell-tower.htm). – Ред.)

Корпус башни опирается на 4 центральные и 12 периферических несущих колонн, соединяющихся балками (Meng, 2009). За долгую историю ее неоднократно ремонтировали, но все-таки она приобрела достаточно много повреждений, которые были выявлены при оценочных работах в 2008 году (рис. 2, 3). Также были выполнены специальные инженерно-геологические изыскания, некоторые результаты которых показаны на рисунке 4 (Chen, 2008).

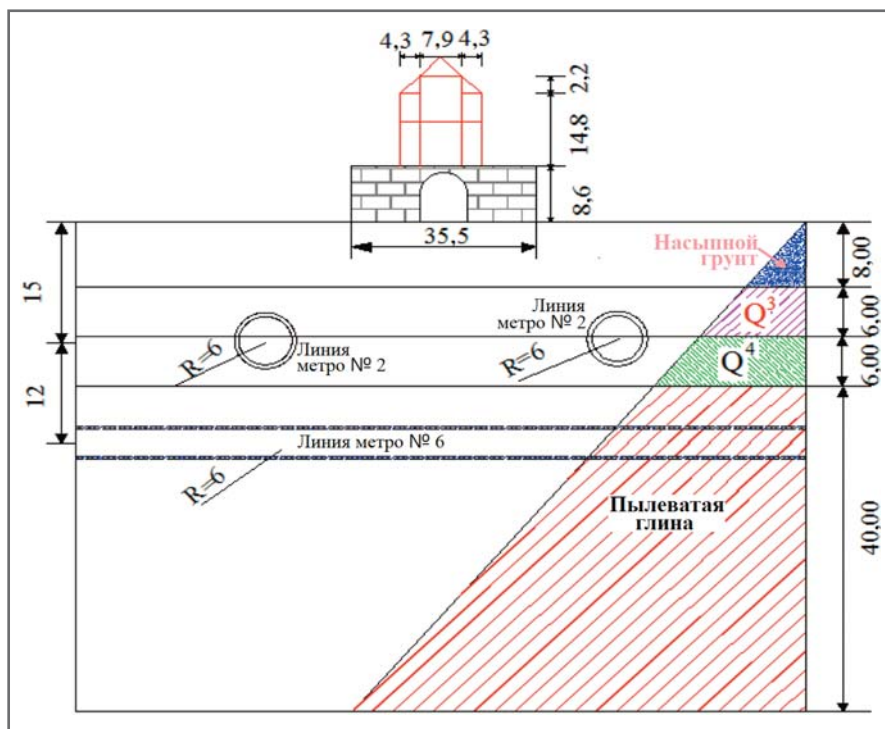


Рис. 4. Схематичный вертикальный разрез Колокольной башни и ее основания. Двойными окружностями показаны тоннели метро. Размеры указаны в метрах

Таблица 1. Ориентировочные значения оценочного параметра вибраций, вызывающие повреждения зданий и сооружений, по стандартам разных стран

Нормативный документ по вибрациям	Оценочный параметр	Оцениваемые объекты	Ориентировочное значение, мм/с
ISO 4866:2010 (ISO, 2010)	PPV	Древние архит. памятники	2,5
Germany DIN4150-3:1999 (Germany, 1999)	PPV	Древние архит. памятники	3–10
UK BS7385-2 (UK, 1993)	PPV	Древние архит. памятники	7,5
Switzerland 6.10SN640312:1992 (Swiss, 1992)	PPV	Старые и плохо обслуживаемые здания	2
Portugal (Meng, 2009)	PPV	Древние архит. памятники	2,5
Japan (Cao, 2006)	PPV	Древние архит. памятники	5
China GB10070-88 (China, 2003)	PPV	Древние архит. памятники (развитие трещин и выветривание)	1,8–3,0
China GB/T50452:2008 (China, 2008)	PPV	Древние архит. памятники	3–5
State Administration of Cultural Heritage (Meng, 2009)	PPV	Колокольная башня и Городская стена	0,15–0,2

Примечание: PPV – пиковая скорость частиц при колебаниях (Peak Period Velocity).

СТАНДАРТЫ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ВИБРАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В разных странах, включая Америку, Великобританию, Германию, Японию, Португалию, Швейцарию и Китай, существуют свои стандарты вибрационной безопасности (таблица 1). Эти стандарты сильно различаются для разных сред и конструкций. Однако физическими параметрами, используемыми для анализа воздействия вибраций на здания и сооружения, всегда являются скорость и частота колебаний, которые напрямую связаны со степенью повреждения конструкций и играют в этом решающую роль. В документе «План города Сиань по защите культурных реликвий в ситуации, когда линия метро № 2 проходит под Колокольной башней и Городской стеной», составленном Национальным управлением по культурному наследию Китая, было предложено установить допустимую максимальную (пиковую) скорость колебаний (peak period velocity, PPV) Колокольной башни и Городской стены, вызванную вибрациями от работы метро, в пределах 0,15–0,20 мм/с, что и было принято (Ma et al., 2016).

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

Рассмотренные комбинации линий метро и скоростей поездов

Под Колокольной башней проходят линии метро № 2 и № 6 (см. рис. 4). При конечноэлементном моделировании авторы рассматривали шесть наборов условий (комбинаций) (таблица 2) и разные скорости поездов (20, 40, 60 и 80 км/ч для каждой комбинации).

Численные модели

В этом исследовании трехмерные конечноэлементные модели для про-

Таблица 2. Наборы условий (комбинации), рассмотренные при моделировании

Набор условий	Тип пути	Комбинация линий метро	Количество поездов
1	обычный	№ 2 + № 6	4
2	обычный	№ 2 + № 2	2
3	обычный	№ 6 + № 6	2
4	амортизирующий	№ 2 + № 6	4
5	амортизирующий	№ 2 + № 2	2
6	амортизирующий	№ 6 + № 6	2

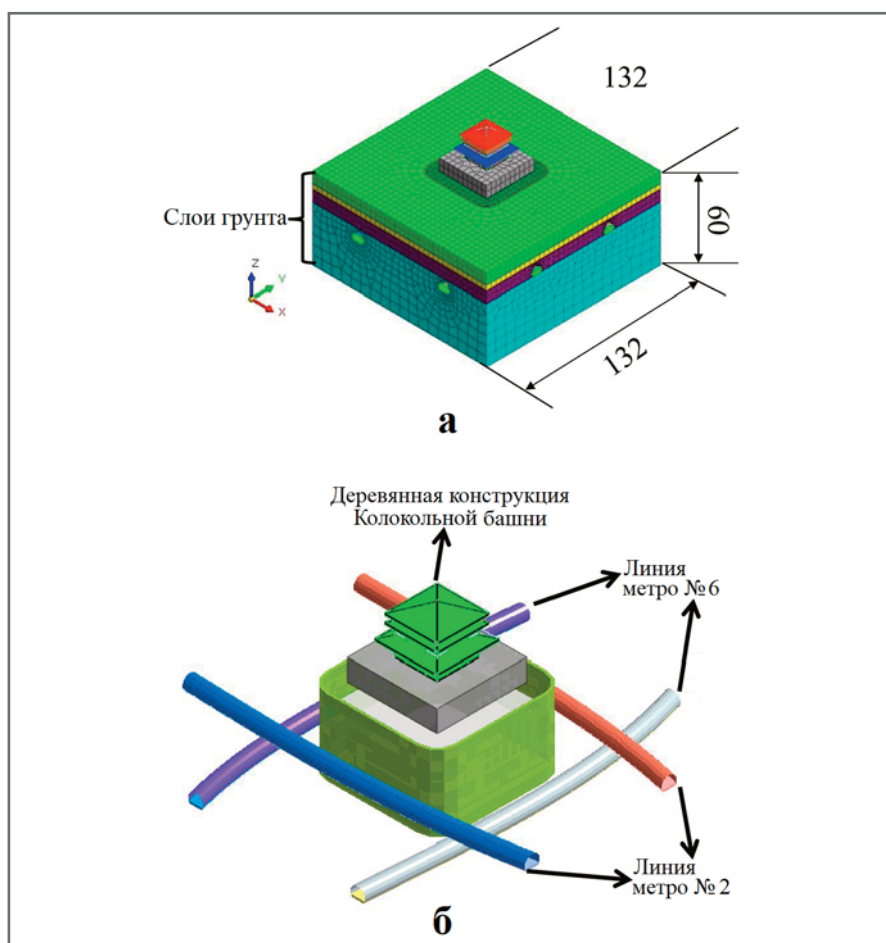


Рис. 5. Сетка конечных элементов модели (размеры указаны в метрах) (а) и расположение тоннелей метро относительно Колокольной башни (б)

Таблица 3. Параметры грунтов основания Колокольной башни для численной модели

Параметр	Ед. изм.	Насыпной грунт	Q ³	Q ⁴	Пылеватая глина
Высота (мощность) (H)	м	8	3,5	8	40
Модуль Юнга (E)	МПа	110	403	495	622
Коэффициент Пуассона (ν)	-	0,175	0,163	0,160	0,158
Удельное сцепление (C)	кПа	24,3	25,3	37,5	35,5
Угол внутреннего трения (φ)	° (град.)	12	12,5	20,2	25,2
Удельный вес (γ)	кН/м³	17,8	20,4	20,2	20,6

Таблица 4. Параметры инженерных конструкций для численной модели

Элементы модели	ρ (г/см ³)	E (ГПа)	ν	C (кПа)	Φ (°)
Грунтоцем. свай	2,3	39	0,29	–	–
Цоколь башни	1,67	3	0,3	48	35
Обделка тоннелей	2,5	40	0,29	–	–
Пути	2,4	46	0,3	–	–

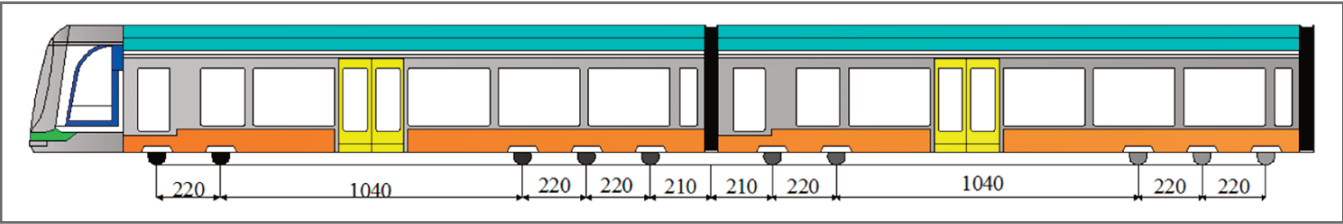


Рис. 6. Схема двух вагонов поезда метро Сианя с указанием расстояний между осями колесных пар (см)

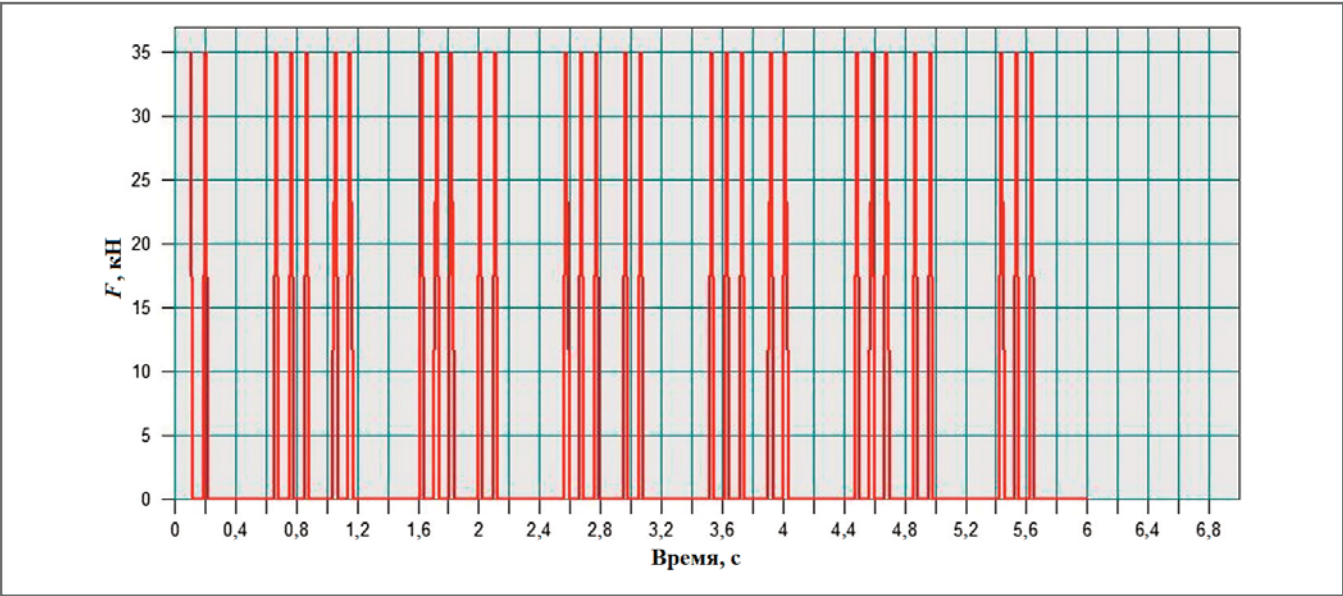


Рис. 7. Динамические нагрузки от поезда, движущегося со скоростью 80 км/ч (по результатам работы в программе midas GTS NX)

гнозирования влияния линий метро № 2 и № 6 на Колокольную башню были созданы в программе midas GTS NX (MIDAS Co., Ltd) (рис. 5). Обычная конструкция из кирпичной кладки, слои грунта и амортизирующие пути метро были представлены объемными элементами, обделка тоннелей – оболочечными элементами, грунтоцементные сваи (изготовленные методом струйной цементации) под конструкцией из кирпичной кладки – пластинчатыми элементами, деревянные балки и колонны – балочными элементами, стальные пружины на плавающей (свободно лежащей)

плите амортизирующих путей – упругими соединительными элементами (с жесткостью 6900 кН/м и шагом 1,2 м) (Meng, 2009). Грунтовый массив в модели был упрощенно принят состоящим из четырех слоев. Показатели свойств модельного грунта показаны в таблице 3 (Chen, 2008). Параметры других элементов (инженерных конструкций) модели представлены в таблице 4.

Период колебаний и приращение времени

В соответствии с различной частотой дискретизации период колебаний

и приращение времени при решении задач по вибрации той или иной среды рассмотрены во многих публикациях (например, Ma et al., 2016; Lai et al., 2016 a, b, c). Результаты исследований показывают, что если минимальный период колебаний в модели в 50 раз превышает размер приращения времени, то не может быть учтена погрешность результатов вычислений. Период колебаний грунтового основания Колокольной башни составляет 0,29–0,40 с, поэтому, когда размер приращения времени составляет 0,005 с, точность расчетов соответствует требованиям.

Уравнение для динамического анализа

Уравнение, описывающее движения конструктивной системы на основе принципа Гамильтона (Meng, 2009), выглядит следующим образом:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}, \quad (1)$$

где $[M]$, $[C]$, $[K]$ – матрица масс, матрица демпфирования и матрица жесткости системы соответственно, причем они объединены с матрицей масс, матрицей демпфирования и матрицей жесткости всех элементов системы; $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$ – вектор ускорения, вектор скорости и вектор смещения системы соответственно; $F(t)$ – вектор узловых усилий, изменяющийся во времени.

Матрица масс, матрица демпфирования и матрица жесткости, а также вектор узловых усилий рассчитываются по формулам (соответственно):

$$[M_e] = \iiint \rho [N]^T [N] dV; \quad (2a)$$

$$[C_e] = \iiint c [N]^T [N] dV; \quad (2б)$$

$$[K_e] = \iiint [B]^T [D] [B] dV; \quad (2в)$$

$$[F_e] = \iiint [N]^T \{f\} dV + \iint [N]^T \{\bar{p}\} dS. \quad (2д)$$

Обычно принимается, что между матрицей демпфирования и матрицей масс и матрицей жесткости имеется прямо пропорциональная связь, то есть принимается демпфирование Рэлея (Chen, 2008), и соответствующая формула выглядит так:

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]. \quad (3)$$

В соответствии с условием ортогональности форм колебаний неопределенные константы α и β (коэффициенты демпфирования Рэлея) и коэффициент демпфирования ξ_k должны удовлетворять следующему уравнению:

$$\xi_k = \frac{\alpha}{2\omega_k} + \frac{\beta\omega_k}{2} \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (4)$$

где ω_k – собственная частота колебаний.

Уравнение свободных колебаний системы можно использовать для расчета собственных частот ω_i и ω_j , а на основе испытаний и данных по аналогичным конструкциям можно определить коэффициенты демпфирования ξ_i и ξ_j . Из формулы (4) можно получить значения коэффициентов демпфирования Рэлея α и β . Если $\xi_i = \xi_j$, а ω_0 и ξ_0 – соот-

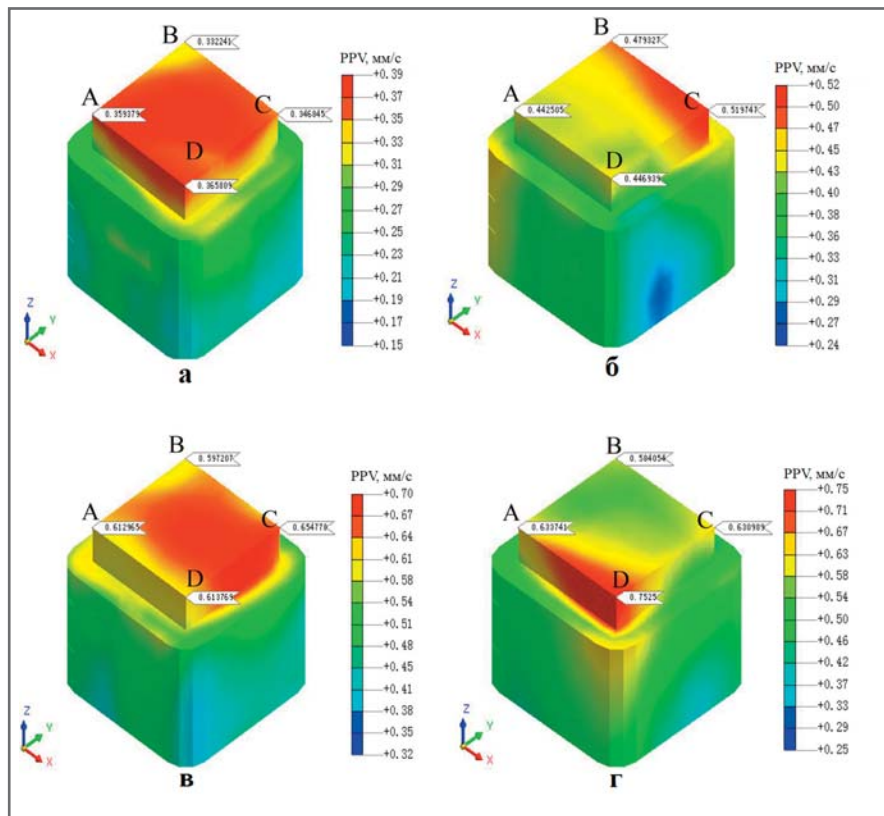


Рис. 8. Распределение PPV в уплотненном грунтовом основании и цоколе Колокольной башни для набора условий 1 (см. таблицу 2) при скоростях движения поездов: 20 км/ч (а), 40 км/ч (б), 60 км/ч (в) и 80 км/ч (г)

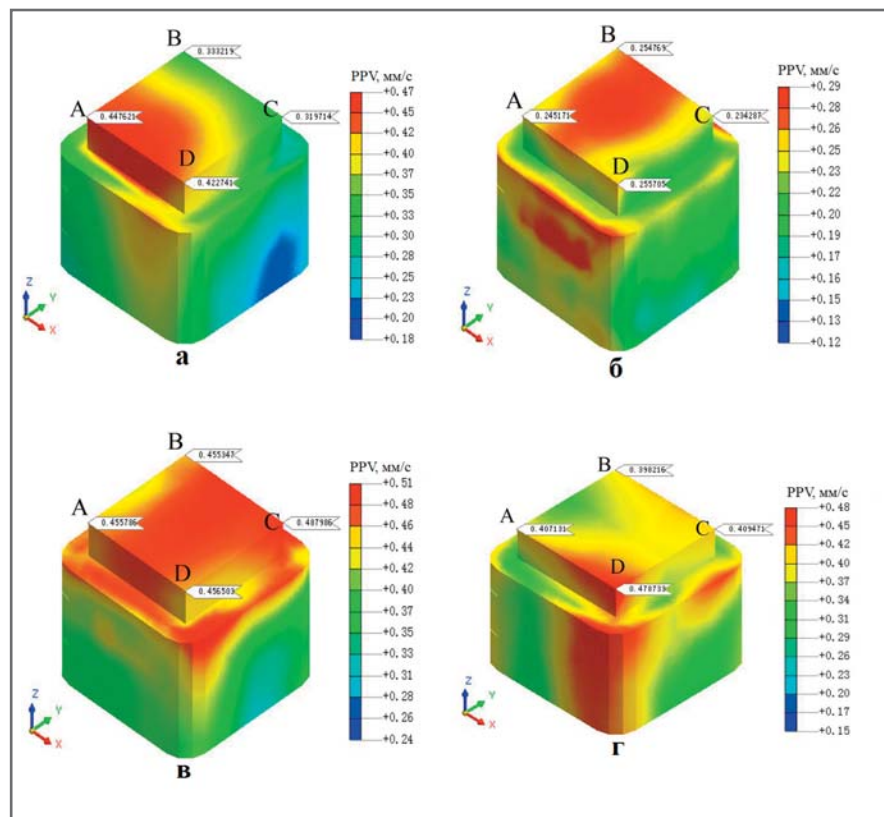


Рис. 9. Распределение PPV в уплотненном грунтовом основании и цоколе Колокольной башни для набора условий 2 (см. таблицу 2) при скоростях движения поездов: 20 км/ч (а), 40 км/ч (б), 60 км/ч (в) и 80 км/ч (г)

ветственно основная (фундаментальная) частота системы и коэффициент демпфирования соответствующего вида колебаний, то можно получить следующую

щие взаимосвязи:

$$\begin{cases} \alpha = \xi_0 \omega_0 \\ \beta = \xi_0 / \omega_0 \end{cases} \quad (5)$$

Граничные условия

Когда для моделирования вибраций используется метод конечных элементов, границы модели будут генерировать отражения, что приведет к искажениям результатов вычислений. Чтобы этого избежать, при моделировании устанавливались искусственные вязкоупругие граничные условия (Meng, 2009). Вязкая искусственная граница в конечноэлементной модели не только может имитировать «отрезанную» часть грунта и его жесткость, но и позволяет избежать отражений волн от границы (MIDAS Co., Ltd). В одной из своих лекций Чэнь (Chen, 2008) предложил использовать искусственные силы вязкого демпфирования в двух направлениях вдоль граничной поверхности, величины которых определяются следующим образом:

$$\begin{cases} \bar{\sigma} = a \rho v_p \dot{w} \\ \bar{\tau} = b \rho v_s \dot{u} \end{cases} \quad (6)$$

где $\bar{\sigma}$, $\bar{\tau}$ – соответственно нормальное и касательное (сдвиговое) напряжение вдоль искусственной границы; $\dot{w}$, $\dot{u}$ – соответственно нормальная и тангенциальная составляющие скорости вдоль границы; v_p , v_s – скорости падающих волн сжатия (продольных) и сдвига (поперечных) соответственно; a , b – коэффициенты, значения которых можно найти в вышеупомянутой лекции Чэня.

Нагрузки от движения поездов метро

Вибрации при работе метро вызываются динамическими нагрузками от движения поездов. В программе midas GTS NX представлено много видов поездов, и просто требуется ввести некоторые их характеристики (MIDAS Co., Ltd), такие как тип поезда, количество колесных пар, расстояние между осями колесных пар, скорость поезда, длина пробега и др. Составы поездов в метро Сианя имеют по шесть вагонов (Meng, 2009). При моделировании был принят стандартный поезд EL-18 (MIDAS Co., Ltd). Соответствующие количество колесных пар и расстояния между ними

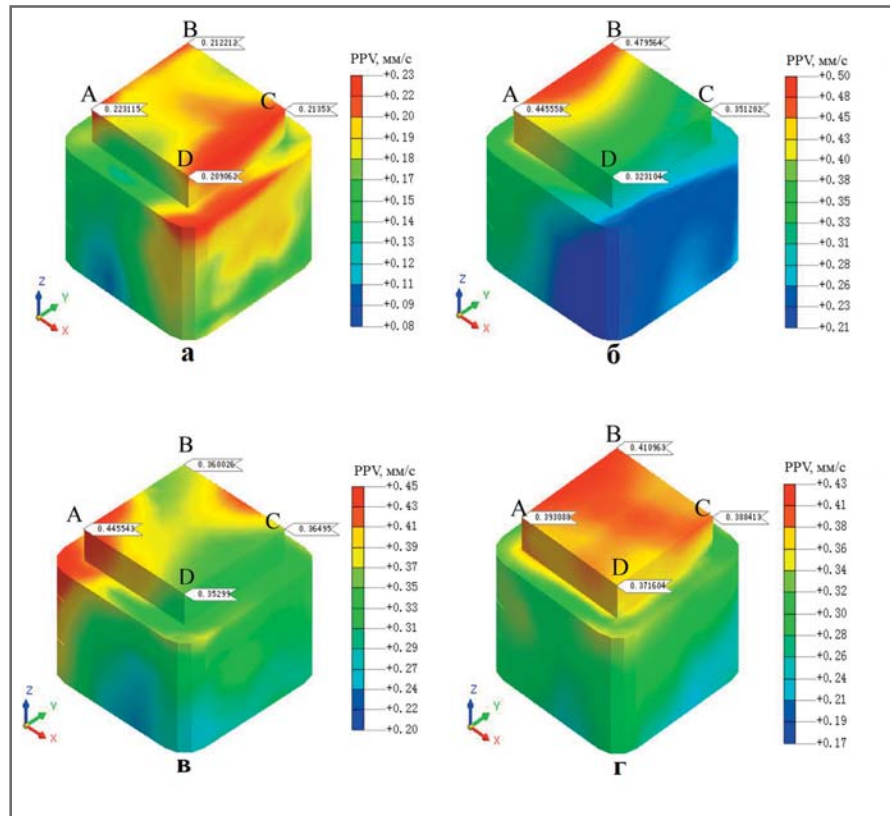


Рис. 10. Распределение PPV в уплотненном грунтовом основании и цоколе Колокольной башни для набора условий 3 (см. таблицу 2) при скоростях движения поездов: 20 км/ч (а), 40 км/ч (б), 60 км/ч (в) и 80 км/ч (г)

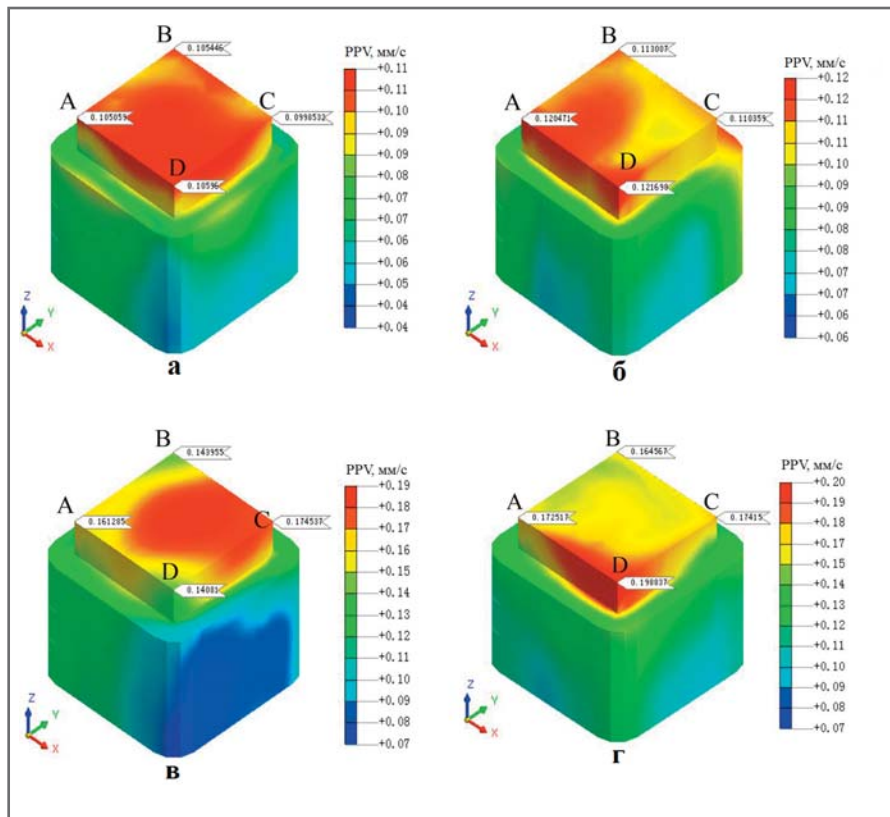


Рис. 11. Распределение PPV в уплотненном грунтовом основании и цоколе Колокольной башни для набора условий 4 (см. таблицу 2) при скоростях движения поездов: 20 км/ч (а), 40 км/ч (б), 60 км/ч (в) и 80 км/ч (г)

ми показаны на рисунке 6. Реакции Колокольной башни на вибрационные воздействия моделировались для скоростей поездов 20, 40, 60 и 80 км/ч.

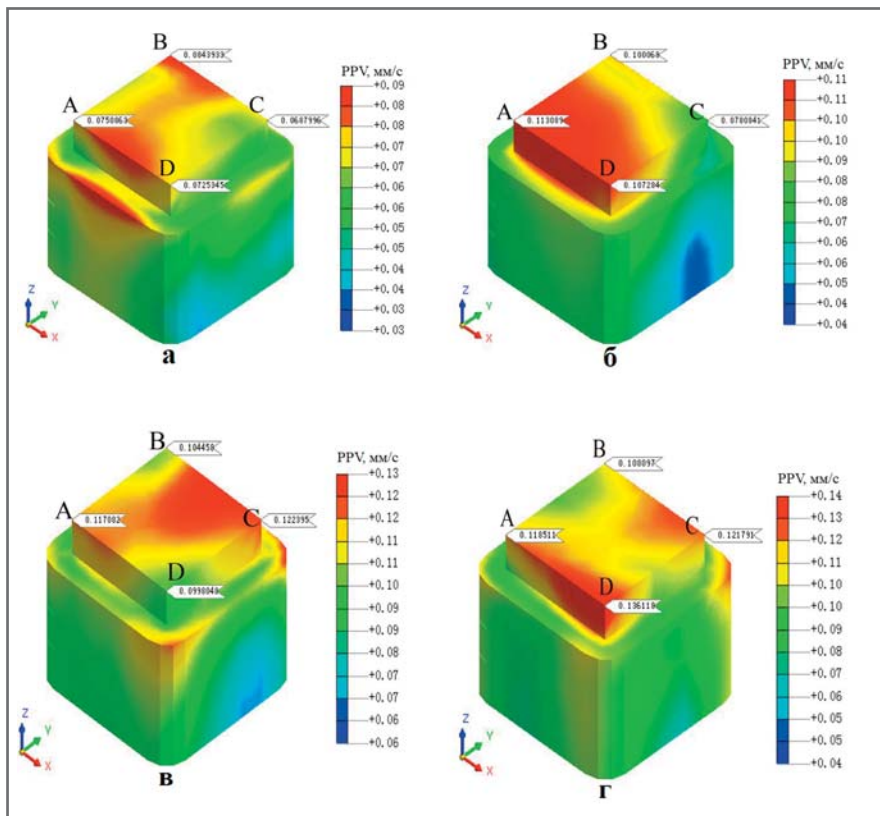


Рис. 12. Распределение PPV в уплотненном грунтовом основании и цоколе Колокольной башни для набора условий 5 (см. таблицу 2) при скоростях движения поездов: 20 км/ч (а), 40 км/ч (б), 60 км/ч (в) и 80 км/ч (г)

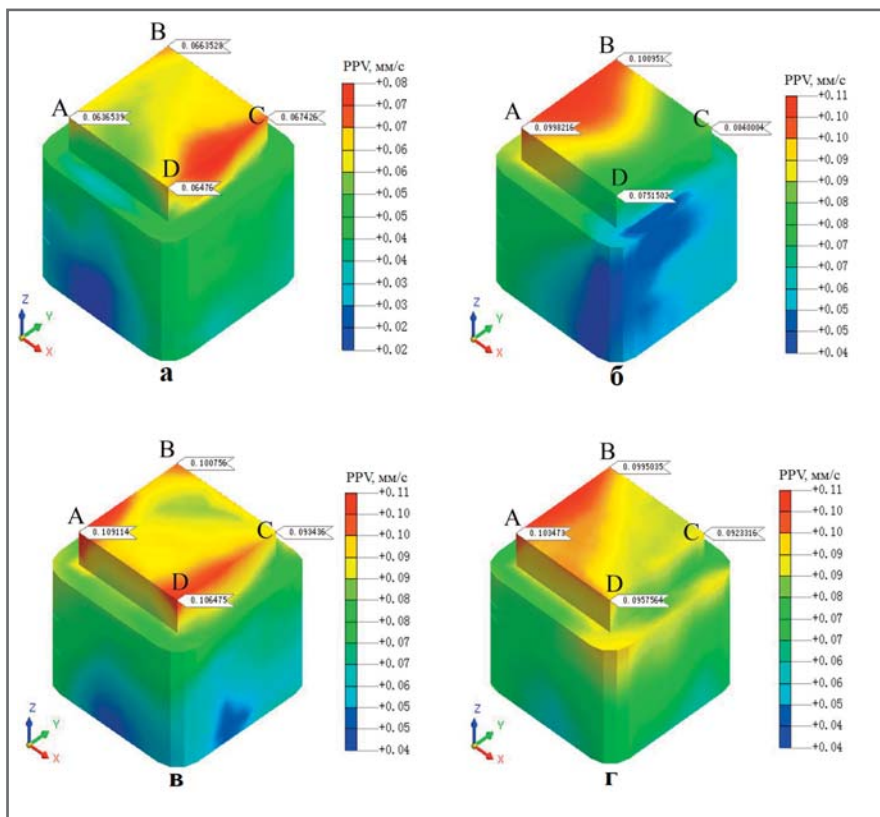


Рис. 13. Распределение PPV в уплотненном грунтовом основании и цоколе Колокольной башни для набора условий 6 (см. таблицу 2) при скоростях движения поездов: 20 км/ч (а), 40 км/ч (б), 60 км/ч (в) и 80 км/ч (г)

Длина пробега поездов под башней составляла 60 м. Динамические на- | грузки, возникавшие при скорости по-
езда 80 км/ч, показаны на рисунке 7.

Численные результаты

Для исследования влияния вибраций от движения поездов метро на Колокольную башню было проведено численное моделирование в целях выявления:

- 1) распределений величин пиковой скорости колебаний (PPV) в уплотненном грунтовом основании и цоколе башни;
- 2) закономерностей для PPV при различных условиях;
- 3) влияния амортизирующих (демпфирующих) путей.

Максимальные (пиковые) скорости колебаний

Пиковые скорости колебаний (PPV) уплотненного грунтового основания и цоколя Колокольной башни для каждого из принятых наборов условий (см. таблицу 2) показаны на рисунках 8–13. Чтобы облегчить анализ, авторы выбрали четыре верхних угла цоколя, точнее угловые точки А, В, С и D. Из рисунков 8–13 видно, что значения PPV в этих точках при каждом наборе условий меняются с изменением скорости поездов. Для наборов условий 1 и 4, когда движется сразу 4 поезда (см. таблицу 2), величина PPV максимальна в точке D при скорости поездов 20 км/ч, в точке С – при скорости поездов 60 км/ч, и опять в точке D – при скорости 80 км/ч. Но при скорости 40 км/ч значение PPV максимально в точке С для набора условий 1 и в точке D для набора условий 4. Для остальных четырех наборов условий (см. таблицу 2) закономерности похожи.

В целом полученные результаты показали, что PPV при движении четырех поездов больше, чем при движении двух поездов (таблица 5), и места с максимальными PPV в основном совпадают при совпадении количества поездов и скоростей их движения. Более того, максимальные величины PPV для наборов условий 1–3 (см. таблицу 2) превышали допустимые по нормативам, а для наборов условий 4–6 они соответствовали требованиям стандартов (таблица 6).

Закономерности распределения пиковых скоростей колебаний

1. Кривые PPV в верхних угловых точках цоколя Колокольной башни, представленные на рисунках 14–19, в основном демонстрируют восходящие тренды при увеличении скорости поездов, но некоторые участки некоторых из них идут вниз, что согласуется с закономерностями, полученными в результате предыдущих исследований

(Zhao et al, 2015). Причина этого заключается в том, что на частоту вибраций грунтового основания и цоколя влияет множество факторов, таких как категория пути, количество поездов и режим их движения.

2. При отсутствии амортизирующих путей (для наборов условий 1–3, см. таблицу 2) значения PPV превышали допустимые по нормативам, а при наличии амортизирующих путей (для наборов условий 4–6, см. таблицу 2) величины PPV были меньше допустимых. Это свидетельствовало о том, что скорость вибраций цоколя была связана с категорией путей.

3. Сопоставление данных для наборов условий 1 и 2, 1 и 3, 4 и 5, 4 и 6 (см. таблицу 2) показало, что значения PPV в четырех выбранных угловых точках цоколя (А, В, С, D) при одновременном движении четырех поездов были больше, чем при движении двух. Это свидетельствовало об увеличении скорости вибраций цоколя с увеличением количества поездов.

4. Сравнение результатов для наборов условий 2 и 3, 5 и 6 (рис. 15 и 16, рис. 18 и 19) показало, что если два поезда одновременно проходили под башней по разным маршрутам, то закономерности распределения PPV были разными. Это указывало на связь скорости вибраций цоколя с режимом движения поездов.

Влияние мер по амортизации (демпфированию)

Сопоставление величин PPV при отсутствии (для наборов условий 1–3, см.

Таблица 5. Максимальные значения PPV (из четырех угловых точек цоколя башни) для шести наборов условий при разной скорости поездов

Параметр, место, ссылка на рис.	Набор условий (см. таблицу 2)					
	1	2	3	4	5	6
PPV, мм/с	0,752	0,488	0,479	0,199	0,136	0,109
Скорость поездов, км/ч	80	60	40	80	80	60
Точка с макс. знач.	D	C	B	D	D	A
Рисунок	8г	9в	10б	11г	12г	13в

Таблица 6. Угловые точки цоколя башни с максимальными значениями PPV для каждого набора условий и каждой скорости поездов

Скорость поездов, км/ч	Набор условий (см. таблицу 2)					
	1	4	2	5	3	6
20	D	D	A	A	A	C
40	C	D	D	A	B	B
60	C	C	C	C	A	A
80	D	D	D	D	B	A

таблицу 2) и при наличии (для наборов условий 4–6, см. таблицу 2) амортизирующих путей при прочих равных условиях представлено в таблицах 7–9. Видно, что при наличии демпфирующих путей значения PPV во всех выбранных угловых точках цоколя (А, В, С, D) существенно ниже.

Если меры по демпфированию вибраций от движения поездов метро не были приняты (для наборов условий 1–3, см. табл. 2), то значения PPV цоколя Колокольной башни составляли 0,372–0,753 мм/с, что выше нормативно допу-

стимых величин на 0,15–0,20 мм/с. При наличии амортизирующих путей (наборы условий 4–6, см. табл. 2) значения PPV составляли 0,093–0,199 мм/с, что находилось в допустимом диапазоне. Сравнение данных для наборов условий 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6 показало, что значения PPV в четырех угловых точках цоколя (А, В, С, D) при демпфировании снизились соответственно на 71,75–73,57%, 71,61–76,92%, 71,51–78,91%. Таким образом, применение амортизирующих путей в модели позволило в значительной сте-

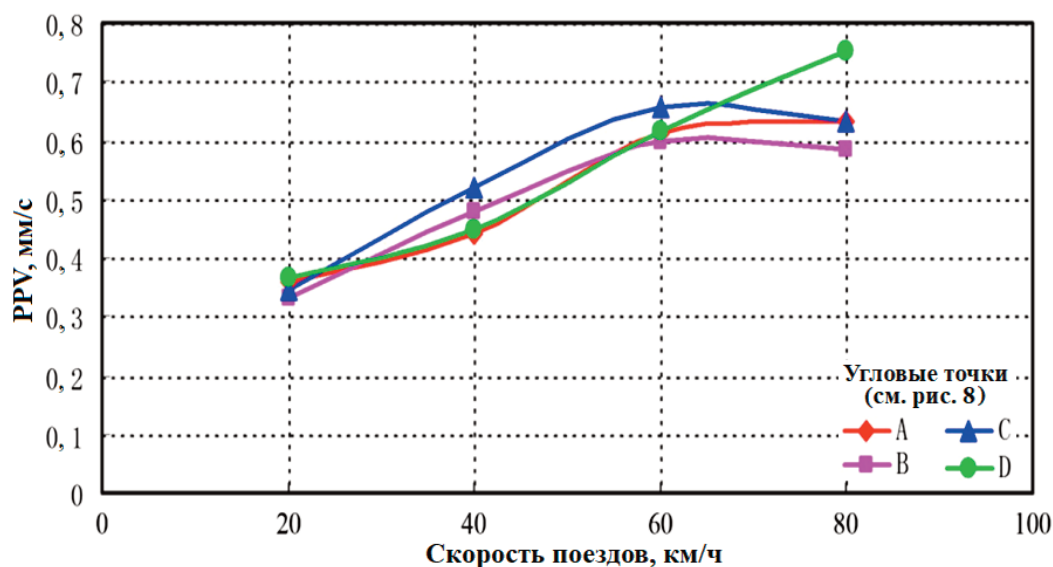


Рис. 14. Зависимости PPV в четырех выбранных угловых точках цоколя (А, В, С, D) от скорости движения поездов для набора условий 1 (см. таблицу 2)

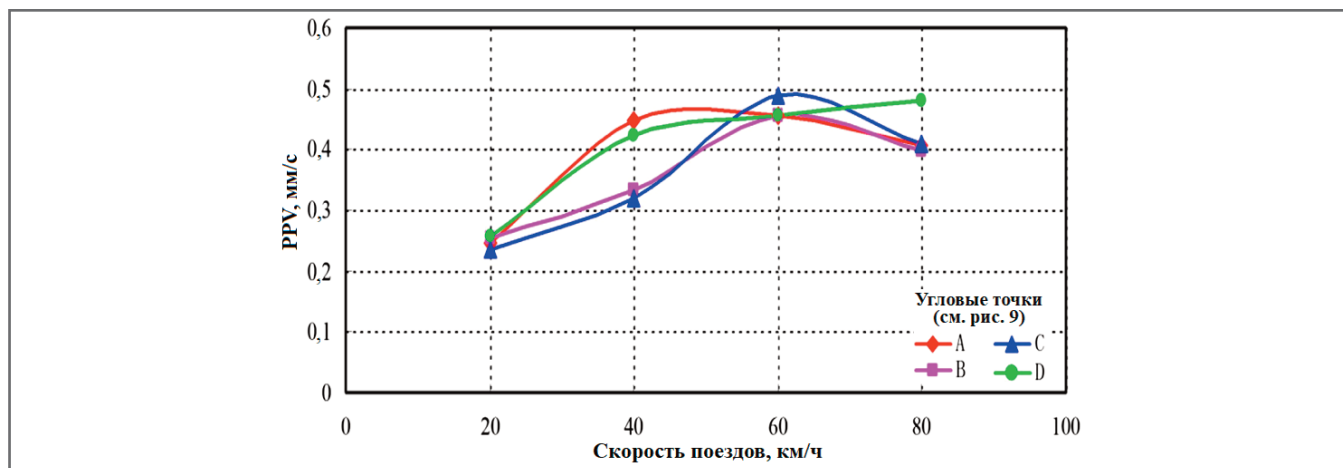


Рис. 15. Зависимости PPV в четырех выбранных угловых точках цоколя (A, B, C, D) от скорости движения поездов для набора условий 2 (см. таблицу 2)

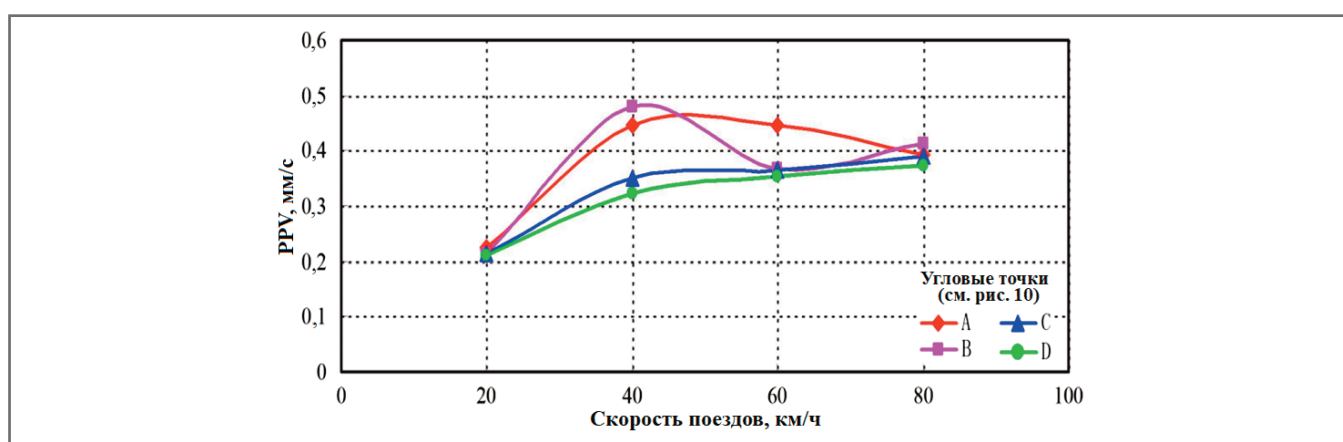


Рис. 16. Зависимости PPV в четырех выбранных угловых точках цоколя (A, B, C, D) от скорости движения поездов для набора условий 3 (см. таблицу 2)

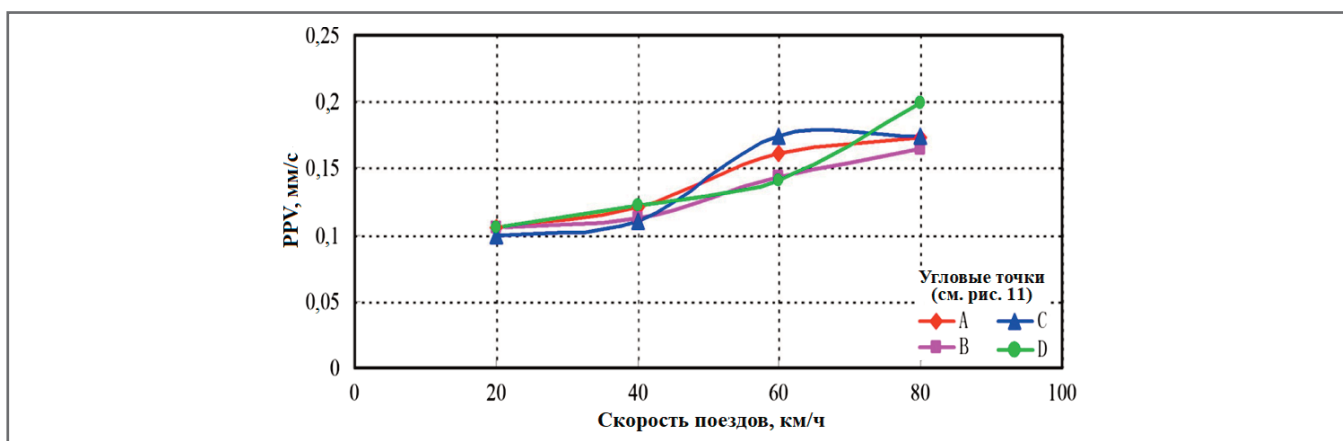


Рис. 17. Зависимости PPV в четырех выбранных угловых точках цоколя (A, B, C, D) от скорости движения поездов для набора условий 4 (см. таблицу 2)

пени ослабить воздействие вибраций от движения поездов метро на Колокольную башню.

ПОЛЕВОЙ МОНИТОРИНГ

Для проверки достоверности модельных результатов их сравнили с данными полевых испытаний (Ma et al. 2016). По-

скольку линия метро № 6 в Сиане к моменту написания настоящей статьи еще не была закончена, была проверена только реакция Колокольной башни на вибрационное воздействие для набора условий 5 (см. таблицу 2) при скорости поезда 60 км/ч. Для мониторинга в течение суток использовались датчик

CMG-40T и устройство сбора и обработки сигналов REFTEK130-B. Данные собирались для четырех угловых точек цоколя башни (A, B, C, D), аналогичных таковым при моделировании (рис. 20).

Полученные при реальном мониторинге значения PPV в четырех угловых

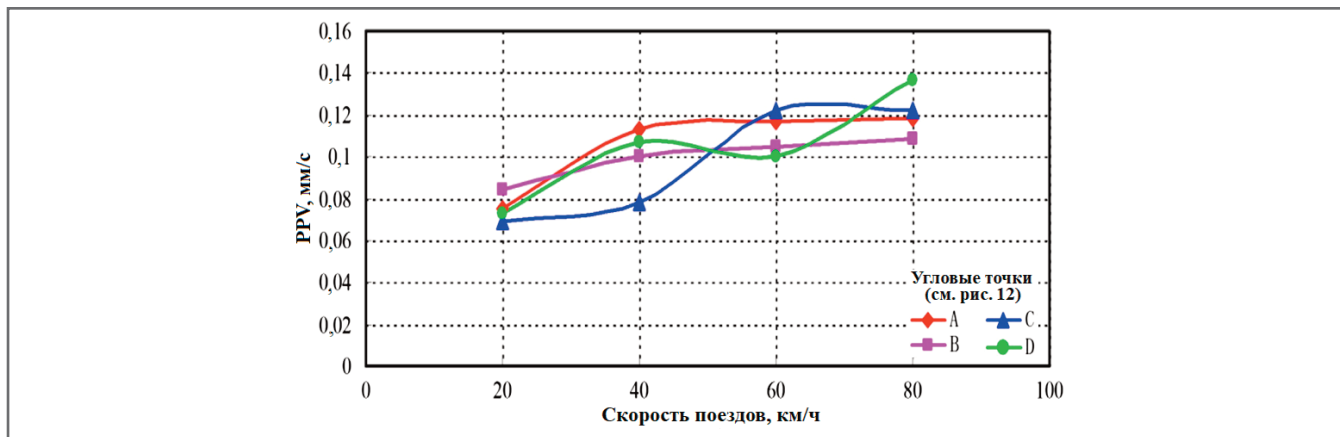


Рис. 18. Зависимости PPV в четырех выбранных угловых точках цоколя (A, B, C, D) от скорости движения поездов для набора условий 5 (см. таблицу 2)

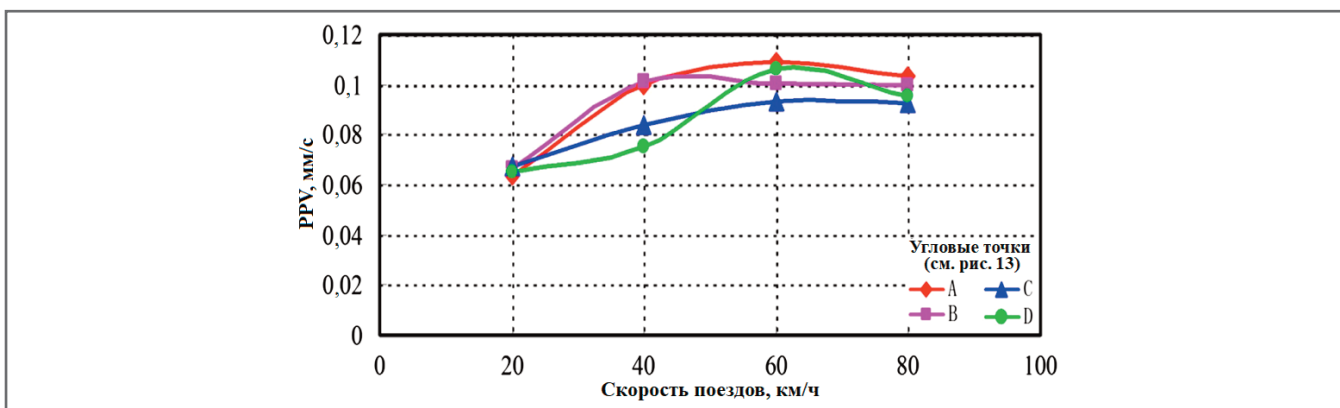


Рис. 19. Зависимости PPV в четырех выбранных угловых точках цоколя (A, B, C, D) от скорости движения поездов для набора условий 6 (см. таблицу 2)

точках цоколя башни при наборе условий 5 (см. таблицу 2) соответствовали рассчитанным при численном моделировании (таблица 10). Это говорит о том, что модель, разработанная при данном исследовании, может количественно отражать фактические реакции Колокольной башни на вибрационные воздействия.

ВЫВОДЫ

Чтобы исследовать воздействие вибраций на архитектурные памятники, в этой статье были обобщены сведения о нормативно допустимых параметрах такого влияния.

В качестве основной характеристики реакций цоколя и уплотненного грунтового основания Колокольной башни Сяня на вибрационные воздействия была выбрана максимальная (пиковая) скорость колебаний (PPV). Был выполнен численный анализ распределения PPV с использованием программы midas GTS NX для шести наборов условий (см. таблицу 2), а также проведен частичный полевой мониторинг. Полученные результаты показали следующее.

Таблица 7. Сопоставление PPV (мм/с) для наборов условий 1 (без амортизации) и 4 (с амортизацией)

Набор условий (см. таблицу 2)	Точка (см. рис. 8, 11)			
	A	B	C	D
1	0,634	0,584	0,655	0,753
4	0,172	0,165	0,175	0,199
R, %	72,87	71,75	73,28	73,57

Примечание. R – относительное уменьшение PPV под влиянием амортизации путей,

$$R = \frac{PPV_{\text{без амортиз.}} - PPV_{\text{с амортиз.}}}{PPV_{\text{без амортиз.}}} \times 100\%.$$

1. Пиковая скорость колебаний уплотненного грунтового основания и цоколя Колокольной башни неравномерно увеличивается с ростом скорости проходящих ниже поездов метро. Она связана с количеством поездов, категорией пути и режимом движения поездов.

2. Если при моделировании используются обычные пути без амортизации,

то значения PPV уплотненного грунтового основания и цоколя башни выходят за рамки стандартов безопасности, что потенциально может привести к серьезным повреждениям этого архитектурного памятника. Но при использовании демпфирующих путей величины PPV значительно снижаются и становятся не выше допустимых. При этом максимальное уменьшение достигается

ет 78,91%. В целом было спрогнозировано, что реальное применение амортизирующих путей может в значительной степени ослабить влияние вибраций на Колокольную башню.

3. После проверки результатов конечноэлементного моделирования в программе midas GTS NX с помощью частичного полевого мониторинга было обнаружено, что построенная модель вполне может количественно отражать реальные отклики Колокольной башни на вибрационные воздействия.

В следующем исследовании авторы собираются изучить осадки уплотненного грунтового основания и кирпичного цоколя Колокольной башни, а также PPV ее верхних деревянных конструкций при вибрациях от проходящих под ней поездов метро. **и**

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Специального фонда фундаментальных научных исследований основных факультетов и колледжей Чанъяньского университета (грант № 310821165011), Комплексного инновационного проекта Управления наук и технологий провинции Шаньси (грант № 2015KTZDGY01-05-02) и проекта Brainstorm («Мозговой штурм») по социальному развитию Управления наук и технологий провинции Шаньси (грант № 2016SF-412) (Китай).

Таблица 8. Сопоставление PPV (мм/с) для наборов условий 2 (без амортизации) и 5 (с амортизацией)

Набор условий (см. таблицу 2)	Точка (см. рис. 9, 12)			
	A	B	C	D
2	0,455	0,455	0,488	0,479
5	0,117	0,108	0,122	0,136
R, %	74,29	76,92	75	71,61

Примечание. R – относительное уменьшение PPV под влиянием амортизации путей,

$$R = \frac{PPV_{\text{без амортиз.}} - PPV_{\text{с амортиз.}}}{PPV_{\text{без амортиз.}}} \times 100\%.$$

Таблица 9. Сопоставление PPV (мм/с) для наборов условий 3 (без амортизации) и 6 (с амортизацией)

Набор условий (см. таблицу 2)	Точка (см. рис. 10, 13)			
	A	B	C	D
3	0,445	0,479	0,388	0,372
6	0,109	0,101	0,093	0,106
R, %	75,51	78,91	76,04	71,51

Примечание. R – относительное уменьшение PPV под влиянием амортизации путей,

$$R = \frac{PPV_{\text{без амортиз.}} - PPV_{\text{с амортиз.}}}{PPV_{\text{без амортиз.}}} \times 100\%.$$

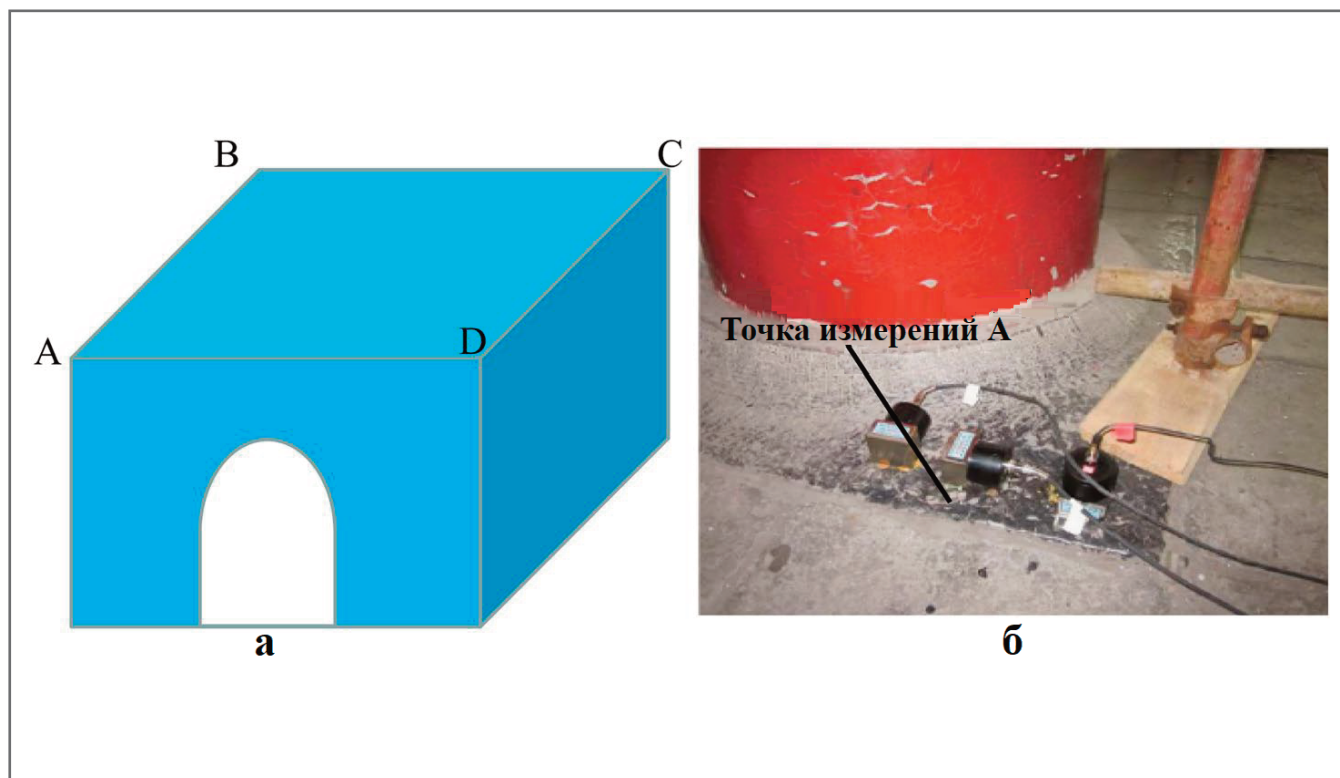


Рис. 20. Полевой мониторинг: а – схема цоколя Колокольной башни с указанием точек измерений; б – фотография точки измерений А (Ma et al., 2016)

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

Lai J., Niu F., Wang K., Chen J., Qiu J., Fan H., Hu Z. Dynamic effect of metro-induced vibration on the rammed earth base of the Bell Tower // Springerplus. 30 June 2016. Vol. 5. № 1. P. 935. doi:10.1186/s40064-016-2627-1. PMID: 27386379. PMCID: PMC4929115. URL: <https://springerplus.springeropen.com/articles/10.1186/s40064-016-2627-1>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

1. BS7385-2:1993. Evaluation and measurement for vibration in buildings. Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings. Part 1.
2. Cao Y.M. Vibration of high-rise buildings induced by running trains // Eng. Mech. 2006. Vol. 23. № 3. P. 162–167.
3. Chen R.C. Study on effects on Bell Tower due to train-induced vibrations on metro in Xi'an: Ph.D. Thesis. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
4. Clemente P., Rinaldis D. Protection of a monumental building against traffic induced vibrations // Soil Dyn. Earthq. Eng. 1998. Vol. 17. № 5. P. 289–296.
5. Dawn T.M., Stanworth C.G. Ground vibration from passing trains // J. Sound Vib. 1979. Vol. 66. № 2. P. 355–362.
6. Degrande G., De Roeck G. Wave propagation in layered dry, saturated and unsaturated pore elastic media // Solid Struct. 1998. Vol. 35. № 34–35. P. 4753–4778.
7. Degrande G., Lombaert G. An efficient formulation of Krylov's prediction model for train induced vibrations based on the dynamic reciprocity theorem // J. Acoust. Soc. Am. 2001. Vol. 110. № 3. P. 1379–1390.
8. DIN4150-3:1999. Structural vibration. Part 3. Effect of vibration on structures.
9. Ellis P. Effect of traffic vibration on historic buildings // Sci. Total Environ. 1987. Vol. 59. P. 37–45.
10. GB50894-2013. Code for design of environment protection for machinery industry. Beijing, China: China Machine Press, 2013.
11. GBT50452-2008. Technical specification for protection of historic buildings against man-made vibration. Beijing, China: China Machine Press, 2008.
12. Han X.H., Jia W.L. Study on the effect and mechanism of aerodynamic measures for the vortex-induced vibration of separate pairs of box girders in cable-stayed bridges // Shock Vib. Hindawi Publishing Corporation, 2015. Article ID 792957. doi:10.1155/2015/792957.
13. Han W.S., Yuan S.J., Ma L. Vibration of vehicle-bridge coupling system with measured correlated road surface roughness // Struct. Eng. Mech. 25 July 2014. Vol. 51. № 2. P. 315–331. doi:10.12989/sem.2014.51.2.315.
14. ISO 4866:2010. Mechanical vibration and shock-vibration of fixed structures-guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures.
15. Jia Y.X., Guo M., Liu W.N., et al. Dynamic effect of train induced vibration on historic buildings // J. Beijing Jiaotong Univ. 2009. Vol. 33. № 1. P. 118–122.
16. Kurzweil G. Ground borne noise and vibration from underground rail systems // J. Sound Vib. 1979. Vol. 66. № 3. P. 363–370.
17. Lai H.P., Wang S.Y., Xie Y.L. Experimental research on temperature field and structure performance under different lining water contents in road tunnel fire // Tunn. Undergr. Space Technol. 2014. Vol. 43. P. 327–335.
18. Lai J.X., Fan H.B., Chen J.X., et al. Blasting vibration monitoring of under crossing railway tunnel using wireless sensor network // Int. J. Distrib. Sens. Netw. 2015a. Article ID 703980. 7 p. doi:10.1155/2015/703980.
19. Lai J.X., Qiu J.L., Chen J.X., et al. New technology and experimental study on snow-melting heated pavement system in tunnel portal // Adv. Mater. Sci. Eng. 2015b. Article ID 706536. 11 p. doi:10.1155/2015/706536.
20. Lai J.X., Mao S., Qiu J.L., et al. Investigation progresses and applications of fractional derivative model in geotechnical engineering // Math. Probl. Eng. 2016a. Article ID 9183296. 15 p. doi:10.1155/2016/9183296.
21. Lai J.X., Qiu J.L., Feng Z.H., et al. Prediction of soil deformation in tunnelling using artificial neural networks // Comput. Intell. Neurosci. 2016b. Article ID 6708183. 16 p. doi:10.1155/2016/6708183.
22. Lai J.X., Wang K.Y., Qiu J.L., et al. Vibration response characteristics of the cross tunnel structure // Shock Vib. 2016c. Article ID 9524206. 11 p. URL: hindawi.com/journals/sv/aip/9524206/.
23. Lang J. Result of measurements on the control of structure-borne noise from subways // Proceedings of the 7th International congress on acoustics. Budapest, 1971. P. 421–424.
24. Li J.C., Li H.B., Ma G.W., et al. Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion // Tunn. Undergr. Space Technol. 2013. Vol. 35. P. 227–234.
25. Lombaert G., Degrande G., Kogut J. The experimental validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibrations // J. Sound Vib. 2006. Vol. 297. № 3–5. P. 512–535.
26. Luo G., Chen J.X., Zhou X.J. Effects of various factors on the VIV-induced fatigue damage in the cable of submerged floating tunnel // Pol. Marit. Res. 2015. Vol. 4. № 88. P. 76–83.
27. Ma M., Liu W., Qian C.Y., Deng G.H., Li Y.D. Study of the train-induced vibration impact on a historic Bell Tower above two spatially overlapping metro lines // Soil Dyn. Earthq. Eng. 2016. Vol. 81. P. 58–74.

28. Mata M. Effects on buildings of vibrations caused by traffic // *Build. Sci.* 1971. Vol. 6. P. 221–246.
29. Meng Z.B. Analysis and assessment of the vibration responds traffic-induced of Xi'an Bell Tower: Ph.D. Thesis. Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
30. MIDAS Co. Ltd. midas GTS NX manual. URL: manual.midasuser.com/encommon/GTS%20NX/250/GTX.htm (in Korean).
31. Real J. Computational considerations of 3-D finite element method models of railway vibration prediction in ballasted tracks // *J. Vibroeng.* 2014. Vol. 16. № 4. P. 1709–1722.
32. Real T., Zamorano C., Ribes F. Train-induced vibration prediction in tunnels using 2D and 3D FEM models in time domain // *Tunn. Undergr. Space. Technol.* 2015. Vol. 49. P. 376–383.
33. Rueker W. Dynamic behavior of rigid foundations of arbitrary shape on a half-space // *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 1982. Vol. 66. № 5. P. 674–690.
34. Swiss Association of Standards. SN 640312:2013. Effects of vibration on construction.
35. Xie D.W. Evaluation report of vibration influence to historic and sensitive buildings along Beijing Subway Line 8: Ph.D. Thesis. Beijing Jiaotong University, 2008.
36. Ye F., Gou C.F., Sun H.D., et al. Model test study on effective ratio of segment transverse bending rigidity of shield tunnel // *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2014. Vol. 41. P. 193–205.
37. Ye M., Cao B.X., Ren Y.P., et al. Field measurement, analysis and protection for the vibration of an ancient ruin induced by railway // *J. Vibroeng.* 2015. Vol. 17. № 4. P. 2049–2065.
38. Yu M.H., Fang D.P. Advances in structural mechanics of Chinese ancient architectures // *Adv. Mech.* 2006. Vol. 3. № 1. P. 43–64.
39. Zhao H.B., Long Y., Ji C., et al. Study on the dynamic response of subway tunnel by viaduct collapsing vibration and the protective measures of reducing vibration // *J. Vibroeng.* 2015. Vol. 17. № 5. P. 2433–2443.

TRANSLATION SOURCE ►

Lai J., Niu F., Wang K., Chen J., Qiu J., Fan H., Hu Z. Dynamic effect of metro-induced vibration on the rammed earth base of the Bell Tower. *SpringerPlus*. 30 June 2016. 5 (1): 935. doi:10.1186/s40064-016-2627-1. PMID: 27386379. PMCID: PMC4929115. URL: <https://springerplus.springeropen.com/articles/10.1186/s40064-016-2627-1>.

REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED PAPER ►

1. BS7385-2:1993. Evaluation and measurement for vibration in buildings. Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings. Part 1.
2. Cao Y.M. Vibration of high-rise buildings induced by running trains. *Eng. Mech.* 2006. 23 (3): 162–167.
3. Chen R.C. Study on effects on Bell Tower due to train-induced vibrations on metro in Xi'an: Ph.D. Thesis. Beijing Jiaotong University, Beijing, 2008.
4. Clemente P., Rinaldis D. Protection of a monumental building against traffic induced vibrations. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 1998. 17 (5): 289–296.
5. Dawn T.M., Stanworth C.G. Ground vibration from passing trains. *J. Sound Vib.* 1979. 66 (2): 355–362.
6. Degrande G., De Roeck G. Wave propagation in layered dry, saturated and unsaturated pore elastic media. *Solid Struct.* 1998. 35 (34–35): 4753–4778.
7. Degrande G., Lombaert G. An efficient formulation of Krylov's prediction model for train induced vibrations based on the dynamic reciprocity theorem. *J. Acoust. Soc. Am.* 2001. 110 (3): 1379–1390.
8. DIN4150-3:1999. Structural vibration. Part 3. Effect of vibration on structures.
9. Ellis P. Effect of traffic vibration on historic buildings. *Sci. Total Environ.* 1987. 59: 37–45.
10. GB50894-2013. Code for design of environment protection for machinery industry. China Machine Press, Beijing, China, 2013.
11. GBT50452-2008. Technical specification for protection of historic buildings against man-made vibration. China Machine Press, Beijing, China, 2008.
12. Han X.H., Jia W.L. Study on the effect and mechanism of aerodynamic measures for the vortex-induced vibration of separate pairs of box girders in cable-stayed bridges. *Shock Vib.* Hindawi Publishing Corporation, 2015. Article ID 792957. doi:10.1155/2015/792957.
13. Han W.S., Yuan S.J., Ma L. Vibration of vehicle-bridge coupling system with measured correlated road surface roughness. *Struct. Eng. Mech.* 25 July 2014. 51 (2): 315–331. doi:10.12989/sem.2014.51.2.315.
14. ISO 4866:2010. Mechanical vibration and shock-vibration of fixed structures-guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures.
15. Jia Y.X., Guo M., Liu W.N., et al. Dynamic effect of train induced vibration on historic buildings. *J. Beijing Jiaotong Univ.* 2009. 33 (1): 118–122.
16. Kurzweil G. Ground borne noise and vibration from underground rail systems. *J. Sound Vib.* 1979. 66 (3): 363–370.

17. Lai H.P., Wang S.Y., Xie Y.L. Experimental research on temperature field and structure performance under different lining water contents in road tunnel fire. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2014. 43: 327–335.
18. Lai J.X., Fan H.B., Chen J.X., et al. Blasting vibration monitoring of under crossing railway tunnel using wireless sensor network. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* 2015a. Article ID 703980. 7 p. doi:10.1155/2015/703980.
19. Lai J.X., Qiu J.L., Chen J.X., et al. New technology and experimental study on snow-melting heated pavement system in tunnel portal. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2015b. Article ID 706536. 11 p. doi:10.1155/2015/706536.
20. Lai J.X., Mao S., Qiu J.L., et al. Investigation progresses and applications of fractional derivative model in geotechnical engineering. *Math. Probl. Eng.* 2016a. Article ID 9183296. 15 p. doi:10.1155/2016/9183296.
21. Lai J.X., Qiu J.L., Feng Z.H., et al. Prediction of soil deformation in tunnelling using artificial neural networks. *Comput. Intell. Neurosci.* 2016b. Article ID 6708183. 16 p. doi:10.1155/2016/6708183.
22. Lai J.X., Wang K.Y., Qiu J.L., et al. Vibration response characteristics of the cross tunnel structure. *Shock Vib.* 2016c. Article ID 9524206. 11 p. URL: hindawi.com/journals/sv/aip/9524206/.
23. Lang J. Result of measurements on the control of structure-borne noise from subways. In: *Proceedings of the 7th International congress on acoustics*. Budapest, 1971: 421–424.
24. Li J.C., Li H.B., Ma G.W., et al. Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2013. 35: 227–234.
25. Lombaert G., Degrande G., Kogut J. The experimental validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibrations // *J. Sound Vib.* 2006. Vol. 297. № 3–5. P. 512–535.
26. Luo G., Chen J.X., Zhou X.J. Effects of various factors on the VIV-induced fatigue damage in the cable of submerged floating tunnel. *Pol. Marit. Res.* 2015. 4 (88): 76–83.
27. Ma M., Liu W., Qian C.Y., Deng G.H., Li Y.D. Study of the train-induced vibration impact on a historic Bell Tower above two spatially overlapping metro lines. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2016. 81: 58–74.
28. Mata M. Effects on buildings of vibrations caused by traffic. *Build. Sci.* 1971. 6: 221–246.
29. Meng Z.B. Analysis and assessment of the vibration responds traffic-induced of Xi'an Bell Tower: Ph.D. Thesis. Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
30. MIDAS Co. Ltd. midas GTS NX manual. URL: manual.midasuser.com/encommon/GTS%20NX/250/GTX.htm (in Korean).
31. Real J. Computational considerations of 3-D finite element method models of railway vibration prediction in ballasted tracks. *J. Vibroeng.* 2014. 16 (4) 1709–1722.
32. Real T., Zamorano C., Ribes F. Train-induced vibration prediction in tunnels using 2D and 3D FEM models in time domain. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2015. 49: 376–383.
33. Rueker W. Dynamic behavior of rigid foundations of arbitrary shape on a half-space. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 1982. 66 (5): 674–690.
34. Swiss Association of Standards. SN 640312:2013. Effects of vibration on construction.
35. Xie D.W. Evaluation report of vibration influence to historic and sensitive buildings along Beijing Subway Line 8: Ph.D. Thesis. Beijing Jiaotong University, 2008.
36. Ye F., Gou C.F., Sun H.D., et al. Model test study on effective ratio of segment transverse bending rigidity of shield tunnel. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2014. 41: 193–205.
37. Ye M., Cao B.X., Ren Y.P., et al. Field measurement, analysis and protection for the vibration of an ancient ruin induced by railway. *J. Vibroeng.* 2015. 17 (4): 2049–2065.
38. Yu M.H., Fang D.P. Advances in structural mechanics of Chinese ancient architectures. *Adv. Mech.* 2006. 3 (1): 43–64.
39. Zhao H.B., Long Y., Ji C., et al. Study on the dynamic response of subway tunnel by viaduct collapsing vibration and the protective measures of reducing vibration. *J. Vibroeng.* 2015. 17 (5): 2433–2443.

Информация об авторах

ЛАЙ ЦЗИНЬСИН

Автодорожный факультет Чанъяньского университета,
г. Сиань, пров. Шаньси, Китай

НЮ ФАНЬЮАНЬ

Автодорожный факультет Чанъяньского университета,
г. Сиань, пров. Шаньси, Китай

Information about the authors

JINXING LAI

School of Highway, Chang'an University, Xi'an,
Shaanxi, China

FANGYUAN NIU

School of Highway, Chang'an University, Xi'an,
Shaanxi, China

ВАН КЭ

Автодорожный факультет Чанъаньского университета; Первый китайский железнодорожный проектно-исследовательский институт (FSDI) Китайской железнодорожной строительной корпорации (CRCC), г. Сиань, пров. Шаньси, Китай

ЧЭНЬ ЦЗЯНЬСЮНЬ

Автодорожный факультет Чанъаньского университета, г. Сиань, пров. Шаньси, Китай

ЦЮ ЦЗЮНЬЛИН

Автодорожный факультет Чанъаньского университета, г. Сиань, пров. Шаньси, Китай

ФАНЬ ХАОБО

Автодорожный факультет Чанъаньского университета, г. Сиань, пров. Шаньси, Китай

ХУ ЧЖИНАНЬ

Факультет гражданского строительства Шицзячжуанского университета Тедао, г. Шицзячжуан, пров. Хэбэй, Китай

KE WANG

School of Highway, Chang'an University; China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., China Railway Construction Corporation Ltd., Xi'an, Shaanxi, China

JIANXUN CHEN

School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi, China

JUNLING QIU

School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi, China

HAOBO FAN

School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi, China

ZHINAN HU

School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei, China

Реклама в журнале

Независимый электронный журнал «ГеоИнфо» на сегодняшний день является ведущим отраслевым средством массовой информации в сфере инженерных изысканий, геотехнического проектирования и инженерной защиты территории. Ежемесячная аудитория журнала превышает 15 000 уникальных посетителей.

Благодаря тому, что все статьи размещаются в группах журнала в социальных сетях и затем транслируются в другие профильные группы, каждый опубликованный материал находит читателей именно внутри своей целевой аудитории.

Многие статьи в адаптированном варианте дублируются на нашем канале в Яндекс.Дзен, у которого уже более 3000 подписчиков и аудитория которого превышает 100 тысяч человек.

Прайс-лист на размещение рекламы в 2023 году (без НДС)

- Рекламная статья в журнале – 25 000 рублей.
- В каждую статью могут быть добавлены любые дополнительные материалы: каталоги оборудования, прайсы, фотографии, видеоролики, демоверсии программ и пр.
- Логотип в разделе «Спонсоры проекта» в правой колонке – 25 000 рублей в месяц.

Все наши спонсоры получают свою персональную страницу на сайте журнала, где размещается информация о компании-спонсоре, все статьи ее сотрудников, опубликованные в журнале «ГеоИнфо» или в Базе знаний, а также любые дополнительные материалы (каталоги, буклеты, видео).

Коллеги и друзья! Наше с Вами рекламное сотрудничество будет взаимовыгодным. Вы получите отличную площадку для лоббирования своих интересов, а мы – возможность и дальше развивать проект, бороться за интересы отрасли инженерных изысканий и помогать профессионалам.

Тел.: +7 (499) 340-340-9, (916) 240-03-22
E-mail: info@geoinfo.ru



Институт
экологического
проектирования
и изысканий

- Информационное сопровождение управления ледовой обстановкой (ИСУЛО)
- Оперативный спутниковый экологический мониторинг
- Производственный экологический мониторинг
- Программы сохранения биоразнообразия



119234, г. Москва,
Ленинские горы, д. 1, стр. 75Г
Телефон: +7 (495) 930-8751
E-mail: info@iepi.ru

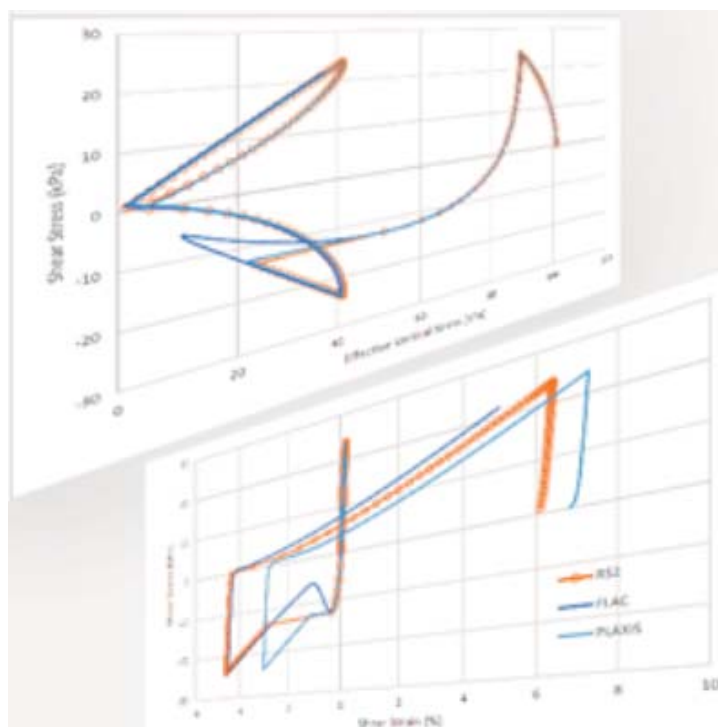
WEB: WWW.IEPI.RU



Институт
экологического
проектирования
и изысканий

ИЭПИ зарегистрированный товарный знак





О ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ PM4SAND И PM4SILT, ВКЛЮЧЕННЫХ В ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ROCSCIENCE RS2

Обзорная статья

Поступила в редакцию: 01.12.2022. Принята к публикации 15.12.2022. Дата публикации: 06.02.2023.

© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2022

ВАСИН М.В.

Обозреватель

АННОТАЦИЯ

Компания Rocscience, основанная в 1996 году на базе Университета Торонто в Канаде, является одним из мировых лидеров по разработке, усовершенствованию и распространению 2D и 3D программного обеспечения для инженеров-строителей, горных инженеров, инженеров-геологов и геотехников. На сайте этой компании недавно появилась статья «PM4Sand и PM4Silt – сопоставление RS2 с FLAC и PLAXIS» [1]. Предлагаем вниманию читателей адаптированный перевод этой статьи с привлечением информации из дополнительных источников [2–11].

Консультационную помощь редакции оказали сотрудники ООО «Современные Изыскательские Технологии» – официального представителя компании Rocscience в России.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

песчаные грунты; пылеватые грунты; динамический анализ; прогнозирование разжижения; комплексная геомеханическая модель; модель PM4Sand; модель PM4Silt; программа RS2; программа FLAC; программа PLAXIS; испытания на многоплоскостной сдвиг; моделирование; сопоставление.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Васин М.В. О верификации моделей PM4Sand и PM4Silt, включенных в программный комплекс Rocscience RS2 // ГеоИнфо. 2022. № 12. С. 74–82

ON VERIFYING THE PM4SAND AND PM4SILT MODELS INCLUDED IN THE ROCSCIENCE RS2 SOFTWARE PACKAGE

Review paper

Received 01.12.2022. Accepted 15.12.2022. Published 06.02.2023.

© Independent electronic journal "GeoInfo", 2022

MIKHAIL V. VASIN

Reviewer, Moscow, Russia

ABSTRACT

The company of Rocscience was founded in 1996 at the University of Toronto in Canada. It is one of the world leaders in the development, improvement and distribution of 2D and 3D software for civil engineers, mining engineers, geological engineers and geotechnicians. The article "PM4Sand and PM4Silt – RS2 vs FLAC vs PLAXIS" has recently appeared on the website of this company [1]. We offer readers an adapted translation of this article with the involvement of information from additional sources [2–11].

Consulting assistance to the editorial staff was provided by the employees of Advanced Survey Technologies LLC that is the official representative of Rocscience in Russia.

KEYWORDS:

sandy soils; silty soils; dynamic analysis; liquefaction prediction; constitutive model; PM4Sand model; PM4Silt model; RS2 program; FLAC program; PLAXIS program; direct simple shear tests (DSS tests); simulation (modeling); comparison.

FOR CITATION:

Vasin M.V. O verifikatsii modeley PM4Sand i PM4Silt, vklyuchennyh v programmiy kompleks Rocscience RS2 [On verifying the PM4Sand and PM4Silt models included in the Rocscience RS2 software package]. GeoInfo. 2022. 12: 74–62

Введение

Для регионов, подверженных землетрясениям, адекватное моделирование и выполнение динамического анализа геотехнических сооружений имеют решающее значение для эффективного выявления возможности разжижения грунтов, вызванного сейсмическими воздействиями.

Моделирование зависимостей между напряжениями и деформациями для различных типов грунтов может быть сложной задачей даже для статических условий. В динамических же условиях поведение грунтов бывает еще более сложным. Это говорит о сложности формулирования и выбора соответствующей комплексной геомеханической (конститутивной) модели, которая будет точно отражать поведение материалов.

В связи с этим пользователи программы RS2 недавно обратились в компанию Rocscience и настоятельно попросили добавить к основным комплексным геомеханическим моделям

Таблица 1. Входные параметры для верификации модели PM4Sand

Коэффициент плотности (относительная плотность) D_r	Начальный модуль сдвига G_0	Параметр скорости сжатия h_{po}
0,35	476	0,53
0,55	677	0,40
0,75	890	0,63

грунта, включенным в RS2, также PM4Sand и PM4Silt. И теперь обе эти модели доступны в последней версии RS2 [1]. (RS2 – это разработанный в компании Rocscience универсальный программный комплекс для 2D моделирования и анализа напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов. Он может использоваться при подземных горных работах, для проектирования тоннелей,

карьеров, котлованов и фундаментов, систем их крепления, для оценки устойчивости склонов и пр. В том числе RS2 имеет возможность выполнять динамический анализ поведения геотехнических сооружений при землетрясениях или других динамических нагрузках [2, 3].)

PM4Sand и PM4Silt – это изотропные пластические 2D модели, предоставляющие уравнения для точного анализа по-

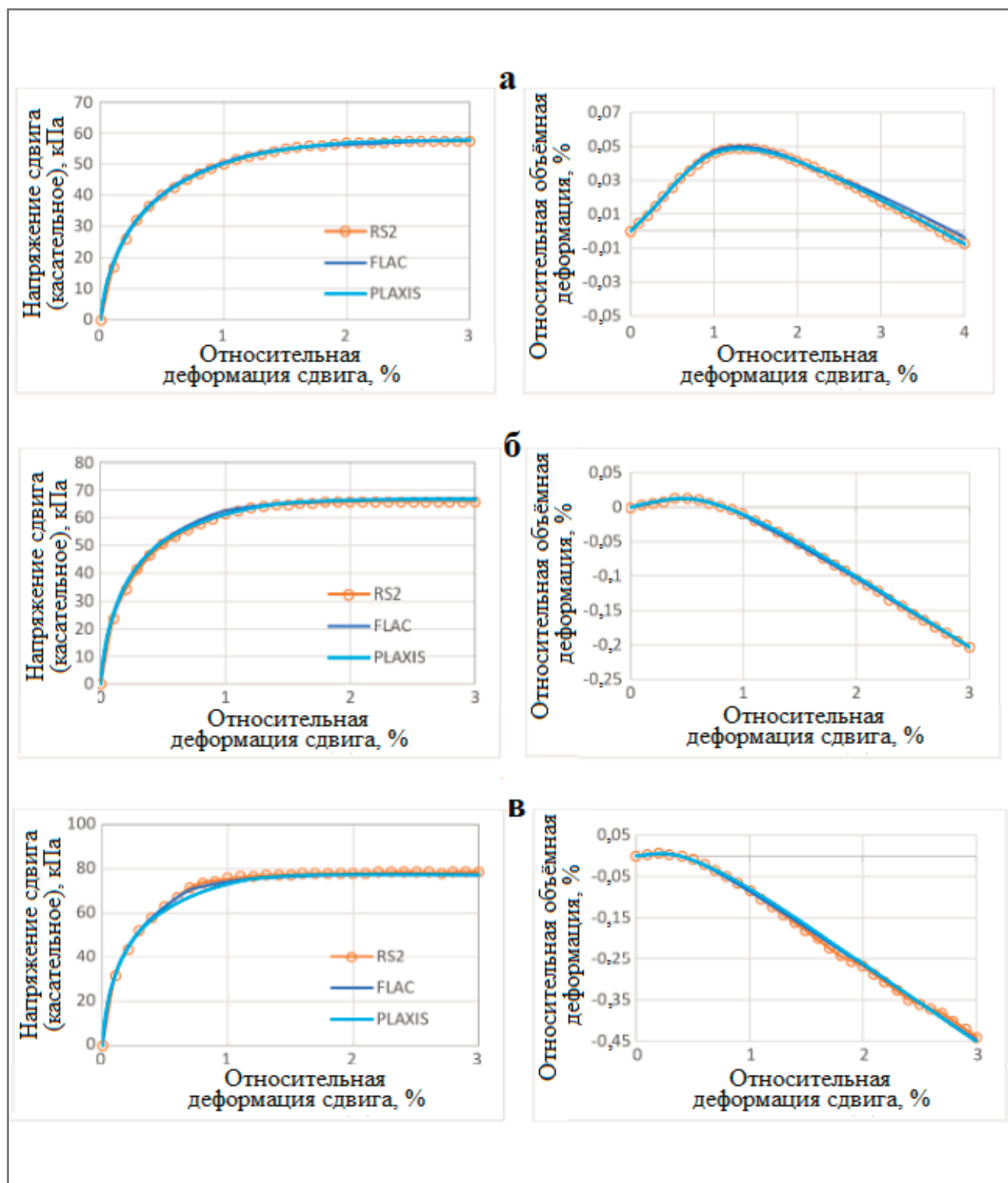


Рис. 1. Результаты виртуальных испытаний песчаного грунта на многоплоскостной сдвиг при монотонном нагружении в дренированных условиях при коэффициенте плотности (относительной плотности [16]) песка D_r , равном 0,35 (а), 0,55 (б) и 0,75 (в), начальном вертикальном эффективном напряжении величиной $1P_{атм}$ и коэффициенте бокового давления грунта в состоянии покоя $K_0=0,5$ (при использовании модели PM4Sand в программах RS2, FLAC и PLAXIS)

ведения соответственно песков и пылеватых грунтов (в том числе пылеватых супесей и пылеватых суглинков) при различных условиях нагружения, в том числе динамических. Они особенно необходимы для приложений по инженерной сейсмологии и сейсмостойкому

строительству. Эти модели были разработаны Россом Буланже (Ross Boulanger) и Катериной Зиотопулу (Katerina Zioto-poulou) из Калифорнийского университета первоначально для программы FLAC в виде файла формата dll. В программе PLAXIS они доступны как мо-

дели грунта, определяемые пользователем [4–14].

Чтобы проверить надежность использования моделей PM4Sand и PM4Silt в программе RS2, полученные результаты были сопоставлены с таковыми при работе в программах FLAC и PLAXIS [1].

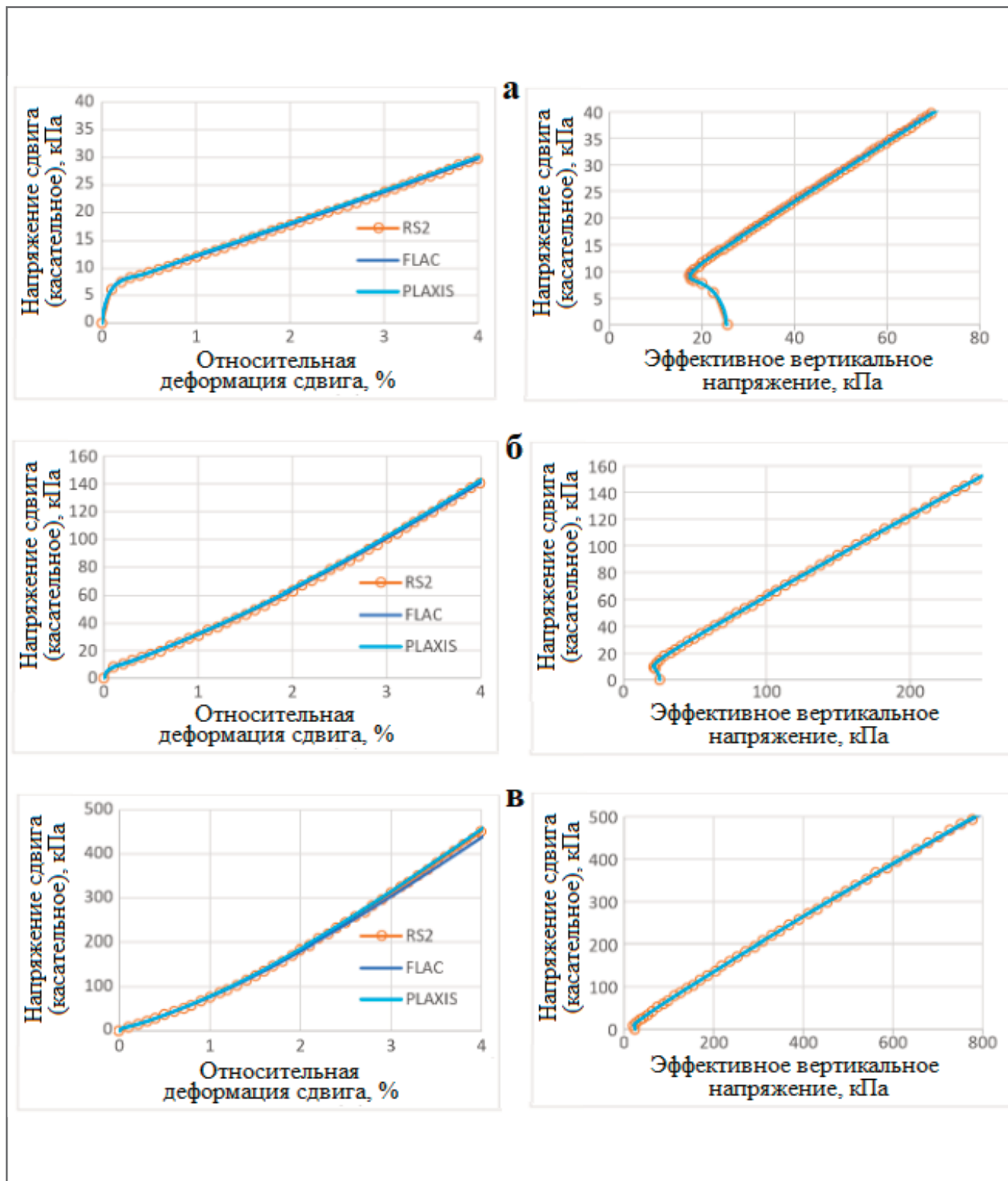


Рис. 2. Результаты виртуальных испытаний песчаного грунта на многоплоскостной сдвиг при монотонном нагружении в недренированных условиях при коэффициенте плотности песка D_R , равном 0,35 (а), 0,55 (б) и 0,75 (в), начальном вертикальном эффективном напряжении величиной $1/4 P_{атм}$ и коэффициенте бокового давления грунта в состоянии покоя $K_0=0,5$ (при использовании модели PM4Sand в программах RS2, FLAC и PLAXIS)

Динамический анализ с использованием модели PM4Sand ►

Чтобы сопоставить результаты использования комплексной геомеханической модели PM4Sand в RS2, FLAC и PLAXIS, в этих трех программах вы-

полнялось компьютерное моделирование испытаний песчаного грунта на многоплоскостной сдвиг (direct simple shear) [15] при монотонном нагружении в дренированных и недренированных условиях, а также при циклическом нагружении в недренированных условиях.

Основные входные параметры для PM4Sand представлены в таблице 1.

Результаты виртуальных испытаний песчаного грунта на многоплоскостной сдвиг при монотонном нагружении в дренированных и недренированных условиях, представленные соответ-

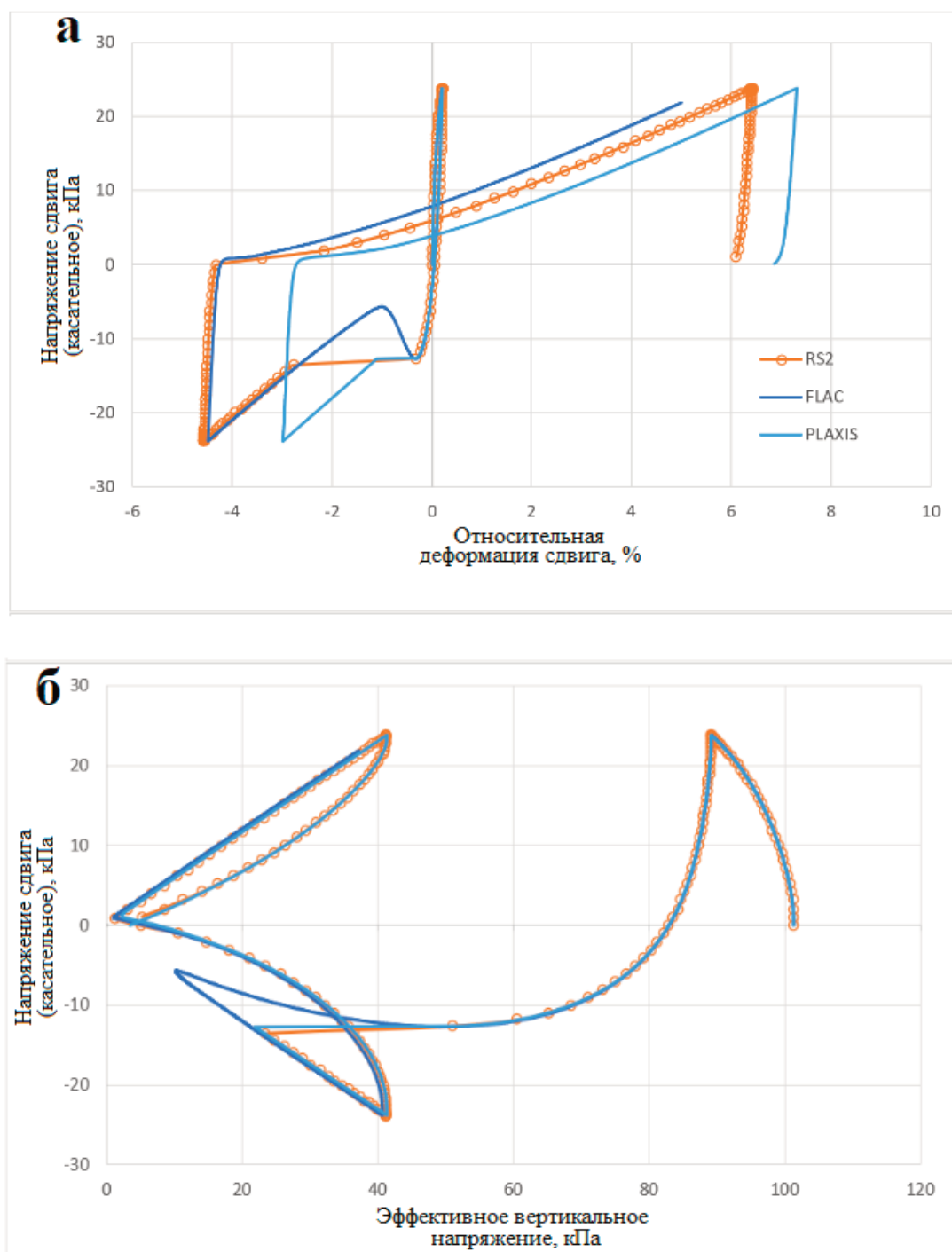


Рис. 3. Результаты виртуальных испытаний песчаного грунта на многоплоскостной сдвиг при циклическом нагружении в недренарованных условиях при коэффициенте плотности песка D_R , равном 0,35, начальном вертикальном эффективном напряжении величиной $1P_{атм}$, коэффициенте бокового давления грунта в состоянии покоя $K_0=0,5$ и максимальном коэффициенте нагрузки $\tau/P_{атм}=0,147*1,6$ (при использовании модели PM4Sand в программах RS2, FLAC и PLAXIS)

ственно на рисунках 1 и 2, демонстрируют очень хорошее соответствие для программ RS2, FLAC и PLAXIS. Следует отметить, что во всех трех случаях нагружение выполнялось с контролем деформаций [1].

Результаты виртуальных испытаний песчаного грунта на многоплоскостной сдвиг при циклическом нагружении в недренарованных условиях, представ-

Таблица 2. Входные параметры для верификации модели PM4Silt

Отношение s_v/σ'_{vc}	Начальный модуль сдвига G_0	Параметр скорости сжатия h_{po}
0,25	588	20
0,50	776	50
0,75	913	60

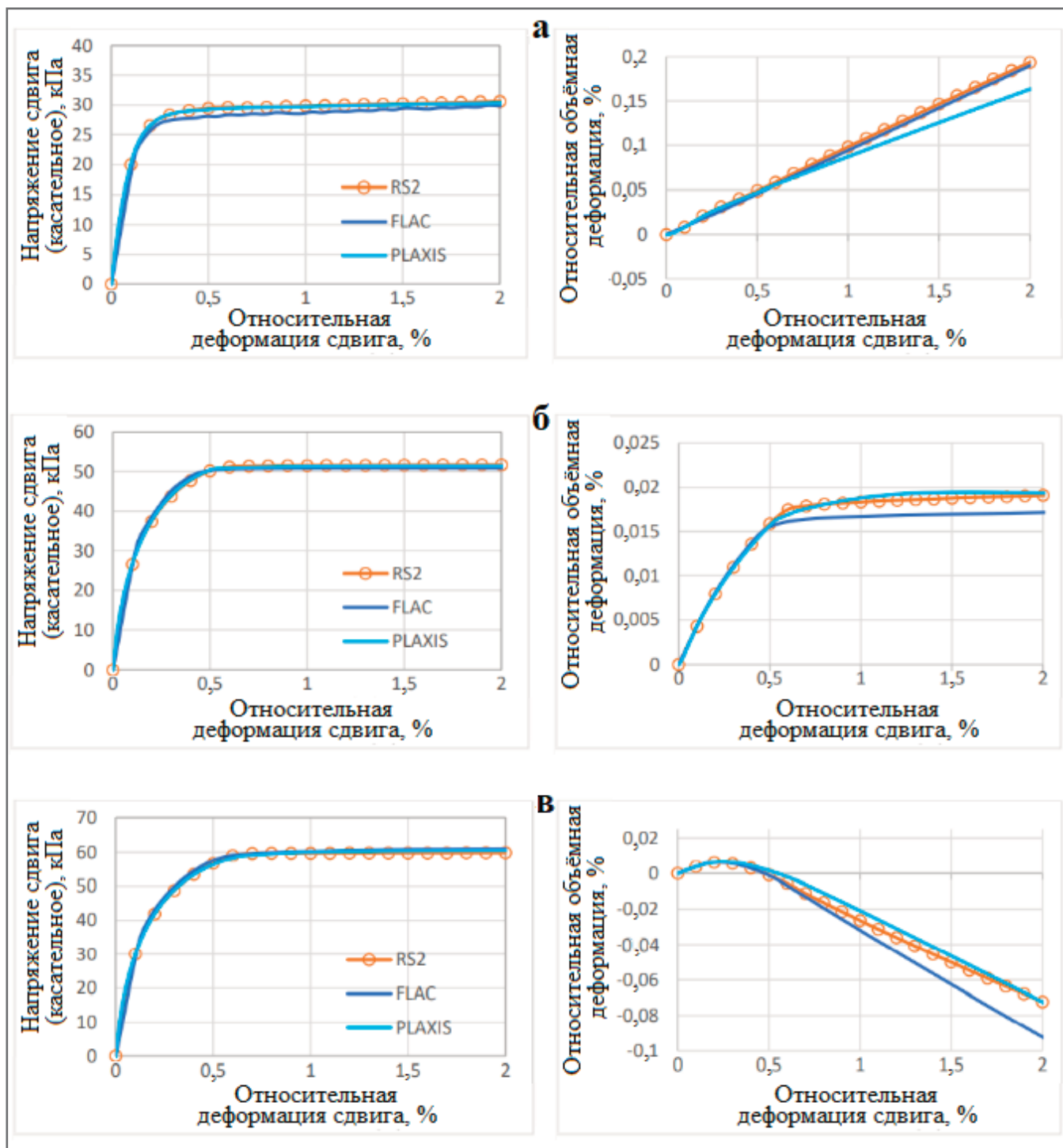


Рис. 4. Результаты виртуальных испытаний пылеватого грунта на многоплоскостной сдвиг при монотонном нагружении в дренированных условиях при отношении s_v/σ'_{vc} , равном 0,25 (а), 0,50 (б) и 0,75 (в), начальном вертикальном эффективном напряжении величиной $1P_{атм}$ и коэффициенте бокового давления грунта в состоянии покоя $K_0=0,5$ (при использовании модели PM4Silt в программах RS2, FLAC и PLAXIS)

ленные на рисунке 3, также демонстрируют хорошее соответствие для программ RS2, FLAC и PLAXIS. Хотя все же есть небольшие различия при более поздних циклах нагружения. Основными причинами этого являются различия в применении сдвиговой нагрузки и в критериях сходимости. В программе FLAC моделирование испытаний велось с контролируруемыми деформациями, а направление приложения нагруз-

ки изменялось при достижении определенного уровня напряжения сдвига. Тогда как в программах RS2 и PLAXIS моделирование выполнялось с контролируруемыми напряжениями. Несмотря на то, что критерии сходимости между результатами работы во всех трех рассматриваемых программах широко используются на практике, незначительные ошибки в конце каждого этапа (цикла) нагружения могут накапливать-

ся, если количество этапов очень велико. В остальном результаты, полученные в RS2, FLAC и PLAXIS, хорошо совпадают [1].

Динамический анализ с использованием модели PM4Silt ▶

Три основных входных параметра для комплексной геомеханической модели поведения пылеватого грунта

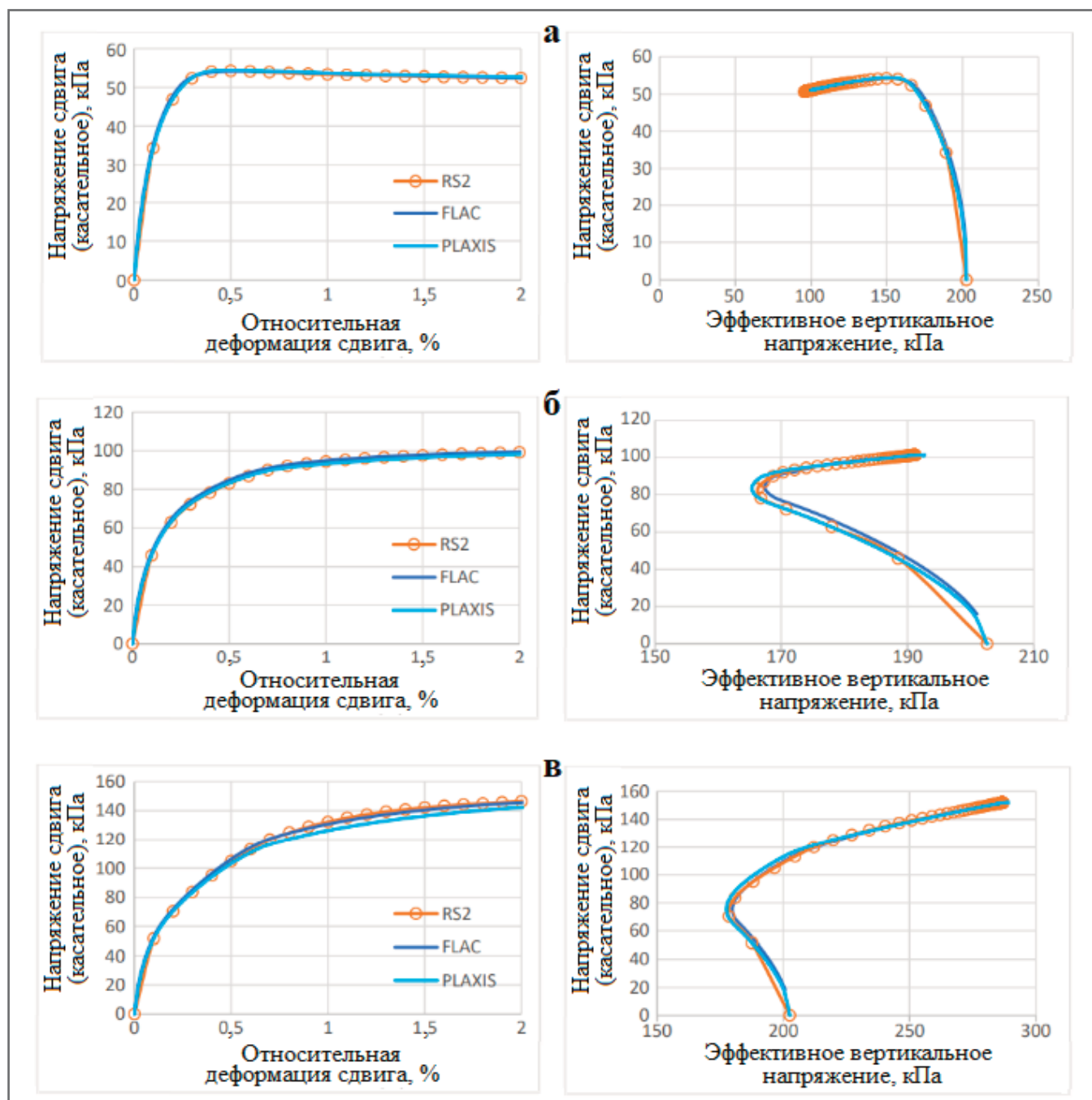


Рис. 5. Результаты виртуальных испытаний пылеватого грунта на многоплоскостной сдвиг при монотонном нагружении в недренированных условиях при отношении s_u/σ'_{vc} равном 0,25 (а), 0,50 (б) и 0,75 (в), начальном вертикальном эффективном напряжении величиной $2P_{атм}$ и коэффициенте бокового давления грунта в состоянии покоя $K_0=0,5$ (при использовании модели PM4Silt в программах RS2, FLAC и PLAXIS)

PM4Silt включают отношение недренированной прочности на сдвиг к полному вертикальному напряжению, которое будет приложено к образцу (s_u/σ'_{vc}), начальный модуль сдвига G_0 и параметр скорости сжатия h_{po} .

Входные параметры, использованные при верификации модели PM4Silt, приведены в таблице 2.

С использованием модели PM4Silt проводились виртуальные испытания пылеватого грунта на многоплоскостной сдвиг при монотонном нагружении с контролем деформаций в дренирован-

ных и недренированных условиях. Рисунки 4 и 5 демонстрируют хорошее соответствие результатов моделирования в программах RS2, FLAC и PLAXIS.

На рисунке 6 показаны результаты испытаний пылеватого грунта на многоплоскостной сдвиг при циклическом нагружении в недренированных условиях. Моделирование в программе FLAC проводилось с контролем деформаций, а направление приложения нагрузки изменялось при достижении определенного уровня напряжения сдвига. В то время как моделирование

в RS2 и PLAXIS выполнялось с контролем напряжений. Из рисунка 6 видно, что имеется хорошее соответствие между результатами работы во всех трех рассматриваемых программах [1].

Заключение ►

Благодаря включению в свой арсенал комплексных геомеханических моделей PM4Sand и PM4Silt программа RS2 получила больше функциональных возможностей для более точного прогнозирования потенциалов разжижения песчаных и пылеватых грунтов с помощью динами-

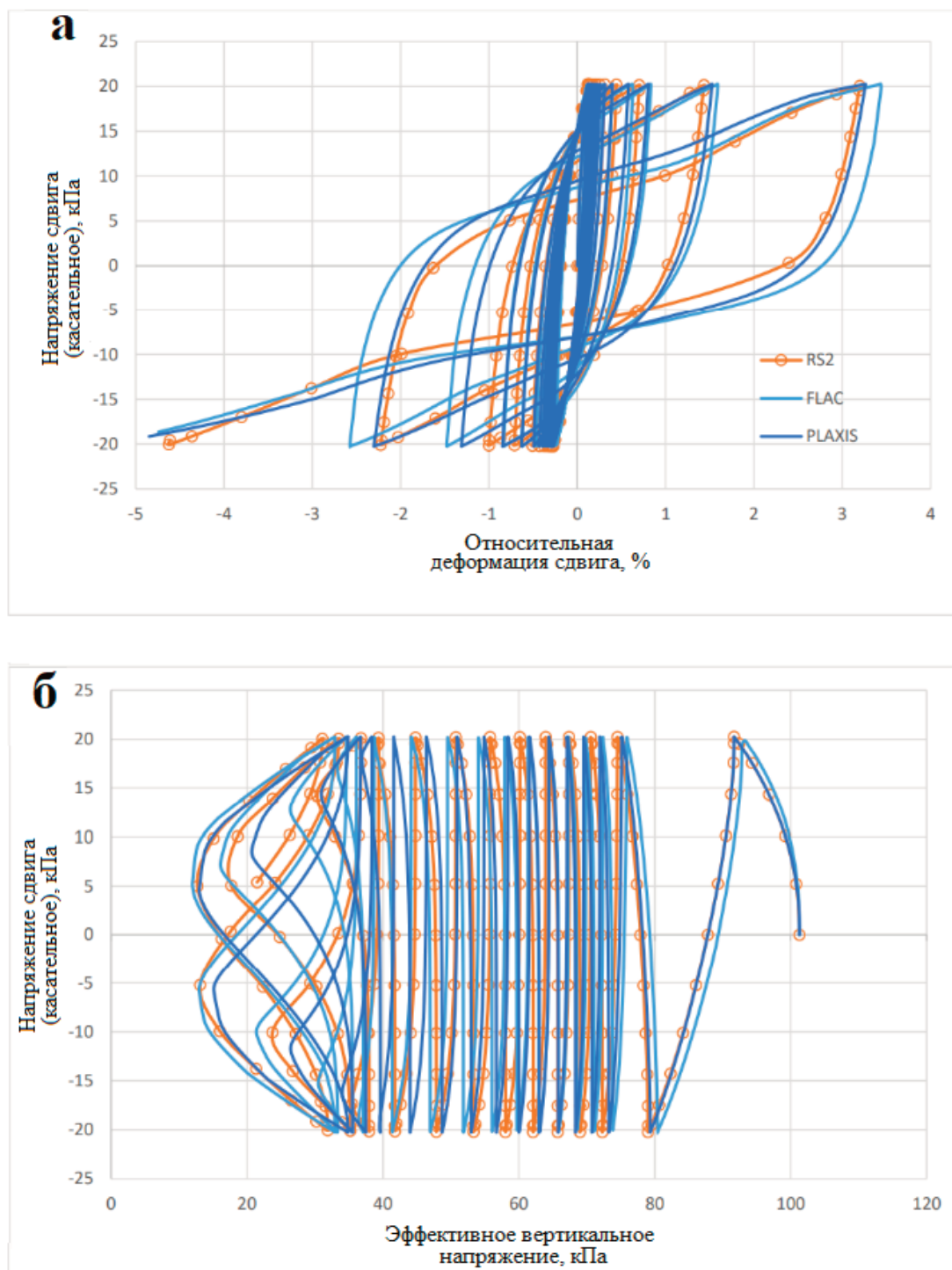


Рис. 6. Результаты виртуальных испытаний пылеватого грунта на многоплоскостной сдвиг при циклическом нагружении в недренарованных условиях при отношении $s_u/\sigma'_{vc}=0,25$, начальном вертикальном эффективном напряжении величиной $1P_{атм}$, коэффициенте бокового давления грунта в состоянии покоя $K_0=0,5$ и максимальном коэффициенте нагрузки $\tau/P_{атм}=0,2$ (при использовании модели PM4Silt в программах RS2, FLAC и PLAXIS)

ческого анализа их поведения. Указанные модели теперь доступны в версии этой программы 11.017 (RS2 version 11.017). Все пользователи RS2 с активной подпиской Maintenance+ теперь будут иметь доступ и к PM4Sand, и к PM4Silt [1].

Источники

1. PM4Sand and PM4Silt – RS2 vs FLAC vs PLAXIS // Rocscience.com. 27 October 2022. URL: rocscience.com/learning/pm4sand-pm4silt-rs2-vs-flac-vs-plaxis?fbclid=IwAR2rUb7ls6F0zECWzII9PxEAdoUeo-EP0HiuKjACL-Eookn85JwYs8jEhdc.
2. RS2 // Advanced Survey Technologies (ООО «Современные изыскательские технологии»). 2022. URL: geoast.pro/rs2.
3. RS2 // Rocscience. 2022. URL: rocscience.com/software/rs2.

4. pm4sand.engr.ucdavis.edu/.
5. plaxis.ru/news-2/new_release_2d_2018/
6. Brinkgreve R.B.J. Liquefaction and earthquake modelling // VIRTUOSITY, A BENTLEY COMPANY. Blog: Infrastructure Insights. 10.03.2021. URL: blog.virtuosity.com/liquefaction-and-earthquake-modelling.
7. pm4silt.engr.ucdavis.edu/.
8. plaxis.ru/news-2/new_release_plaxis_2d_3d_ce_v21_00/.
9. Boulanger R.W., Ziotopoulou K. PM4Sand (Version 3.1): a sand plasticity model for earthquake engineering applications: report № UCD/CGM-17/01. Davis, California, USA: University of California at Davis: Center for Geotechnical Modeling, 2017.
10. Boulanger R.W., Ziotopoulou K. PM4Silt (Version 1): a silt plasticity model for earthquake engineering applications: report № UCD/CGM-18/01. Davis, California, USA: University of California at Davis: Center for Geotechnical Modeling, 2018.
11. communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/46105/pm4sand---plaxis-udsm.
12. studfile.net/preview/5630817/page:2/.
13. sground.ru/wp-content/uploads/2018/05/GOST-25100-2011.pdf.
14. dic.academic.ru/dic.nsf/stroitel/5770.
15. Мирный А.Ю., Идрисов И.Х. Испытания методом многоплоскостного среза и простого сдвига // ГеоИнфо. 23.11.2020. URL: geoinfo.ru/product/ooo-npp-geotek/ispytaniya-metodom-mnogoploskostnogo-sreza-i-prostogo-sdviga-43581.shtml.
16. dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geolog/11978/КОЭФФИЦИЕНТ.

References

1. PM4Sand and PM4Silt – RS2 vs FLAC vs PLAXIS. Rocscience.com. 27 October 2022. URL: rocscience.com/learning/pm4sand-pm4silt-rs2-vs-flac-vs-plaxis?fbclid=IwAR2rUb7ls6F0zECWzI9PxEAduUeo-EP0HiuKjACL-Eookn85JwYs8jEhdc.
2. RS2. Advanced Survey Technologies. 2022. URL: geoast.pro/rs2.
3. RS2. Rocscience. 2022. URL: rocscience.com/software/rs2.
4. pm4sand.engr.ucdavis.edu/.
5. plaxis.ru/news-2/new_release_2d_2018/.
6. Brinkgreve R.B.J. Liquefaction and earthquake modelling // VIRTUOSITY, A BENTLEY COMPANY. Blog: Infrastructure Insights. 10.03.2021. URL: blog.virtuosity.com/liquefaction-and-earthquake-modelling.
7. pm4silt.engr.ucdavis.edu/.
8. plaxis.ru/news-2/new_release_plaxis_2d_3d_ce_v21_00/.
9. Boulanger R.W., Ziotopoulou K. PM4Sand (Version 3.1): a sand plasticity model for earthquake engineering applications: report UCD/CGM-17/01. Center for Geotechnical Modeling, University of California at Davis, Davis, California, USA, 2017.
10. Boulanger R.W., Ziotopoulou K. PM4Silt (Version 1): a silt plasticity model for earthquake engineering applications: report UCD/CGM-18/01. Center for Geotechnical Modeling, University of California at Davis, Davis, California, USA, 2018.
11. communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/46105/pm4sand---plaxis-udsm.
12. studfile.net/preview/5630817/page:2/.
13. sground.ru/wp-content/uploads/2018/05/GOST-25100-2011.pdf.
14. dic.academic.ru/dic.nsf/stroitel/5770.
15. Mirniy A.Yu., Idrisov I.H. Ispytaniya metodom mnogoploskostnogo sreza i prostogo sdviga [Direct simple shear tests and simple shear tests]. GeoInfo. 23.11.2020. URL: geoinfo.ru/product/ooo-npp-geotek/ispytaniya-metodom-mnogoploskostnogo-sreza-i-prostogo-sdviga-43581.shtml.
16. dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geolog/11978/КОЭФФИЦИЕНТ.

Информация об авторе

ВАСИН МИХАИЛ ВАСИЛЬЕВИЧ
Обозреватель

Information about the author

MIKHAIL V. VASIN
Reviewer, Moscow, Russia



АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ»

ГЕОТЕХНИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

Лаборатория оснащена отечественным и зарубежным оборудованием последнего поколения по всем направлениям деятельности лаборатории: испытания дисперсных, скальных, мерзлых грунтов и геокомпозитов.

На постоянной основе работают курсы повышения квалификации для экспертов в области геотехники.

Организован постоянный доступ супервайзеров и общедоступная онлайн трансляция работы лаборатории на портале Геоинфо и сайте лаборатории.



MDGT.RU



ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ СТАНДАРТНОГО ИСПЫТАНИЯ ГРУНТА ОСНОВАНИЯ СВАЕЙ-БАРЕТТОЙ

Оригинальная статья

Поступила в редакцию: 13.12.2022. Принята к публикации 29.12.2022. Дата публикации: 06.02.2023.

© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2022

ГОЛЬДФЕЛЬД И.З.

Международная Ассоциация
Фундаментостроителей (МАФ),
г. Москва, Россия, info@fc-union.com
Адрес: Россия, 127490, г. Москва,
Северный бульвар, д. 7

ЯСТРЕБОВ П.И.

НИИОСП им. Н.М. Герсевича
АО «НИЦ «Строительство»», г. Москва,
Россия, niiosp@niiosp.ru
Адрес: Россия, 109428, г. Москва, 2-я
Институтская ул., д. 6, стр. 12

ДУБРОВСКАЯ Е.С.

Международная Ассоциация
Фундаментостроителей (МАФ),
г. Москва, Россия, info@fc-union.com
Адрес: Россия, 127490, г. Москва,
Северный бульвар, д. 7

АННОТАЦИЯ

В статье изложена статистическая методика камеральной оценки работы грунтового основания буронабивных свай типа баретт с большим поперечным сечением и большой глубиной заложения, испытания которых для строительства будущего объекта были прерваны. Анализу подлежали результаты полномасштабных полевых испытаний грунтов двумя одинаковыми бареттами на одной из строительных площадок г. Москвы.

Размеры (поперечное сечение и длина) баретт составляли 0,64 м x 2,80 м x 52,50 м. Они были выполнены из бетона класса В35 и усилены арматурой класса А500. Грунтовым основанием пяты (лба) каждой баретты являлся водонасыщенный известняк средней прочности с временным сопротивлением одноосному сжатию 23 МПа. Грунты вдоль стволов свай были представлены мелкозернистыми и среднезернистыми песками, мягко- и текучепластичными суглинками, полутвердыми и твердыми глинами. Нагрузка при испытаниях создавалась системой объединенных гидродомкратов общей грузоподъемностью 42 000 кН. Реактивное усилие воспринималось упорной железобетонной балкой прямоугольного сечения, заанкеренной в грунтовом основании шестью бареттами, почти идентичными испытанным. Нагрузки при испытаниях сваями-бареттами не были доведены до предусмотренных вследствие повреждения упорной балки. 3D расчеты осадок баретт в программном комплексе MIDAS ограничились нагрузками, достигнутыми при испытаниях.

Оценка графиков «осадка – нагрузка» по результатам незавершенных испытаний грунта бареттами по предложенной методике позволила спрогнозировать возможные итоги этих тестов в случае их завершения и определить базовые параметры работы (предельные нагрузки под пятой, вдоль ствола и для сваи в целом, приведенный модуль деформации и доопытную нагрузку).

Изложенный подход полезен для высоконагруженных свай, которые трудно или невозможно испытать полностью. Он может содействовать проектированию схемы упорного стенда, подбору требуемых домкратов, назначению ступеней нагрузок и выбору вида и числа анкеров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

буронабивная свая; барретта; испытание сваей-барреттой; незавершенное испытание; графоаналитическая обработка; статистическая методика оценки; прогноз результатов испытания; грунтовое основание; водонасыщенный известняк; мелкозернистый песок; среднезернистый песок; мягкопластичный суглинок; текучепластичный суглинок; полутвердая глина; твердая глина.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Гольдфельд И.З., Ястребов П.И., Дубровская Е.С. Динамика эколого-геологических систем // Геоинфо. 2022. № 12. С. 84–95 doi: 10.58339/2949-0677-2022-4-12-84-95

GRAPH-ANALYTICAL PROCESSING OF THE RESULTS OF A STANDARD TEST OF A GROUND BASE BY A BARRETTE PILE

Original paper

Received 13.12.2022. Accepted 29.12.2022. Published 06.02.2023.

© Independent electronic journal "GeoInfo", 2022

IGOR' Z. GOL'DFEL'D

International Association of Foundation Contractors (IAFC), Moscow, Russia,
info@fc-union.com
Address: 7 Severnyi blvd., Moscow,
127490, Russia

PETR I. YASTREBOV

Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Research Center of Construction JSC, Moscow, Russia, niiosp@niiosp.ru
Address: 6 Second (2nd) Institutskaya st., bld. 12, Moscow, 109428, Russia

EKATERINA S. DUBROVSKAYA

International Association of Foundation Contractors (IAFC), Moscow, Russia,
info@fc-union.com
Address: 7 Severnyi blvd., Moscow,
127490, Russia

ABSTRACT

The paper presents a statistical technique for the in-office estimation of the behaviour of the foundation soil of bored piles of the barrette type with large cross-section and depth, the testing of which for the future construction was interrupted. The results of full-scale field tests of soils by two identical barrette piles at a construction site in Moscow were to analyze.

The dimensions (cross section and length) of the barrettes were 0.64 m x 2.80 m x 52.50 m. They were made of B35 class concrete and strengthened with A500 class reinforcement. The ground base of the foot of each barrette was water-saturated limestone of medium strength with a temporary resistance to uniaxial compression of 23 MPa. The soils along the pile shafts were represented by fine and medium sands, soft-firm and very soft – firm loams, stiff and very stiff clays. The load during the test was created by a system of combined hydraulic jacks having a total load capacity of 42,000 kN. The reactive force was perceived by a thrust reinforced concrete beam of rectangular cross-section, which was anchored in the ground base with six barrettes almost identical to those tested. The loads during the tests by the barrette piles were not brought to the prescribed levels due to damage to the thrust beam. The 3D calculations of the settlements of the barrettes in the MIDAS software package were limited to the loads achieved during the tests.

Estimating settlement-load graphs based on the results of the incomplete tests of the ground base by the barretts according to the proposed technique made it possible to predict the possible results of those tests in case of completion of them and to determine the basic parameters of the work (the maximal loads under the pile foot, along the shaft and for the pile as a whole, the reduced deformation modulus, and the load before the test).

The described approach is useful for highly loaded piles, which are difficult or impossible to test completely. It can assist in the design of the thrust stand scheme, in the selection of the required jacks, in the prescription of load stages, and in the choice of the types and number of anchors.

KEYWORDS:

bored pile; barrette pile; test by a barrette pile; incomplete test; graph-analytical processing; statistical estimation technique; prediction of test results; ground base; water-saturated limestone; fine sand; medium sand; soft-firm loam; very soft – firm loam; stiff clay; very stiff clay.

FOR CITATION:

Gol'dfel'd I.Z., Yastrebov P.I., Dubrovskaya E.S. Grafoanaliticheskaya obrabotka rezul'tatov standartnogo ispytaniya grunta osnovaniya svayey-barettov [Graph-analytical processing of the results of a standard test of a ground base by a barrette pile]. GeoInfo. 2022. 12: 84–95
doi: 10.58339/2949-0677-2022-4-12-84-95 (in Russian).

Введение ►

Глобализация межгосударственных отношений, увеличение населения городов и числа мегаполисов, совершенствование путей и средств транспорта потребовали освоения новых территорий в различных геолого-климатических условиях. Как следствие, расширилась потребность стран и предприятий в разработке строительных инноваций и обмене опытом возведения высотных сооружений, заглубленных объектов, протяженных мостов, многоярусных развязок, искусственных дамб, островов в акваториях [1–3]. За короткий период времени в строительстве возникло множество новых технологий, номенклатур материалов, видов изделий и техники, что обеспечило возможности фундирования объектов с высокими нагрузками и в сложных инженерно-геологических условиях.

Для таких условий оптимальными были признаны свайные, плитные и свайно-плитные фундаменты в монолитном или сборно-монолитном исполнении [4–8], в частности со сваями типа баретт (БР). Баретта выполняется индустриально на месте будущего объекта по технологии «стена в грунте», поэтому поперечное сечение ее ствола имеет вытянутую четырехугольную форму. Нагрузки на такие сваи при испытаниях достигают $(10 \div 28) \times 10^4$ кН, а размеры поперечного сечения и заглубление ствола $a \times b \times L$ составляют $(0,7 \div 1,5) \text{ м} \times (1,0 \div 3,0) \text{ м} \times (20 \div 100) \text{ м}$. Ввиду больших нагрузок и малодопустимых перекосов высотных сооружений фундамента под такие объекты выполняют из свай типа баретт, которые требуют предпроектных полевых испы-

таний в условиях нагружения, приближенных к работе БР в реализованном проекте. Их процесс является длительным, трудозатратным и травмоопасным [4].

Эффективность свайных фундаментов зависит от полноты использования физико-механических свойств грунтов основания под нагрузками. В то же время значения нагрузок на сваю ограничиваются осадками, не превышающими допустимые для проектируемого объекта. При этом создаваемые сваей долевыми нагрузками под пятой (лбом) и вдоль ствола (по боковой поверхности) при испытаниях по российскому ГОСТ 5686-2012 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями» раздельно не определяются, а общая нагрузка не всегда может быть доведена до приводящей к допустимой осадке. Именно такие характеристики, как долевыми нагрузками под пятой и по боковой поверхности, а также допустимая осадка при общей нагрузке, являются основой показателей экономичности проектирования согласно СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 (с изменениями № 1, 2, 3)». Приводимые для проектирования свай нормативные документы (СНиПы, ГОСТы), а также ведомственные документы не могут без полномасштабных испытаний на площадке будущего строительства учесть многообразие физико-механических свойств грунтов, индивидуальных технологий возведения и типов конструкций свай.

Получивший признание метод Остерберга [9] при испытаниях высоконагруженных свай решает проблему лишь частично, обеспечивая раздель-

ное использование работ лба и боковой поверхности. Но этот метод увеличивает стоимость испытаний и допускает спорную условность при обработке нагрузочных графиков, то есть равенство между долевыми работами лба и боковой поверхности при суммарном вдавливании всей сваи сверху вниз (top-down) и показателями, фиксируемыми ячейкой Остерберга (O-cell) раздельно, но направленными противоположно этим долевым работам. При этом в ячейке Остерберга предельные по несущей способности долевыми нагрузками вообще редко достигаются совместно из-за их больших величин.

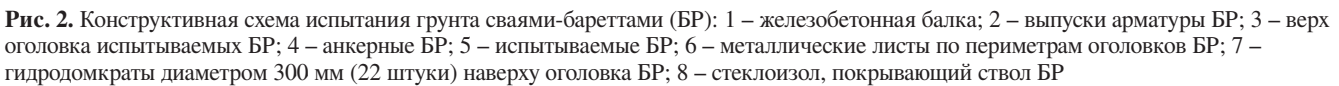
Покажем возможность решения отмеченных проблем на примере испытаний свай-баретт под 56-этажное здание в г. Москве [7].

Методика проведения и обсуждение испытаний ►

Площадка будущего строительства располагалась в пределах засыпанной поймы реки Яуза. Проект предусматривал размеры пятна застройки здания $134,15 \text{ м} \times 139,79 \text{ м}$ и каркасно-монолитное строительство с плитой фундамента и перекрытиями из бетонов класса В30÷В50 с арматурой класса А400÷А500. Фундамент намечался в виде монолитной железобетонной плиты толщиной 3,3 м, опирающейся на расположенные по сетке 96 буронабивных свай типа баретт с поперечным сечением $0,64 \text{ м} \times 2,80 \text{ м}$ и глубиной заложения 52,2 м. Пяты БР по проекту на 1,9–5 м заделывались в несущий слой (водонасыщенный известняк средней прочности – инженерно-геологический



Рис. 1. Инженерно-геологические элементы (ИГЭ) и физико-механические параметры грунтов основания баретты (БР). N – нагрузка. Предел одноосного сжатия известняка $R = 23 \text{ МПа}$ и модуль деформации $E = 6800 \text{ МПа}$ приведены авторами по данным из статьи [7], однако возможно, что указанное значение E было представлено в работе [7] ошибочно, поскольку фактически известняк как разновидность грунта имеет значение E порядка 68 МПа



держки ступеней испытательных нагрузок. Обваривание металлическими листами исключало выпучивание оголовка сваи в стороны под сосредоточенной нагрузкой от домкратов (рис. 3). Методика нагружения соответствовала требованиям ГОСТ 5686-2012. Ступени нагружения были приняты равными

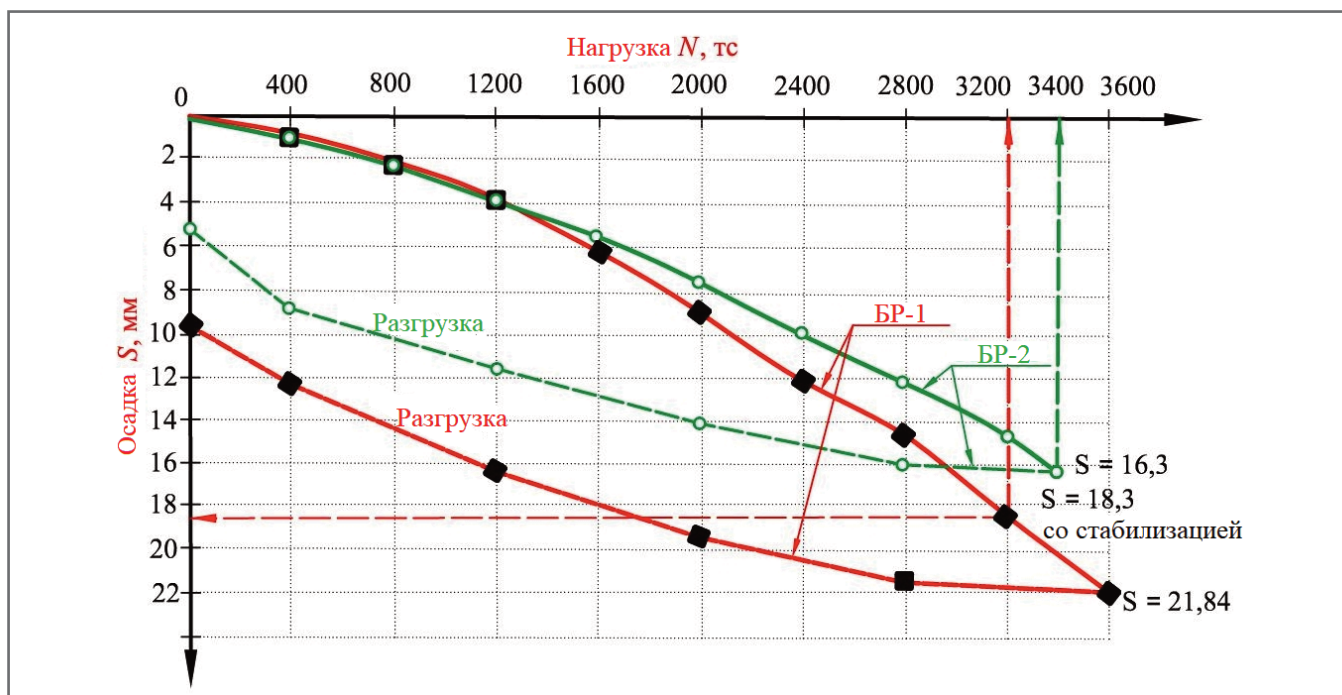


Рис. 4. Зависимость осадок баретт БР-1 и БР-2 от нагрузки

4000 кН, скорость условной стабилизации – равной 0,1 мм за последний час наблюдений [7].

На рисунке 4 сопоставлены графики стандартного вида для зависимости осадки S от нагрузки N по результатам испытаний обеих баретт (БР-1 и БР-2). Их визуальная оценка показала следующее.

1. Поведение БР-1 и БР-2 при последовательных испытаниях является качественно близким, но не одинаковым. Можно считать напряженно-деформированное состояние (НДС) грунта основания БР-1 во второй фазе испытания (при $N > 16\,000$ кН) более «деформативным», чем НДС грунта при последующем испытании БР-2.

2. После указанной выше нагрузки график БР-1 получает излом, что может быть обусловлено началом появления на верхней поверхности упорной балки незаметных волосяных трещин, ширина раскрытия которых δ на последней стабилизировавшейся ступени нагрузки $N = 32\,000$ кН достигла значений 2,5–3,0 мм.

3. Меньшая деформативность грунта основания БР-2 на конечной фазе по сравнению с БР-1 может быть обусловлена близостью расположения БР-2 к ранее испытанной БР-1, что повлияло на исходное напряженно-деформированное состояние БР-2.

4. Испытание БР-2 также сопровождалось выгибом упорной балки вверх, но уже повторным и при меньшей нагрузке $N = 34\,000$ кН, что вызвало даль-

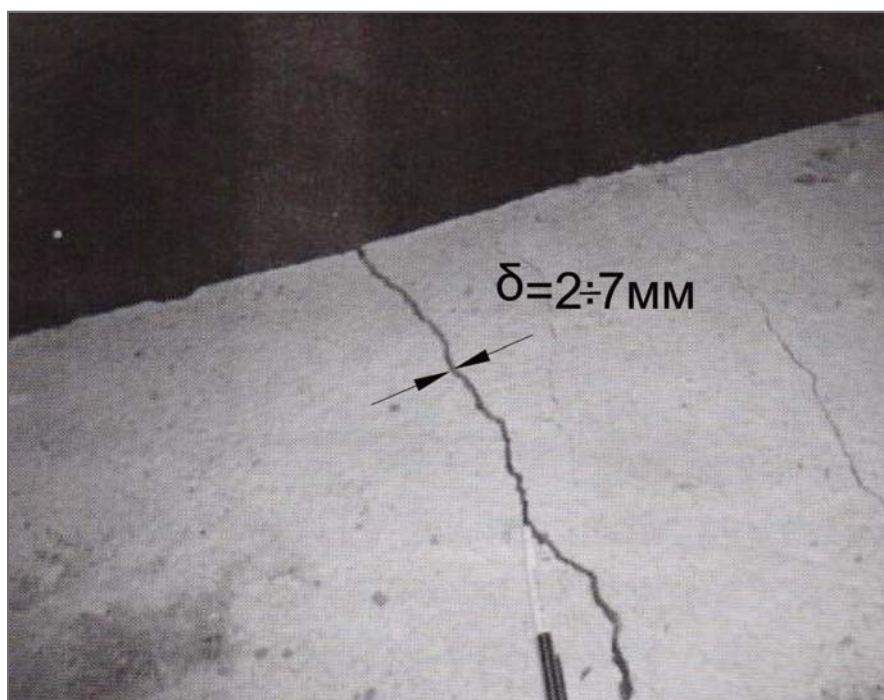


Рис. 5. Трещины на верхней поверхности упорной балки над БР-1, расширившиеся к моменту завершения испытания БР-2 (фото Е.А. Парфенова)

нейшее расширение трещин вплоть до 7 мм (рис. 5).

Практика зарубежных работ рекомендует для сохранения номинальной несущей способности одиночной сваи значительной длины L размещать ее на расстоянии l от соседних свай (имеется в виду расстояние между осями), которое составляет не менее, чем 10% от их длины [10]. То есть расстояние l между осями БР-1, БР-2 и осями аналогичных

им по конструкции анкерных свай должно быть:

$$l \geq 0,1L = 0,1 \times 52,2 \text{ м} = 5,2 \text{ м}, \quad (1)$$

что примерно вдвое больше фактического значения l , составляющего 2,55 м. Напряженно-деформированное состояние грунта основания БР-2 было изменено в сторону упрочнения в результате

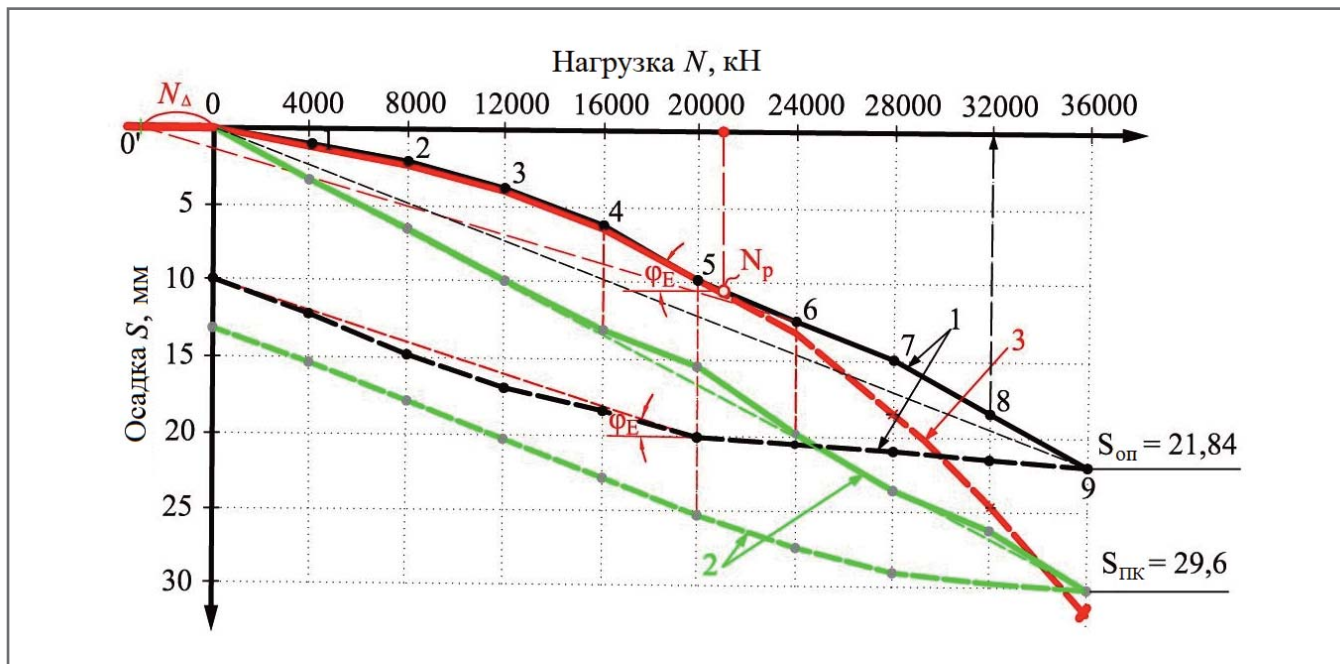


Рис. 6. Сравнение графиков испытаний БР-1: 1 – реального (опытного) испытания; 2 – модельного (расчетного на ПК) испытания; 3 – результата графоаналитической обработки способом, использованным авторами настоящей статьи. Буквенные обозначения: φ_E – угол наклона секущей к оси абсцисс для определения модуля деформации грунтового основания; $S_{оп}$ – опытная осадка (при реальном испытании); $S_{ПК}$ – модельная осадка (при расчете в программном комплексе MIDAS GTS NX)

предыдущего испытания БР-1, что и повлияло на испытание БР-2.

5. На рисунке 2 статьи [7] не показано, что опытные баретты обварены металлическими листами, хотя в тексте работы [7] это оговорено. Также не ясно, для чего стволы БР были покрыты стеклоизолом и как это было учтено в полученных физико-механических характеристиках грунтов ИГЭ? Каким способом был определен модуль деформации известняка на глубине 50 м? Эти данные были бы весьма полезны для подтверждения аналитических расчетов испытания баретт и разработки проекта фундаментов.

Важно, что наряду с рассмотрением реальных свойств грунтов и условий испытаний баретт (см. рис. 1) был выполнен 3D расчет БР-1 методом конечных элементов в программном комплексе MIDAS GTS NX. Конечноэлементные расчетные схемы базировались на модифицированной (упругопластической) модели Мора – Кулона (Modified Mohr-Coulomb model). Из рисунка 9 статьи [7] делается вывод о схожести графиков реальных и расчетных модельных испытаний свай ввиду близких линейных зависимостей осадки S от нагрузки N и малой разницы между осадками $\Delta S = 6,1$ мм на конечной ступени нагрузки $N = 36\,000$ кН (модельная осадка была на 2,6% больше опытной). Из представленного в настоящей статье рисунка 6, на котором скопированы эти графики из работы [7], далеко не сле-

дует линейность графика реальных испытаний БР-1 во всем диапазоне нагружения, а само сравнение модельной осадки с опытной, но не стабилизированной, вряд ли корректно.

С учетом близости расположения испытанных БР-1 и БР-2 к соседним анкерным бареттам была сделана оценка номинальной осадки БР-1, которая возникла бы при отсутствии влияния соседних свай. Согласно формуле эффективности несущей способности свайного куста (Converse Labarre formula) [10] экономичность Ξ (в долях единицы) одиночной сваи в кусте определяется по формуле:

$$\Xi = 1 - \arctg \frac{d_0}{l} x \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn}, \quad (2)$$

где l – 100%-ная работа одиночной сваи; d_0 – эквивалентный диаметр сваи; l – расстояние между осями БР-1, БР-2 и соседних свай, $l = 2,55$ м; n – число свай в ряду, $n = 4$; m – число рядов, $m = 1$.

Вычисленный эквивалентный диаметр БР составил:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4X(a+b)}{\pi}} = \sqrt{\frac{4X(0,64+2,8)}{\pi}} = 1,51 \text{ м}, \quad (3)$$

где a, b – длины сторон поперечного сечения БР, м.

Тогда:

$$\Xi = 1 - \arctg \frac{1,51}{2,55} x \frac{(4-1)1 + (1-1)4}{90 \times 1 \times 4} = 0,75. \quad (4)$$

То есть конечная осадка S_k при конечной нагрузке $N_k = 36\,000$ кН в случае отсутствия влияния на испытание БР-1 со стороны соседних свай составила бы:

$$S_k = S_{оп}/\Xi = 21,84/0,75 = 29,1 \approx S_{ПК} = 29,6 \text{ мм}, \quad (5)$$

где $S_{оп}$ – опытная осадка (при реальном испытании); $S_{ПК}$ – модельная осадка (при расчете в программном комплексе MIDAS GTS NX).

Таким образом, программный расчет подтвердил работу БР-1 как одиночной сваи, несмотря на ее испытание в условиях влияния соседних свай. Остается сожалеть о том, что программный расчет на основе упругопластической модели сваи не был продолжен на 2–3 ступени дальше линейного участка графика зависимости осадки от нагрузки $S_n = f(N)$. Это могло бы обеспечить, например, оценку долевых работ лба (N_L) и боковой поверхности (N_δ) баретты, нужных для проектирования.

Принято, что свая-баретта передает нагрузку на грунт как стойка, то есть только пятой (лбом). Такое допущение может быть принято при отсутствии шламового осадка в забое скважины. Но очистить забой от шлама не всегда удастся. Например, на 16-м участке строившегося делового центра «Москва-Сити» было проведено испытание грунтов сваями, заделанными в известняк, с раздельным нагружением лба и

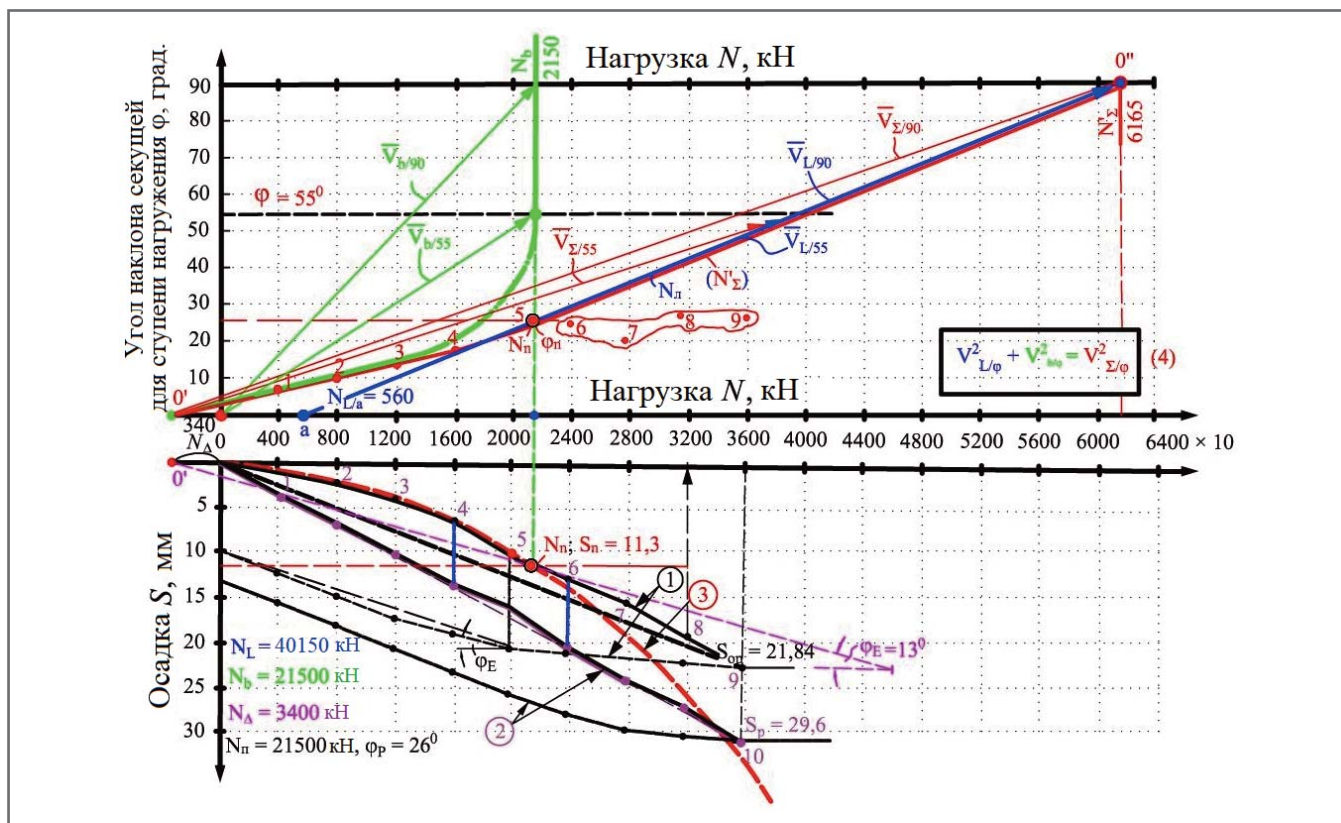


Рис. 7. Способ графоаналитической обработки результатов испытаний БР-1. Графики: 1 – реального (опытного) испытания; 2 – модельного (расчетного в программном комплексе MIDAS GTS NX) испытания; 3 – результата графоаналитической обработки способом, использованным авторами настоящей статьи

боковой поверхности [11]. Результаты испытаний показали, что осадки лба в несколько раз превышали осадки ствола, контакт которого с грунтом был только по боковой поверхности. В этом случае для свай большой длины силами бокового трения пренебрегать нельзя.

Сравним приведенные в статье [7] факты испытаний свай с итогами графоаналитической обработки графика «осадка – нагрузка» свай БР-1 по способу, рассмотренному в работах [12–15]. Результаты обработки данных испытаний на базе рисунка 6 детализованы на рисунке 7.

Предыдущие положительные итоги использования рассматриваемого способа графоаналитической обработки позволяют скорректировать требования к испытаниям грунта основания высоконагруженными сваями и сваями-балками при использовании упорной испытательной системы, числа домкратов, значений нагрузочных ступеней, вида и числа анкеров, указанных на рисунке 2.

Через начало и конец каждой ступени нагружения графика «осадка S – нагрузка N » для БР-1 (см. рис. 7, точки 1–9) проведем секущие и измерим транспортиром углы φ_i наклона этих секущих к горизонтали. Полученные в системе

координат (S, N) значения углов φ_i (в диапазоне 0–90 град.) отложим во вспомогательной системе координат (φ, N) , где через полученные точки 1–9 можно статистически провести одну или две прямые (см. рис. 7). Следует отметить, что точки 1–5 хорошо легли на одну прямую (до $N \approx 20\,000$ кН), а точки 6–9, обведенные в верхней части рисунка 7, сгруппировались иначе.

Продлим в системе координат (φ, N) линию для точек 1–5 в оба конца до пересечения с горизонтальными осями: внизу – в точке O' , вверху – в точке O'' . В точке O' получим неучтенную доопытную нагрузку (например, от массы свай) $N_\Delta = 3400$ кН. В точке O'' получим теоретически предельную по несущей способности нагрузку $N_{\Sigma/c} = 61\,650$ кН. При $N_{\Sigma/c}$ с углом наклона $\varphi_\Sigma = 90$ град. секущая ступени графика «осадка S – нагрузка N » вертикальна, а соответствующая ей осадка S_∞ асимптотически стремится к бесконечности.

Характер исчезновения линейной закономерности для точек 6–9 в системе координат (φ, N) может объясняться началом возможного трещинообразования на верхней поверхности упорной балки (сначала в виде незаметных или мало заметных волосных трещин). По мере роста нагрузок ширина трещин росла, и их

раскрытие при нагрузке $N = 36\,000$ кН уже не позволило стабилизировать осадку БР-1. По итогам испытания для БР-1 была принята наибольшая нагрузка $N_{\max} = 32\,000$ кН при стабилизированной осадке $S = 18,3$ мм < 20 мм, что допустимо по п. 7.3.5 СП 24.13330.2011.

Копия ветви разгрузки, перенесенная в точку O' (точку начала доопытной нагрузки N_Δ), в системе координат (S, N) пересекла исходный опытный график вблизи точки 5 при нагрузке $N_n = 21\,500$ кН и осадке $S_n = 11,3$ мм. С помощью такого приема на графике «осадка S – нагрузка N » фиксируются нагрузка предела пропорциональности N_n и соответствующая ему осадка S_n , а проведенная через точки O' и N_n секущая образует с горизонталью угол приведенного модуля деформации грунтового основания $\varphi_E = 13$ град.

Графоаналитический расчет испытанной БР-1 подобно результатам обработок данных других испытаний грунтов сваями показал, что при нагрузке предела пропорциональности N_n обычно происходит срыв свай по боковой поверхности (при предельной нагрузке $N_{\phi/c}$), а сам общий график испытания, соответственно, претерпевает излом. Угол φ_n для нагрузки предела пропорциональности N_n в системе координат (φ, N) по результа-

там графоаналитической обработки составил: $\varphi_n = 2\varphi_E = 26$ град.

Таким образом, использованное графоаналитическое построение позволяет более детально и однозначно обработать стандартный график статического испытания грунта свай, в том числе свай типа баретты. Авторами данной статьи при обработке данных стандартных испытаний производственных свай были определены наиболее характерные (ключевые) нагрузки для БР-1: доопытная $N_{\Delta} = 3400$ кН, предельная при срыве свай по боковой поверхности $N_{6/c} = 21\,500$ кН (35%) и предельная подо лбом $N_{л/c} = 61\,650 - 21\,500 = 40\,150$ кН (65%).

Долевая проверка нагрузок может быть выполнена по соответствующим долевым и общему графику в системе координат (φ, N) по формуле:

$$N_{л/\varphi} + N_{6/\varphi} = N_{\Sigma/\varphi}, \quad (6)$$

где слагаемые в левой части равенства – долевые нагрузки (соответственно лобовая и по боковой поверхности баретты), а в правой части представлена общая нагрузка, принятая по одной ординатной отметке φ .

Для определения момента вступления в работу долевого нагружения используется векторный подход:

$$V_{л/\varphi}^2 + V_{6/\varphi}^2 = V_{\Sigma/\varphi}^2, \quad (7)$$

где слагаемые в левой части равенства – квадраты модулей векторов долевого нагружения (соответственно для лба и боковой поверхности баретты), а в правой части представлен квадрат модуля вектора общего графика при выбранном значении угла φ (от 0 до 90 град.).

По полученным точкам долевого и общего графиков в системе координат (φ, N) можно построить долевые и общий графики стандартного вида в системе координат (S, N) , включая часть, не полученную при реальном испытании, вплоть до предела несущей способности $N_{\Sigma/90} = 61\,650$ кН. (см. рис. 7). Этот суммарный график до нагрузки $N_n = 21\,500$ кН практически совпадает с опытным, а при конечных опытной нагрузке $N_k = 36\,000$ кН и осадке $S_k \approx 30$ мм он совпадает с полученным при расчете методом конечных элементов в программном комплексе $S_{ПК} = 29,6$ мм (см. рис. 6). Поэтому можно довериться полному виду прогнозного графика $S = f(N)$.

Особо следует подчеркнуть, что авторами показан принцип обработки графика в предположении стандартно

прошедшего испытания свай-баретты. Сделана попытка по полученному незавершенному графику аналитически предсказать возможную работу свай во всем диапазоне нагружения. Итоги обработки данных подтвердили необходимость учета нагрузки от собственного веса свай ($N_{\Delta} = 3400$ кН) и факт запаздывания включения в работу лба баретты ($N_{л/а} = 5600$ кН). Такая постановка задачи требует знания предельных долевого нагружения подо лбом свай и по ее боковой поверхности, например по итогу инженерного прогноза.

Инженерный прогноз опытных результатов

Проведем упрощенные инженерные расчеты наиболее характерных (базовых) параметров прогнозируемого завершения графика $S = f(N)$ для испытания БР-1 на основе физико-механических показателей грунта основания (см. рис. 1) и конструктивно-технологических особенностей баретт (см. рис. 2).

1. Доопытная нагрузка N_{Δ} складывается из:

нагрузки от упорной балки:

$$N_{уп} = \frac{2,4 \cdot 2,5 \cdot 3,0 \cdot 19,6}{17,85} \cdot 7,65 = 1512 \text{ кН}; \quad (8)$$

нагрузки от батареи домкратов:

$$N_g = 2 \cdot 22 = 44 \text{ кН}; \quad (9)$$

собственного веса баретты с уширением:

$$N_{6/p} = 227 + 2200 = 2427 \text{ кН}; \quad (10)$$

Таким образом, суммарная доопытная нагрузка свай на грунт:

$$N_{\Delta} = N_{уп} + N_g + N_{6/p} = 1512 + 44 + 2427 = 3980 \text{ кН}; \quad (11)$$

2. Предельная нагрузка подо лбом свай:

$$N_{л/c} = R_c F_{6/p} = 23000 (0,64 \cdot 2,80) = 41\,200 \text{ кН}, \quad (12)$$

где R_c – временное сопротивление известняка одноосному сжатию, кПа; $F_{6/p}$ – площадь лба свай, м².

3. Предельная нагрузка по боковой поверхности свай (только по сцеплению с из-за неясности влияния стеклоизола):

$$N_{6/c} = \Sigma(c_i h_i) \cdot \Pi = 21\,200 \text{ кН}, \quad (13)$$

где $\Sigma(c_i h_i)$ – сопротивление грунта на

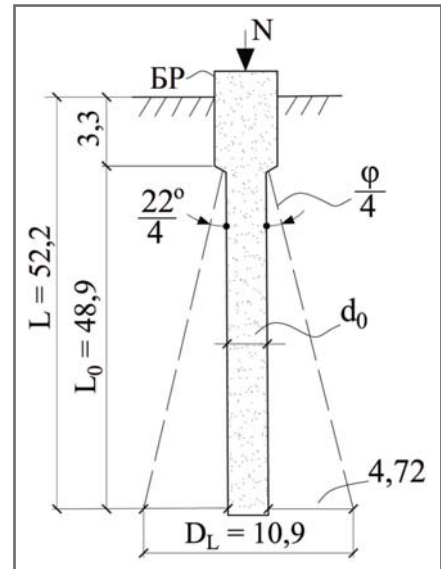


Рис. 8. Условный конус давления: D_L – диаметр основания условного конуса давления; L – заглубленная в грунт длина ствола свай; d_0 – эквивалентный диаметр свай (см. формулу (3)); φ – угол внутреннего трения грунтов, усредненный по глубине основания

погонный метр периметра поперечного сечения баретты в пределах рассматриваемых ИГЭ, кПа/м; Π – периметр поперечного сечения БР, м.

4. Суммарная нагрузка срыва свай, то есть предел несущей способности:

$$N_{\Sigma/c} = N_{л/c} + N_{6/c} = 41\,200 + 21\,200 = 62\,400 \text{ кН}. \quad (14)$$

5. Вычисление приведенного модуля деформации $E_{пр}$ системы «свая – грунт» учитывает условия испытания БР-1: геометрию свай, нагрузку и осадку на пределе пропорциональности, характер разгрузочного графика. В качестве исходной используется формула испытания грунта плоским жестким штампом:

$$E = \omega(1 - \mu^2) b \frac{\Delta N_{i/n}}{\Delta S_{i/n}}, \quad (15)$$

где ω – коэффициент осадки штампа, зависящий от его формы и соотношения горизонтальных размеров и составляющий от 0,79 до 2,0; μ – коэффициент бокового расширения грунта основания (коэффициент Пуассона); b – размер штампа; $\Delta N_{i/n}$, $\Delta S_{i/n}$ – соответственно удельная нагрузка и соответствующая ей осадка в границах предела пропорциональности графика испытания.

Формулу (15) можно трансформировать для определения приведенного модуля деформации $E_{пр}$ свай с использованием понятий, представленных на рисунке 8.

Диаметр основания условного конуса давления (см. рис. 8):

$$D_L = d_0 + 2 \cdot (L_0 \cdot \frac{q}{4}) = 1,51 + 2(48,9 \cdot 0,096) = 10,9 \text{ м};$$

$$D_L = \frac{8 \cdot d_0}{15} \cdot L_0 = 0,53 d_0 L_0. \quad (16)$$

Заменив размер штампа b в формуле (15) диаметром условного конуса давления D_L по формуле (16), введя нагрузку $N_{i/n}$ и соответствующую ей осадку $S_{i/n}$ в границах предела пропорциональности N_n графика испытания сваи с учетом доопытной нагрузки N_Δ , получим [14]:

$$\begin{aligned} E_{np} &= \omega(1 - \mu^2) \cdot D_L \cdot \frac{(N_{i/n} + N_\Delta)}{D_L^2 \cdot \Delta S_{i/n}} = \\ &= \omega(1 - \mu^2) \cdot \frac{(N_{i/n} + N_\Delta)}{D_L \cdot \Delta S_{i/n}} = \\ &= \omega(1 - \mu^2) \cdot \frac{(N_{i/n} + N_\Delta)}{0,53 \cdot d_0 \cdot L_0 \cdot \Delta S_{i/n}} \end{aligned} \quad (17)$$

Произведем расчет по формуле (17):

$$\begin{aligned} E_{np} &= 1,4(1 - 0,35^2) \cdot \left(\frac{21200 + 3980}{0,53 \cdot 1,51 \cdot 48,9 \cdot 0,0113} \right) = \\ &= 70180 \text{ кН/м}^2 = 70,2 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (18)$$

где $\omega = 1,4$ соответствует соотношению сторон 2,74 большего поперечного сечения сваи.

Линеаризованный график работы лба баретты в системе координат (φ, N) проходит через две точки, соответствующих нагрузкам пределов пропорциональности и несущей способности, что свидетельствует об однофазной работе грунта подо лбом сваи [16]. Линейный график работы лба фиксирует на оси нагрузок свое начало в точке α при осадке $S = 0$, где $N_{л/\alpha} = 5600$ кН. Точка начала $N_{л/\alpha}$ снесенная на общий стандартный график в системе координат (S, N) , фиксирует осадку вступления в работу лба $S_{л/\alpha} = 1,3$ мм на графике работы боковой поверхности. Ключевые результаты по нагрузкам, осадкам и модулю деформации, вычисленные простыми инженерными приемами, близки к графически полученным по опытной кривой или указанным на рисунках 1 и 6.

Инженерный прогноз подтвердил принципиальные результаты и численные значения базовых параметров графоаналитической обработки прерванного испытания сваи, как если бы оно было выполнено полностью. Для эмпирического контроля полностью завершено испытание длинных высоконагруженных свай могут послужить номинальные параметры [17]:

$$\begin{aligned} 0,95 N_{\Sigma C} &= 0,95 \cdot 61650 = 58600 \text{ кН} \rightarrow \\ \rightarrow S_{0,95N} &= 0,1 d_0 = 0,1 \cdot 1510 = 151 \text{ мм} \end{aligned} \quad (19)$$

Следует обратить внимание, что при предельной нагрузке сдвига по боковой поверхности сваи (пределе пропорциональности $N_n = 21500$ кН) начальная осадка сдвига $S_{сн}$ на графике составила 11,3 мм, а завершилась предельная сдвиговая осадка при ее величине 15–20 мм. Такие значения предельных сдвиговых осадок характерны для свай в суглинках и глинах [18]. При этой же формальной нагрузке на графике определим упругую осадку ствола сваи.

Фактическая нагрузка на ствол:

$$N_n = 21500 - (3400 + 5600) = 12500 \text{ кН}. \quad (20)$$

Удельное напряжение в сечении:

$$\sigma = N_n / \pi (0,5 d_0)^2 = 12500 / \pi (0,5 \cdot 1,51)^2 = 6980 \text{ Н/м}^2. \quad (21)$$

Относительное сжатие бетона ствола:

$$\varepsilon = \sigma / E = 698 / (35 \cdot 10^5) = 19,9 \cdot 10^{-5}. \quad (22)$$

Полная деформация ствола баретты:

$$\Delta = L \varepsilon = (52,2 \cdot 10^3) \cdot (0,199 \cdot 10^{-5}) = 10,4 \text{ мм}. \quad (23)$$

То есть сжатие ствола близко к осадке грунта по боковой поверхности сваи и общей осадке при нагрузке предела пропорциональности.

С помощью векторной проверки была показана необходимость и возможность долевого выделения работы лба и боковой поверхности баретты на суммарном графике стандартного вида $S = f(N)$ (см. рис. 7). Для этого было построено продолжение частично обработанного авторами графика испытания БР-1 (см. рис. 6) за пределы достигнутой при испытании нагрузки $N = 36000$ кН. Методика состоит в проверке равенства суммы квадратов модулей долевого вектора $(V_{л/\varphi})^2$ и $(V_{6/q})^2$ квадрату модуля $(V_{\Sigma/q})^2$ суммарной (общей) нагрузки: вверх на рисунке 9 – в системе координат (φ, N) при одинаковом угле φ , а внизу на рисунке 9 – в системе координат (S, N) при соответствующих осадках S для графика общих нагрузок.

Во втором случае векторы общей нагрузки $V_{\Sigma/S}$ проводят от начала доопытной нагрузки (точки O' на рисунке 9) до выбранной горизонтали на общем графике. Векторы лобовой $N_{л/\alpha}$ и боковой $N_{6/s}$ долевого нагрузок $V_{л/S}$ и $V_{6/s}$ (внизу рисунка 9) проводят от аналогичных начал каждого из долевого графиков в системе координат (S, N) до соответствующих горизонталей осадок S графика общих нагрузок.

Исключением являются равенства в системе координат (S, N) ниже точки f . Здесь (из-за графической разницы верхней и нижней вертикальных координатных осей на рисунке 9) при проверке требуемых равенств модуль вектора нагрузки по боковой поверхности с ростом осадок после срыва ($V_{6/r}$) остается постоянным, а модули векторов $V_{л/\alpha}$ и V_{Σ} сохраняют закономерную изменчивость.

Выводы

1. В инженерные изыскания для проектирования высоконагруженных свай глубокого заложения необходимо включать полевые испытания грунтов оснований полномасштабными сваями предполагаемых конструкций и технологий изготовления.

2. Перед полевыми испытаниями подобных свай следует производить предварительный расчет стеновой схемы, приближенной к условиям последующей работы сваи в фундаменте.

3. Рекомендуемое расстояние между осями испытываемых свай-баретт и свай-анкеров упорной системы должно составлять не менее 0,1 от глубины погружения стволов свай.

4. Графики «осадка – нагрузка» для статических испытаний грунтового основания сваями-бареттами следует продолжать до нагрузок, хотя бы на две ступени превышающих ориентировочные пределы пропорциональности этих нагрузочных графиков.

5. Полученный график $S = f(N)$ стандартного вида целесообразно статистически обработать, например описанным в статье графоаналитическим способом, позволяющим разделить испытание сваи в грунте по фазам работы грунта основания и спрогнозировать срыв сваи.

6. Приемы угловой аппроксимации позволяют графически выделить долевого нагрузки для лба и боковой поверхности ствола баретты в виде графиков «осадка – нагрузка», определить доопытную нагрузку и начало включения в работу долевого нагрузок.

7. Проверка графика «осадка S – нагрузка N » стандартного вида, продолженного за пределы реального испытания, выполняется с использованием линеаризованного графика «угол наклона секущей для ступени нагружения φ – нагрузка N », контролируемого посредством проверки равенства суммы квадратов модулей векторов долевого нагрузок квадрату вектора общей нагрузки для выбранных характеристических

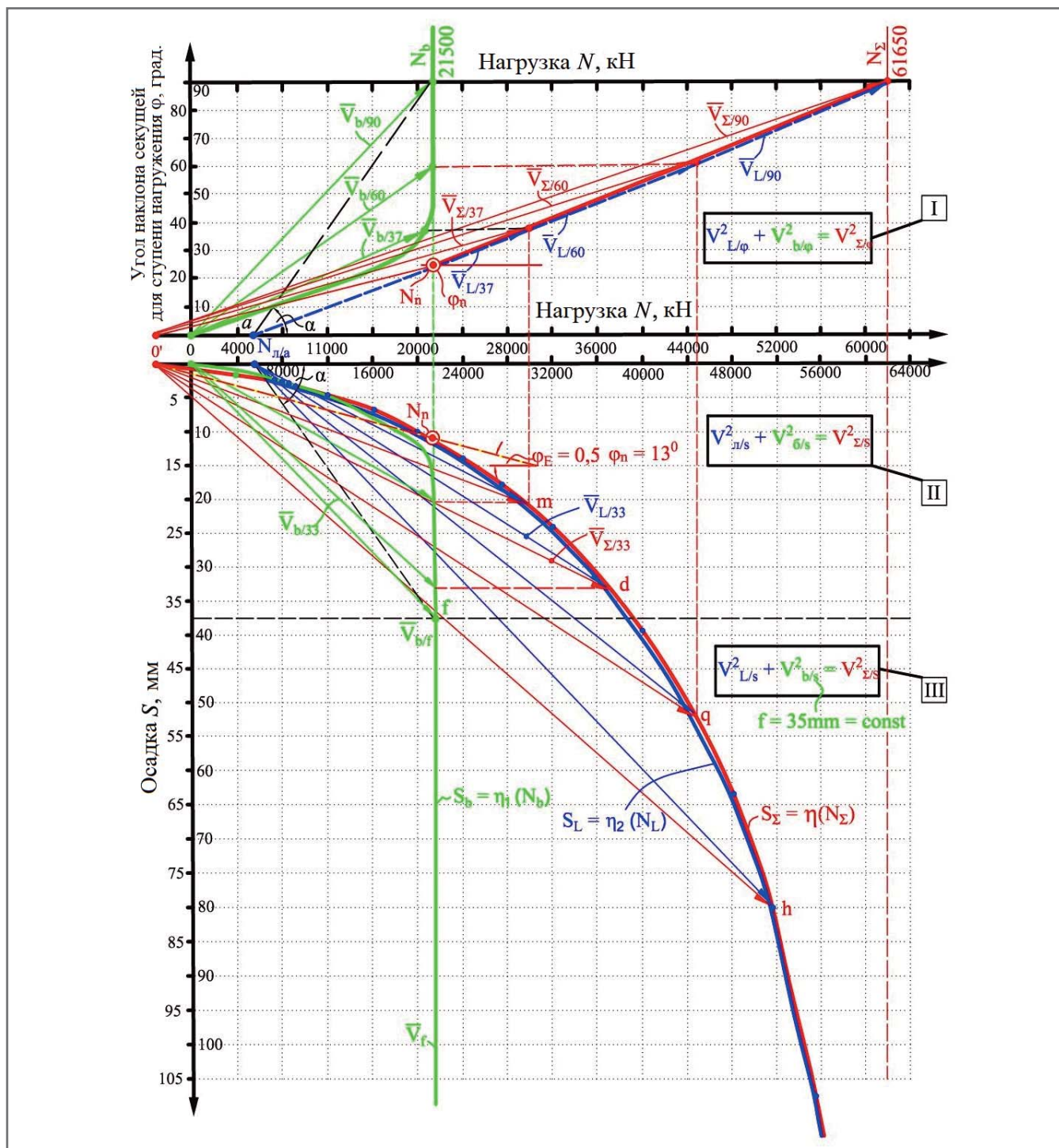


Рис. 9. Прогнозные долевые и общий графики стандартного вида, полученные для полностью завершённого испытания баретт. Вверху в системе координат (φ, N) для демонстрации примеров произвольно приняты три уровня φ , равные 37, 60 и 90 град. Внизу в системе координат (S, N) приняты аналогичные уровни для точек m, d, g, h (соответствующие ориентировочным осадкам S , равным 21, 33, 53, 82 мм). Сумма квадратов модулей векторов этих выбранных уровней соответствует квадрату модуля общей нагрузки. Синим цветом показаны долевые графики для лба, зеленым – для боковой поверхности. Красным цветом показан общий график. Буквенные обозначения для этих графиков имеют соответствующие цвета

уровней ординат (S и φ) для обоих типов графиков.

8. Определенные при проверке базовые нагрузки для баретты переводятся

в удельные сопротивления грунта под лбом и по боковой поверхности сваи, что позволяет более обоснованно использовать полученные данные для

проектирования свай иных конструкций, с иными параметрами и технологиям изготовления, чем предусмотрено обобщенными нормативами. $\blacksquare$

Список литературы ►

1. Ван Импе Ф. Фундаменты глубокого заложения, тенденции и перспективы развития // Развитие городов и геотехническое строительство. 2005. № 9. С. 7–33.

2. Петрухин В.П., Колыбин И.В., Шулятьев О.А. Мировой опыт устройства фундаментов небоскребов и высотных сооружений // Российская архитектурно-строительная энциклопедия. Том XIII. Строительство высотных зданий и сооружений. Москва: ООО «ВНИИТПИ», 2010. С. 288–327.
3. Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Мозгачева О.А. Новые способы геотехнического проектирования и строительства. Москва: АСВ, 2019.
4. Мангушев Р.А., Готман А.Л., Знаменский В.В., Пономарев А.Б. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии. Москва: АСВ, 2015.
5. Бахолдин Б.В. Плитно-свайные фундаменты. Проектирование и особенности технологии возведения // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2003. № 5. С. 24–272.
6. Безволев С.Г. Методика расчета комбинированных плитно-свайных и свайно-плитных фундаментов // Труды НИИОСП. 2008. Вып. 99. С. 26–52.
7. Знаменский В.В., Бахолдин Б.В., Парфенов Е.А., Мусатова М.В. Исследование несущей способности баретт для 56-этажного жилого здания // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2019. № 1. С. 2–6.
8. Колодий Е.В. Сравнительный анализ современных методов оценки несущей способности свай (на примере свай-баретты в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга) // Сборник трудов научно-технической конференции «Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции», г. Санкт-Петербург, 2010. С. 87–95.
9. Schmertmann J.H., Hayes J.A., Molnit T., Osterberg J.O. O-cell testing case histories demonstrate the importance of bored pile (drilled shaft) construction technique // Proceedings of the 4th International Conference on case histories in geotechnical engineering, St. Louis, MO, USA, 1998. P. 1103–1115.
10. Леонардс Дж.А., Челлис Р.Д. Основания и фундаменты. Глава 3. Свайные фундаменты. Москва: Стройиздат, 1968. С. 332–338.
11. Ладыженский И.Г., Сергеев А.В. Опыт проектирования свайных и свайно-плитных фундаментов на участке 16 ММЦД «Москва-Сити» // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 10. С. 46–54.
12. Гольдфельд И.З., Миндич А.Л. Обработка результатов статических испытаний фундаментов // Архитектура и строительные конструкции промышленных зданий: сборник. Свердловск: Изд-во УралПромстройНИИпроекта, 1971. С. 61–65.
13. Гольдфельд И.З. Способ построения графика $S = f(p)$ во всем диапазоне нагрузок вплоть до критической // Инженерно-строительные изыскания: сборник статей. 1972. № 2 (27). С. 44–50.
14. Гольдфельд И.З., Смирнова Е.А. Графоаналитическая обработка результатов статических испытаний грунтов забивными сваями и зондированием // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2011. № 5. С. 35–40.
15. Gol'dfel'd I.Z., Smirnova E.A. Application of sounding penetration test with the first type of penetrometers developed by “Fundament” to predicting pile load tests results // Proceedings of the International geotechnical Conference “Geotechnical challenges in megacities”, Moscow, 2010. Vol. 3. P. 1066–1072.
16. Бахолдин Б.В., Ястребов П.И., Часихина Л.П. Исследование особенностей сопротивления грунтов в основании забивных свай // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2009. № 2. С. 2–6.
17. Chin F.K. Estimation of ultimate load of piles not carried to failure // Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, 1970. P. 81–92.
18. Нарбут Р.М. Работа свай в глинистых грунтах. Л.: Стройиздат, 1972. С. 118.

References ►

1. Van Impe F. Fundamenty glubokogo zalozeniya, tendentsii i perspektivy razvitiya [Deep foundations, trends and development prospects]. Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo. 2005. 9: 7–33 (in Rus.).
2. Petruhin V.P., Kolybin I.V., Shulyat'yev O.A. Mirovoy opyt ustroystva fundamentov neboskrebov i vysotnykh sooruzheniy [World experience in the construction of foundations of skyscrapers and high-rise structures]. Rossiiskaya arkhitekturno-stroitel'naya ehntsiklopediya. ООО «ВНИИТПИ», Moskva, 2010. 13: 288–327 (in Rus.).
3. Petruhin V.P., Shulyat'yev O.A., Mozgacheva O.A. Novye sposoby geotekhnicheskogo proyektirovaniya i stroitel'stva [New ways of geotechnical design and construction]. ASV, Moskva, 2019 (in Rus.).
4. Mangushev R.A., Gotman A.L., Znamenskiy V.V., Ponomarev A.B. Svai i svaynye fundamenty. Konstruktsii, proyektirovaniye i tehnologii [Piles and pile foundations. Constructions, design and technologies]. ASV, Moskva, 2015 (in Rus.).
5. Baholdin B.V. Plitno-svainye fundamenty. Proyektirovaniye i osobennosti tehnologii vozvedeniya [Slab-pile foundations. Design and features of the construction technology]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2003. 5: 24–272 (in Rus.).
6. Bezvolev S.G. Metodika rascheta kombinirovannykh плитно-svainnykh i svayno-plitnykh fundamentov [A technique of the calculation of combined slab-pile and pile-slab foundations]. Trudy NIIOSP. 2008. 99: 26–52 (in Rus.).
7. Znamenskiy V.V., Baholdin B.V., Parfenov E.A., Musatova M.V. Issledovaniye nesushchey sposobnosti barett dlya 56-ehnazhnogo zhilogo zdaniya [A study of barrett load-bearing capacities for 56-storey residential building]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2019. 1: 2–6 (in Rus.).

8. Kolodiy E.V. Sravnitel'nyi analiz sovremennykh metodov otsenki nesushchey sposobnosti svay (na primere svay-barett v inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh Sankt-Peterburga). Sbornik trudov nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Aktual'nye voprosy geotekhniki pri reshenii slozhnykh zadach novogo stroitel'stva i rekonstruktsii». Sankt-Peterburg, 2010, 87–95 (in Rus.).
9. Schmertmann J.H., Hayes J.A., Molnit T., Osterberg J.O. O-cell testing case histories demonstrate the importance of bored pile (drilled shaft) construction technique. Proceedings of the 4th International Conference on case histories in geotechnical engineering, USA, MO, St. Louis, 1998, 1103–1115.
10. Leonards Dzh.A., Chellis R.D. Osnovaniya i fundamenty. Glava 3. Svainye fundamenty [Foundation Engineering. Chapter 3. Pile foundations]. Stroyizdat, Moskva, 1968, 332–338 (in Rus.).
11. Ladyzhenskiy I.G., Sergeyenko A.V. Opyt proyektirovaniya svaynykh i svayno-plitnykh fundamentov na uchastke 16 MMTsD «Moskva-Siti» [Experience in designing pile and pile-slab foundations at site 16 of the Moscow International Business Center “Moscow-City”]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2016. 10: 46–54 (in Rus.).
12. Gol'dfel'd I.Z., Mindich A.L. Obrabotka rezul'tatov staticheskikh ispytaniy fundamentov [Processing of the results of static tests of foundations]. Arkhitektura i stroitel'nye konstruktssii promyshlennykh zdaniy: sbornik. Izd-vo UralPromstroINIIproekta, Sverdlovsk, 1971, 61–65 (in Rus.).
13. Gol'dfel'd I.Z. Sposob postroeniya grafika $S = f(p)$ vo vsem diapazone nagruzok vplot' do kriticheskoy [The method of plotting $S = f(p)$ over the entire load range up to the critical one]. Inzhenerno-stroitel'nye izyskaniya: sbornik statey. 1972. 2 (27): 44–50 (in Rus.).
14. Gol'dfel'd I.Z., Smirnova E.A. Grafoanaliticheskaya obrabotka rezul'tatov staticheskikh ispytaniy gruntov zabivnymi svayami i zondirovaniyem [Graph-analytical processing of the results of static tests of soils by driven piles and probing]. Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov. 2011. 5: 35–40 (in Rus.).
15. Gol'dfel'd I.Z., Smirnova E.A. Application of sounding penetration test with the first type of penetrometers developed by “Fundament” to predicting pile load tests results. Proceedings of the International geotechnical Conference “Geotechnical challenges in megacities”. Moscow, 2010. 3: 1066–1072.
16. Baholdin B.V., Yastrebov P.I., Chashchihina L.P. Issledovaniye osobennostey soprotivleniya gruntov v osnovanii zabivnykh svay [A study of resistance features of foundation soils of driven piles]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2009. 2: 2–6 (in Rus.).
17. Chin F.K. Estimation of ultimate load of piles not carried to failure. Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, 1970, 81–92.
18. Narbut R.M. Rabota svay v glinistyykh gruntah. Stroizdat, Leningrad, 1972. S. 118.

Информация об авторах

ГОЛЬДФЕЛЬД ИГОРЬ ЗУСЬЕВИЧ

Научно-технический консультант Международной Ассоциации Фундаментостроителей (МАФ), к.т.н., г. Москва, Россия

ЯСТРЕБОВ ПЕТР ИВАНОВИЧ

Заместитель заведующего лабораторией свайных фундаментов НИИОСП им. Н.М. Герсееванова АО «НИЦ “Строительство”», к.т.н., г. Москва, Россия

ДУБРОВС КАЯ ЕКАТЕРИНА СТАНИСЛАВОВНА

Генеральный директор Международной Ассоциации Фундаментостроителей (МАФ), г. Москва, Россия

Information about the authors

IGOR' Z. GOL'DFEL'D

Scientific and technical consultant, International Association of Foundation Contractors (IAFC), PhD (Candidate of Science in Technics), Moscow, Russia

PETR I. YASTREBOV

Deputy head of the Laboratory of Pile Foundations, Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Research Center of Construction JSC, Moscow, Russia

EKATERINA S. DUBROVSKAYA

General director, International Association of Foundation Contractors (IAFC), Moscow, Russia

Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал
Геоинфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения



ШЕЙШЕНАЛЫ ЭШМАНБЕТОВИЧ УСУПАЕВ ОТМЕЧАЕТ 70-ЛЕТИЕ

КОРОЛЁВ В.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия, va-korolev@bk.ru
Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва,
119991, Россия

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена 70-летию юбилею Шейшеналы Эшманбетовича Усупаева – видного деятеля науки и образования Киргизской Республики в области инженерной геологии. Кратко рассказывается о его образовании, защите кандидатской и докторской диссертаций, научной, педагогической и руководящей деятельности, государственных наградах. Приводится поздравление от коллектива геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и от редакции журнала «ГеоИнфо».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Усупаев Шейшеналы Эшманбетович; просадочность лёссовых грунтов; опасные геодинамические процессы; инженерно-геологические карты; геоэкологические карты; инженерно-геологические условия; эколого-геологические условия; техногенные воздействия; трансформация условий

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Королёв В.А. Шейшеналы Эшманбетович Усупаев отмечает 70-летие // ГеоИнфо. 2022. № 12. С. 96–98

SHEISHENALY ESHMANBETOVICH USUPAEV CELEBRATES HIS 70th BIRTHDAY

VLADIMIR A. KOROLEV

Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia, va-korolev@bk.ru
Address: 1 Leninskiye Gory, Moscow
119991, Russia

ABSTRACT

The article is dedicated to the 70th anniversary of Sheishenaly Eshmanbetovich Usupayev who is a prominent figure in science and education of the Kyrgyz Republic in the field of engineering geology. The paper briefly tells about his education, dissertations defence, scientific, pedagogical and managerial activities, state awards. It also presents congratulations from the staff of the Geological Faculty of Lomonosov Moscow State University and from the editorial staff of the *GeolInfo* journal.

KEYWORDS:

Usupayev Sheishenaly Eshmanbetovich; loess soil subsidence; dangerous geodynamic processes; engineering-geological maps; geocological maps; engineering-geological conditions; ecological-geological conditions; technogenic impacts; transformation.

FOR CITATION:

Korolev V.A. Sheishenaly Eshmanbetovich Usupayev otmechayet 70-letie [Sheishenaly Eshmanbetovich Usupayev celebrates his 70th birthday]. *GeolInfo*. 2022. 12: 96–98

1 января 2023 года исполняется 70 лет видному киргизскому инженеру-геологу Усупаеву Шейшеналы Эшманбетовичу, доктору геолого-минералогических наук, профессору кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Киргизского государственного университета горного дела и природных ресурсов имени академика У. Асаналиева при КТУ имени И. Раззакова в г. Бишкеке (Киргизия).

В 1975 году Ш.Э. Усупаев окончил Фрунзенский политехнический институт, защитив дипломный проект на тему «Инженерно-геологическая типизация Атбашинской и Аксайской межгорных впадин» и ему была присвоена квалификация «горный инженер-гидрогеолог». С 1977 по 1982 год он был стажером-исследователем и аспирантом на кафедре грунтоведения и инженерной геологии геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, занимаясь исследованиями природы просадочности лёссовых грунтов Киргизского Тянь-Шаня. В 1982 году Ш.Э. Усупаев там же защитил кандидатскую диссертацию по теме «Формирование просадочности лёссовых пород Чуйской впадины». А в 1992 году в Институте

гидрогеологии и инженерной геологии (ГИДРОИНГЕО, г. Ташкент) он защитил докторскую диссертацию по теме «Природа просадочности лёссовых формаций Киргизского Тянь-Шаня».

В 1993–1994 годах Ш.Э. Усупаев работал начальником отдела внедрения научных достижений Государственного комитета по науке и новым технологиям Киргизской Республики, в 1994–1996 годах – главным научным сотрудником Института водных проблем и гидроэнергетики Национальной академии наук Киргизской Республики (ИВ-ПиГЭ НАН КР). С 1994 года по настоящее время он является членом ученого совета ИВПиГЭ НАН КР, а также членом МГДС (Межгосударственного диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций, созданного при Институте водных проблем и гидроэнергетики Национальной академии наук Киргизской Республики, Институте водных проблем, гидроэнергетики и экологии Академии наук Республики Таджикистан и Таджикском национальном университете).

В 1996–2006 годах Ш.Э. Усупаев работал руководителем группы, затем начальником отдела прогнозирования и обследования чрезвычайных ситуаций

в Министерстве экологии и чрезвычайных ситуаций Киргизской Республики. С 2006 года он работал ведущим научным сотрудником в Центрально-Азиатском институте прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ, г. Бишкек), с 2009 по 2014 год – там же исполняющим обязанности руководителя отдела «Геодинамика и геокатастрофы», с 2015 года по настоящее время – там же ведущим научным сотрудником отдела «Геодинамика и геориски».

Область научных интересов Ш.Э. Усупаева охватывает различные вопросы просадочности лёссовых грунтов Тянь-Шаня и других регионов Земли, прогнозирования их свойств и защиты от просадок, оценки опасных геодинамических процессов и явлений на территории Киргизии, разработки и составления инженерно-геологических и геоэкологических карт различного назначения, оценки трансформации инженерно-геологических и эколого-геологических условий территории Киргизии при различных техногенных воздействиях. Он постоянно поддерживает научные связи с кафедрой инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Ш.Э. Усупаевым опубликовано свыше 550 научных работ по различным вопросам инженерной геологии и геоэкологии, в том числе около 70 монографий, учебных пособий, атласов, карт. Им получено 24 авторских свидетельства на изобретения от Киргизпатента (Государственной службы интеллектуальной собственности и инноваций при Правительстве Киргизской Республики).

Под руководством Ш.Э. Усупаева многие будущие инженеры-геологи за-

щитили дипломные, бакалаврские и магистерские работы. В настоящее время он является научным руководителем и консультантом 13 аспирантов и 5 докторантов.

За плодотворную научно-педагогическую деятельность Ш.Э. Усупаев награжден Почетной грамотой Киргизской Республики (2003 г.), почетным знаком Киргизской Республики «Отличник образования» (2013 г.), почетным знаком Министерства экологии и

чрезвычайных ситуаций Киргизской Республики «Коргоо» и др. 

Коллектив сотрудников и преподавателей геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и сотрудники редакции журнала «ГеоИнфо» сердечно поздравляют Шейшеналы Эшманбетовича с юбилеем и желают ему новых творческих успехов на благо развития инженерной геологии и сотрудничества ученых Киргизии и России!

Источники ►

1. 70 лет – юбилей профессора Ш.Э. Усупаева // Тянь-Шаньское геологическое общество. 28.12.2022. URL: geotianshan.org/anniversary-of-professor-sh-e-usupaev/.
2. День рождения Усупаева Шейшеналы Эшманбетовича // ИВПИГЭ. 28.12.2022. URL: iwpgk/?p=4255.
3. Резюме. Усупаев Шейшеналы Эшманбетович // ИВПИГЭ. URL: iwpgk/wp-content/uploads/2021/05/Усупаев-Ш.Э.-1.03.2020-Резюме.15-стр-из-портф-конвертирован.pdf.
4. Др., проф. Усупаев Шейшеналы Эшманбетович [Dr., prof. Usupaev Sheishenaly Eshmanbetovich] // CAIAG (ЦАИИЗ). URL: caiag.kg/ru/otdely-ru/otdel-1-geodinamika-i-georiski/struktura-i-sotrudniki/45-usupaev-sheishenaly-eshmanbetovich.

References ►

1. 70 let – yubiley professora Sh.E. Usupayeva [70th anniversary of professor Sh.E. Usupaev] // Tyan'-Shan'skoye geologicheskoye obshchestvo. 28.12.2022. URL: geotianshan.org/anniversary-of-professor-sh-e-usupaev/ (in Rus.).
2. Den' rozhdeniya Usupayeva Sheishenaly Eshmanbetovicha [Birthday of Usupaev Sheishenaly Eshmanbetovich] // IVPIGE. 28.12.2022. URL: iwpgk/?p=4255 (in Rus.).
3. Rezyume. Usupayev Sheishenaly Eshmanbetovich [Resume. Usupaev Sheishenaly Eshmanbetovich] // IVPIGE. URL: iwpgk/wp-content/uploads/2021/05/Usupaev-SH.EH.-1.03.2020-Rezyume.15-str-iz-portf-konvertirovan.pdf (in Rus.).
4. Dr., prof. Usupayev Sheishenaly Eshmanbetovich [Doctor, professor Usupaev Sheishenaly Eshmanbetovich] // CAIAG (TsAIIZ). URL: caiag.kg/ru/otdely-ru/otdel-1-geodinamika-i-georiski/struktura-i-sotrudniki/45-usupaev-sheishenaly-eshmanbetovich (in Rus.).

Информация об авторе

КОРОЛЕВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ
Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., г. Москва, Россия

Information about the author

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

ГеоИнфо Независимый электронный журнал



**С 2022 года журнал «ГеоИнфо» будет
выходить ежемесячно в формате *PDF.**

WWW.GEOINFO.RU



Mountain
Risk
Consultancy

ЗАЩИТА ОТ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И СНИЖЕНИЕ РИСКОВ ПОСЛЕДСТВИЙ КАТАСТРОФ



- РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ
- КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ
- ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ И КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ЗОНИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
- ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ
- РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И МОНИТОРИНГ



Skype: Mountain Risk Consultancy
E-Mail: office@mountain-risk.ru
<https://www.mountain-risk.ru>





КРЕДО-2022: КАКИМ БЫЛ ЭТОТ ГОД И ЧТО НАС ЖДЕТ В БУДУЩЕМ

КУКАРЕКО И.С.

ООО «Компания «КРЕДО-ДИАЛОГ»,
г. Москва, Россия,
moscow@credo-dialogue.com
Адрес: Россия, 105187, г. Москва,
Измайловское шоссе, д. 71, стр. 8,
этаж 3, ком. 4

АННОТАЦИЯ

В статье кратко рассматриваются итоги работы ООО «Компания «КРЕДО-ДИАЛОГ» в 2022 году. Это и обновление технологий и программных продуктов Credo (КРЕДО) для информационного моделирования, и импортозамещение в этой сфере, и многое другое. Также рассказывается о планах компании на будущее.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

программные продукты «КРЕДО»; импортозамещение; технологии информационного моделирования (ТИМ); взаимодействие, планы на будущее.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Кукареко И.С. КРЕДО-2022: каким был этот год и что нас ждет в будущем // ГеоИнфо. 2022. № 12. С. 100–103

CREDO-2022: WHAT WAS THIS YEAR LIKE AND WHAT AWAITS US IN THE FUTURE

IVAN S. KUKAREKO

ООО "Kompaniya "KREDO-DIALOG"
[CREDO-DIALOG Company LLC],
Moscow, Russia,
moscow@credo-dialogue.com
Address: 71 Izmailovskoye shosse, bld. 8,
floor 3, off. 4, Moscow, 105187, Russia

ABSTRACT

The paper briefly discusses the results of the work of ООО "Kompaniya "KREDO-DIALOG" [CREDO-DIALOG Company LLC] in 2022. They include updating CREDO technologies and CREDO software products for information modeling, import substitution in this area, and much more. The article also tells about the company's plans for the future.

KEYWORDS:

CREDO software products; import substitution; information modeling technologies (IMT); interaction; plans for the future.

FOR CITATION:

Kukareko I.S. KREDO-2022: kakim byl etot god i chto nas zhdet v budushchem [CREDO-2022: what was this year like and what awaits us in the future].
GeoInfo. 2022. 12: 100–103

О компании «КРЕДО-ДИАЛОГ» ►

Прежде чем подводить итоги 2022 года, хотелось бы рассказать тем, кто с нами еще не знаком, о компании «КРЕДО-ДИАЛОГ» (полное название – ООО «Компания «Кредо-Диалог») и о том, что такое технологии «КРЕДО».

В первую очередь компания «КРЕДО-ДИАЛОГ» разрабатывает и оснащает организации лицензионными программными продуктами «КРЕДО». Также наши специалисты оказывают техническую поддержку пользователям этих продуктов, разрабатывают проекты их внедрения с учетом специфики производственных процессов той или иной организации. И это важно, так как с учетом внешней политики импортозамещения поступает много запросов на разработку новых продуктов или на доработку существующих программ «КРЕДО» под конкретные производственные задачи.

Кроме того, мы обучаем пользователей в различных форматах. Эту работу ведет и курирует сертифицированный центр АНО ДПО «КРЕДО-образование». Обучение доступно как в онлайн, так и в офлайн-режиме, а также в индивидуальном порядке с выездом наших специалистов на территорию заказчика.

Ну и, безусловно, мы информируем инженерное сообщество обо всех на-



винках «КРЕДО», о наших планах и разработках, об изменениях в отрасли и инженерной реальности вокруг нас.

Сообщество «КРЕДО» ►

К настоящему моменту компания «КРЕДО-ДИАЛОГ» существует уже более 33 лет. Свыше 14 700 организаций используют разработанные ею программные продукты. Мы всегда можем быть ближе к пользователям и эффективно работать в регионах благодаря сети официальных дистрибьюторов «КРЕДО» – «КД-инжиниринг» (г. Екатеринбург), «Сибирский Инженер»

(г. Красноярск), «Центр Высоких Технологий» (г. Хабаровск). Конечно, работа компании невозможна и без других наших региональных партнеров: «КРЕДО-ДИАЛОГ» имеет развитую дилерскую сеть по всей территории РФ, а также в Казахстане.

Программный комплекс «КРЕДО» ►

Если говорить о направлениях программного комплекса «КРЕДО», то он охватывает все этапы жизненного цикла строительного объекта – изыскания (инженерно-геологические и инженерно-



геодезические), проектирование, строительство и эксплуатацию.

В разные периоды в комплекс «КРЕДО» входило более 77 продуктов. Все их поколения впитывали опыт и квалификацию наших инженеров, полевых специалистов, программистов, аналитиков и, конечно, тех пользователей, которые дают нам обратную связь по всем нашим продуктам. Продукты «КРЕДО» – это мультиплатформенная разработка, которая на данный момент работает как в операционной системе Windows, так в операционной системе Astra Linux.

Многообразие продуктов «КРЕДО» позволяет выстроить эффективную технологическую цепочку работы специалиста. А уже в зависимости от специфики тех задач, которые решает организация, мы можем предложить оптимальный состав рабочих мест «КРЕДО», чтобы «закрыть» любые направления работы – от обработки данных лазерного сканирования в программе «КРЕДО 3D СКАН» до реконструкции и ремонта автомобильной дороги в программе «КРЕДО ДОРОГИ» и т. д.

Этой осенью программный комплекс «КРЕДО» пополнился двумя новыми продуктами – «КРЕДО РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗЕММАСС» (для решения задач распределения земляных масс при проектировании и строительстве транспортных объектов) и «КРЕДО ГЕОТЕХНИКА» (для определения устойчивости откоса или природного склона).

Хотелось бы отметить, что сегодня все программные продукты «КРЕДО» внесены в «Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных» Минкомсвязи РФ и разрабатываются в соответствии с действующими нормативными документами России и других стран СНГ.

Возвращаясь к теме работы в разных операционных системах, стоит отме-

тить, что в 2022 году «первой ласточкой» стала программа «КРЕДО ТРАНСКОР». Новая версия этого продукта работает и в операционной системе Astra Linux. В течение 2022 года также вышли и другие программы, работающие в Astra Linux, – «КРЕДО РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ», «КРЕДО НИВЕЛИР», «КРЕДО 3D СКАН» (один из самых популярных продуктов геодезической линейки «КРЕДО», которым с 2016 года пользуются более 500 организаций), «КРЕДО ДАТ» (флагман геодезической линейки «КРЕДО»), «КРЕДО ФОТОГРАММЕТРИЯ» (самый молодой продукт геодезической линейки «КРЕДО»).

До конца 2022 года на работу в операционной системе Astra Linux были переведены все основные программные продукты «КРЕДО».

Импортозамещение ►

В результате ухода ряда зарубежных игроков с рынка России 2022 год для многих разработчиков программного обеспечения (ПО) в нашей стране прошел под лозунгом «Импортозамещение». И здесь на руку компании «КРЕДО-ДИАЛОГ» сыграл наш 33-летний опыт разработки отечественного ПО. Мы оказались готовы предложить пользователям безболезненную и эффективную схему перехода на отечественные разработки «КРЕДО» взамен ушедших AutoCAD, TBC, Leica и т. д.

Мы проделали большую работу по размещению информации о продуктах «КРЕДО» в разных реестрах и отраслевых каталогах по тематике импортозамещения, провели много мероприятий как в очном, так и в онлайн-формате, где представляли свои разработки и решения.

Мы постарались поддержать пользователей и запустили программу льготного импортозамещения, которая продолжит работать и в 2023 году и помо-

жет перейти с зарубежных аналогов на продукты «КРЕДО» на специальных условиях.

Технологии информационного моделирования как реальность ►

Достаточно много вопросов от наших пользователей поступает по тематике технологий информационного моделирования (ТИМ). Первые запросы начали поступать, когда в СМИ появилась информация об обязательном переходе на ТИМ в соответствии с постановлениями Правительства РФ. Часть организаций, таких как ООО «ГЕО-ПРОЕКТ» (г. Санкт-Петербург), ОАО «ПИИ Тюменьдорпроект» (г. Тюмень), ООО «Центрдорпроект» (г. Москва), мы уже перевели на эти технологии и продолжаем помогать в «отстройке» бизнес-процессов.

Работа по переходу к ТИМ в компании «КРЕДО-ДИАЛОГ» начинается с аудита, проводимого нашими специалистами. Затем разрабатывается ТИМ-регламент, позволяющий перевести работу различных отделов на новую концепцию. Также мы проводим обучение специалистов. В этом году у нас появился сертифицированный курс по тематике технологий информационного моделирования. Пройти обучение специалисты могут в дистанционном формате без отрыва от производства, а затем получить удостоверение установленного образца о повышении квалификации по ТИМ. Более 20 организаций уже прошли это обучение.

После обучения начинается работа с пилотным проектом. Специалисты компании «КРЕДО-ДИАЛОГ» вместе с вами могут пройти все этапы проекта вплоть до экспертизы.

В течение последних 5 лет мы регулярно принимаем участие в конкурсах «ТИМ-лидер», представляем проекты



наших пользователей, выполненные в тесном сотрудничестве со специалистами компании «КРЕДО-ДИАЛОГ». Именно такой формат подачи кажется нам наиболее интересным, потому что показывает не только видение и разработки разработчика ПО, но и живой практический пример того, как эти технологии работают на реальных объектах и решают реальные задачи. В этом году мы стали победителями конкурса в номинации «Информационное моделирование объектов» вместе с нашими партнерами из АО «Кольская ГМК» и ООО «Мурманское землеустроительное предприятие».

Выход в офлайн ►

2022 год стал очень насыщенным в плане работы на различных мероприятиях. В этот первый «постковидный» год стало очевидно, насколько соскучились мы и наши пользователи по живому общению. Форум и выставка «Геоинфо ЭКСПО», конференция «Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъемка», конференция «Цифровая трансформация в горной промышленности и машиностроении», конгресс «ТИМ-сообщество», форум и выставка «100+ Techno-Build», Дальневосточный ВМ-форум, выставка-форум «Дорога» (Казань), чемпионат Atomskills – это лишь малая часть мероприятий, на которых работали специалисты компании «КРЕДО-ДИАЛОГ» в 2022 году.

Этот год стал для нас годом партнерства. Вместе с нашими дилерами и давними друзьями мы проводили совместные мероприятия. Например, вместе с компанией «АСКОН» мы участвовали в форуме «РосТИМ». С компанией «Софтлайн» мы проводили вебинары по темам информационного моделирования и импортозамещения. С компанией «ПРИН» (поставщиком геодезического оборудования) мы проводили вебинары и очные встречи с пользователями, например в ноябре в Иркутске состоялось мероприятие с демонстрацией современного оборудования и возможностей продуктов «КРЕДО».

Безусловно, в 2022 году не обошлось без праздников. На форуме «100+ Techno-Build» мы отметили 15-летие нашего уральского партнера ООО «КД-инжиниринг», а 10-летие ООО «Сибирский Инженер» мы отметили отдельной конференцией компании «КРЕДО-ДИАЛОГ» в Красноярске, на которой не только были показаны наши новинки, но и было рассказано о перспективах развития комплекса «КРЕДО».

Не оставили мы без внимания и учебные заведения. Уже много лет работает программа «КРЕДО ВУЗ», которая позволяет оснащать учебные заведения на льготных условиях, бесплатно обучать преподавателей и бесплатно обновлять программные продукты «КРЕДО» по мере выхода их новых версий.

Поддерживаем мы и инициативу общественного движения WorldSkills. В этом году мы были экспертами финала организованного им чемпионата в Саранске. И, как уже отмечалось, мы активно поддержали чемпионат Atomskills в Казани, а также работали на Международном строительном чемпионате.

Мы также работали в индивидуальном порядке с крупными клиентами, проводя для них специальные мероприятия и вебинары, – это были структуры ПАО «Газпром», ПАО «НК «Роснефть», ОАО «РЖД», ООО «КНАУФ ГИПС», ПАО «Полюс», ПАО «Сургутнефтегаз» и др.

Планы на будущее ►

Что можно сказать о планах на следующий (2023) год? У нас ведется большая работа по разработке геодезической линейки «КРЕДО». В начале 2023 года выйдет новая версия программы «КРЕДО ГНСС», где будут учтены пожелания пользователей по развитию ее функционала. Весной выйдет версия 3.0 программных продуктов на платформе «КРЕДО 3D».

Как всегда, будет много мероприятий. Об этом мы расскажем в отдельных публикациях.

Соответствие тенденциям и инновациям рынка и учет их в компании «КРЕДО-ДИАЛОГ», тесное взаимодействие сотрудников компании с пользователями и партнерами, невысокая стоимость программ «КРЕДО», которая облегчает их внедрение в организациях, включение их в реестр отечественных программных продуктов, их соответствие современным нормам и перевод на новые операционные системы – все это определило нашу работу в 2022 году и продолжит определять ее в следующем году. **И**

В заключение хотелось бы поздравить пользователей продуктов компании «КРЕДО-ДИАЛОГ» и тех, кто пока не знаком с этими программами, с Новым годом и пожелать всем крепкого здоровья, новых вызовов и свершений в профессиональном плане и благополучия во всех отношениях.

Информация об авторе

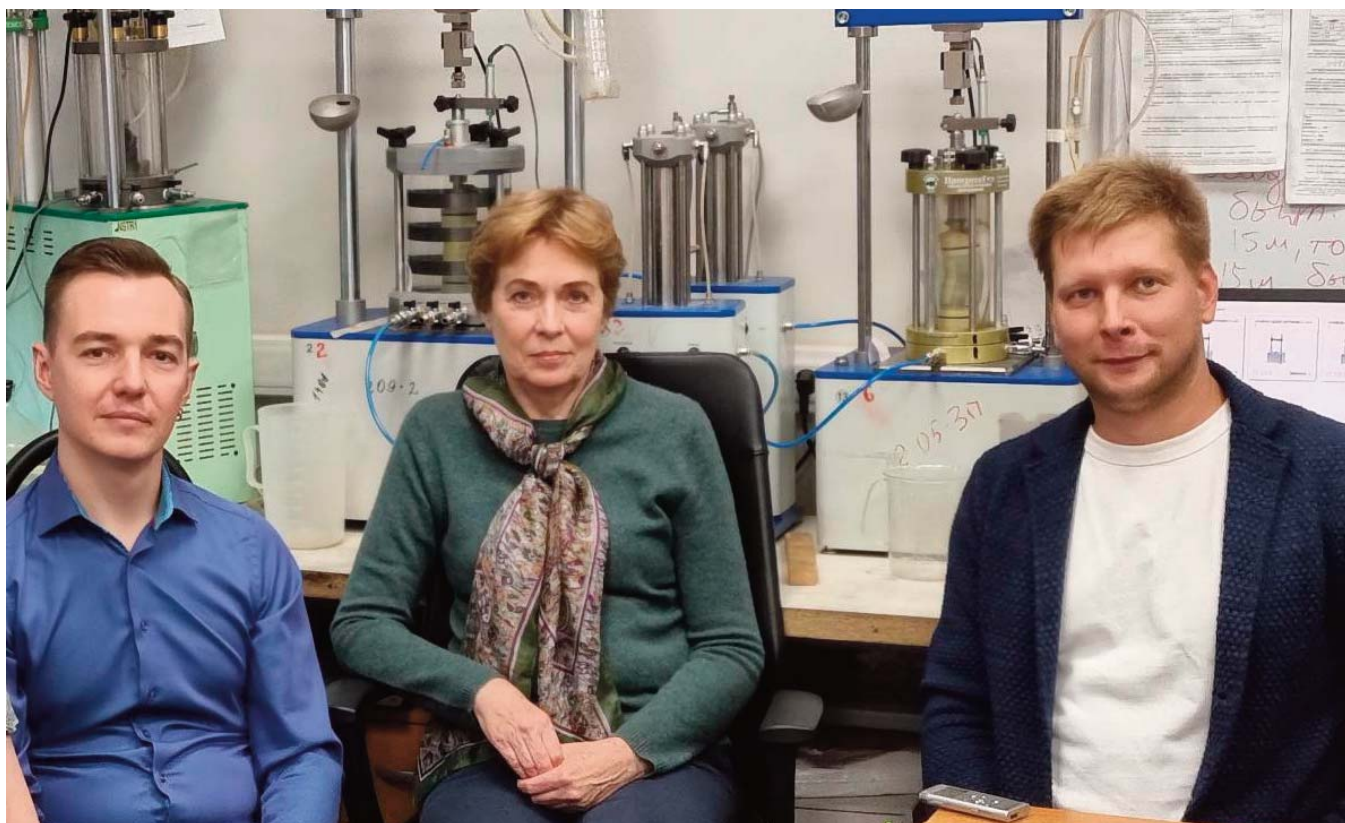
КУКАРЕКО ИВАН СЕРГЕЕВИЧ

Руководитель отдела по работе с ключевыми клиентами ООО «Компания «КРЕДО-ДИАЛОГ»

Information about the author

IVAN S. KUKAREKO

Head of the department for working with key clients, ООО «Kompaniya «KREDO-DIALOG» [CREDO-DIALOG Company LLC]



НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ENG GEO: ИНТЕРВЬЮ С РАЗРАБОТЧИКАМИ И ПОЛЬЗОВАТЕЛЯМИ

АНАНКО В.Н.

Независимый электронный журнал
«Геоинфо», г. Москва, Россия,
info@geoinfo.ru
Адрес: Россия, 119146, Москва,
ул. 3-я Фрунзенская, д. 10, оф. 12

АННОТАЦИЯ

Программный комплекс EngGeo на сегодняшний день является одним из наиболее популярных среди инженеров-геологов. Его возможности значительно облегчают обработку полевых и лабораторных данных. Главный редактор журнала «ГеоИнфо» Виктор Ананко встретился с разработчиком EngGeo Татьяной Мелиховой и доцентом геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Анатолием Мирным, который принимал участие в создании геотехнического модуля этого программного комплекса. Беседа проходила в грунтовой лаборатории «Горизонт», недавно также ставшей пользователем EngGeo. Эту организацию представляла заместитель ее генерального директора Лидия Аверина. Речь шла не только об EngGeo, но и о сегодняшней ситуации в строительной отрасли, нормативных документах, новых разработках НПП «Геотек» и о многом другом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

инженерная геология; строительная отрасль; программное обеспечение; импортозамещение; программный комплекс EngGeo; геотехнический модуль; модели грунта; НПП «Геотек».

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Ананко В.Н. Новые возможности программного комплекса EngGeo: интервью с разработчиками и пользователями // ГеоИнфо. 2022. № 12. С. 104–107

NEW CAPABILITIES OF THE ENGGeo SOFTWARE PACKAGE: INTERVIEWS WITH THE DEVELOPERS AND USERS

VIKTOR N. ANANKO

Independent electronic journal "GeoInfo",
Moscow, Russia, info@geoinfo.ru
Address: 10 Tret'ya (3rd) Frunzenskaya
st., off. 12, Moscow, 119146, Russia

ABSTRACT

EngGeo is currently one of the most popular software packages among geological engineers. Its capabilities greatly facilitate the processing of field and laboratory data. Viktor Ananko (the editor-in-chief of the independent electronic journal "GeoInfo") interviewed Tatiana Melihova (the developer of EngGeo) and Anatoly Mirny (an associate professor of the geological faculty of Lomonosov Moscow State University, who took part in the creation of the geotechnical module of this software package). The conversation took place in the soil laboratory "Horizont", which also has recently become a user of EngGeo. This organization was represented by its deputy general director Lidia Averina. The talk was not only about EngGeo, but also about the current situation in the construction industry, about normative documents, about new developments of NPP "Geotek" (RPE "Geotek") and about much more.

KEYWORDS:

engineering geology; construction industry; software; import substitution; EngGeo software package; geotechnical module; soil models; RPE "Geotech".

FOR CITATION:

Ananko V.N. Novye vozmozhnosti programmnoy kompleksa EngGeo. Interv'y u razrabotchikov i pol'zovatelyami [New capabilities of the EngGeo software package: interviews with the developers and users]. GeoInfo. 2022. 12: 104–107

Ред.: В условиях действующих санкций в отношении нашей страны ответственность и объем задач российских разработчиков программного обеспечения значительно выросли. Ведь им стало необходимо выступить на первой линии импортозамещения и не дать строительному комплексу откатиться на годы назад, лишившись функционала западных программ. Татьяна Юрьевна, скажите, пожалуйста, что меняется в программном комплексе EngGeo в это сложное время?

Т.М.: Конечно, круг задач, требующих срочного решения, с весны 2022 года значительно расширился и усложнился. Самое главное, многим нашим заказчикам, в частности ряду оборонных предприятий, потребовалась российская база данных для хранения информации. Если ранее мы предоставляли возможность работать с базой данных MSSQL для крупных организаций и с базой данных Access для компаний с 2–3 пользователями, то в связи с последними событиями мы реализовали возможность хранения информации в базе данных рос-

сийского производителя Postgres SQL. Одновременно, кстати, мы получили возможность подать заявку на занесение нашего программного продукта в реестр отечественного ПО.

Ред.: Вы уже почувствовали на себе какие-то сложности, связанные с санкциями и проблемами у строителей?

Т.М.: Пока никаких сложностей мы не ощутили. Производственная и коммерческая активность наших пользователей не снижается, появляются новые клиенты. Однако следует отметить, что кризис, который испытывала строительная отрасль в 2014 году, мы ощутили лишь спустя 12–18 месяцев. Поэтому, возможно, 2023 год будет для нас непростым. Но загадывать не будем. Если на строительство будут по-прежнему выделяться огромные бюджетные деньги, как это происходит в настоящее время, а строители будут, как и раньше, делиться средствами с проектировщиками и изыскателями, то и у нас все будет нормально.

Ред.: Анатолий, недавно в программном комплексе EngGeo появился геотехнический модуль, в разработке которого вы принимали непосредственное участие. Расскажите, пожалуйста, о его функционале.

А.М.: Это довольно наболевший вопрос. Дело в том, что определение параметров нелинейных моделей, которые используются при численном моделировании в любом геотехническом программном комплексе, не имеет никакого нормативного обеспечения в нашей стране. И их получение становится чем-то вроде ноу-хау каждой отдельной организации. Поэтому, разрабатывая геотехнический модуль, мы хотели дать сотрудникам лаборатории что-то вроде калькулятора. Чтобы в той же базе, в которой они привыкли работать и получать стандартные результаты, можно было обработать параметры испытаний для получения параметров моделей грунта Hardening Soil или Soft Soil. Это значительно упростило работу лабораторий, постоянно сталкивающихся в технических заданиях с необходимостью определения их значений.

Конечно, надо понимать, что это не панацея и что модуль не может выдать всю таблицу параметров, потому что некоторые из них обрабатываются уже на камеральной стадии для конкретного инженерно-геологического элемента в целом и не могут быть получены для отдельного частного протокола. Поэтому упрощение касается только получения частных значений отдельных параметров нелинейных моделей. Учитывая что эти две модели очень распространены и реализованы во многих программных комплексах, хочется верить, что этот модуль пригодится всем, несмотря, например, на уход с российского рынка PLAXIS и некоторых других программных комплексов. По крайней мере в MIDAS GTS NX эти модели тоже есть.

Ред.: *То есть реализована прямая связь между EngGeo и программным обеспечением для геотехнических расчетов, например от компании МИДАС?*

А.М.: Данные портируются не напрямую. Ручная работа здесь все же необходима. Однако на деле пользователь MIDAS GTS NX должен просто внести в программный комплекс параметры моделей, большую часть которых можно получить в EngGeo.

Ред.: *Лидия, скажите, пожалуйста, какие у вас впечатления от программного комплекса EngGeo? Я знаю, что вы недавно приобрели его.*

Л.А.: Действительно, мы недавно приобрели EngGeo с геотехническим модулем. Надо сказать, что первое время у нас были некоторые сложности с использованием этого программного комплекса. Мы не смогли сразу разобраться с функционалом. Обратились к разработчику. Татьяна Юрьевна нам очень помогла, и я уверена, что EngGeo скоро станет серьезным подспорьем в нашей работе. У нас в нем должны обрабатываться данные, получаемые с помощью приборов от НПП «Геотек» и ООО «ПрогрессГео».

Ред.: *Как это все работает?*

А.М.: Логика работы следующая. Любой современный лабораторный прибор представляет собой совокупность большого количества нагрузочных устройств и электронных датчиков. Соответственно, в ходе испытания все, что фиксируется каждым из этих датчиков, записывается в подключенном компьютере в виде большого лог-файла с частотой записи примерно 1 раз в 3–5

секунд. Работать с таким массивом данных не то что неудобно – невозможно. А EngGeo представляет собой модуль интерпретации данных, который позволяет из большой таблицы сделать удобную. То есть на выходе пользователь получает: табличку с отдельными частными значениями; кривую, построенную по полученным данным; результат обработки по ГОСТ с учетом погрешности и т. д. А модуль HS – часть этого комплекса интерпретации данных. То есть лаборант может провести испытание и с помощью EngGeo обработать его по ГОСТ 12248, а также определить те параметры, которые в этом стандарте не упомянуты.

Т.М.: EngGeo читает данные и немного их «пропалывает», убирая все лишнее. Программа берет данные с определенным шагом, но если при чтении информации фиксируется какая-то аномалия, например резкий перепад давления или деформации, то этот отрезок испытания читается более подробно, чтобы пользователь мог увидеть нестандартное поведение грунта и понять вызвавшие его причины. То есть фиксируются и общая закономерность, и все особенности хода кривой. И в конечном счете пользователь получает данные, с которыми удобно работать.

Ред.: *Позволяет ли EngGeo обрабатывать результаты испытаний в компрессионных приборах, установленных в морозильных камерах?*

Т.М.: Да, этот функционал, конечно, есть. Эта программа позволяет определять модуль деформации мерзлого грунта и коэффициент деформации при оттаивании.

Ред.: *Не могу не спросить, что происходит сейчас с нормативной базой в области лабораторных испытаний грунтов и как Вы оцениваете происходящие изменения?*

Т.М.: Это, конечно, большая тема. Изменения в нормативной документации происходят постоянно. У нас, наверное, около 40% времени уходит именно на их учет. Последнее изменение – расчет для испытаний крыльчаткой – потребовало от нас очередных дополнений, которые появятся в ближайшем релизе EngGeo. Много времени ушло на учет требований ГОСТ 12248 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости», который в обновленной версии был разделен на несколько отдельных ГОСТов и потребовал внесе-

ния серьезных изменений в работу программного комплекса EngGeo.

Сейчас наша новая головная боль – это новый ГОСТ по графическим обозначениям в инженерной геологии. Это, правда, относится не к лабораторным испытаниям, а касается построения разрезов. Но я пока даже не знаю, как мы с этим справимся. Дело в том, что там условные обозначения приняты в цвете, причем с огромной палитрой. И, на мой взгляд, если разрез представить в таком виде, это будет больше напоминать хвост павлина, а не рабочее изображение.

А.М.: Хочу добавить, что главная проблема наших нормативных документов заключается в их неконкретности. Причем это касается многих важных вещей. Например (условно), может быть написано, что надо делать так, но по особому заданию можно сделать иначе, а если есть дополнительное указание в программе работ, то возможен третий вариант исполнения, а в случае требований от организации, осуществляющей научно-техническое сопровождение, возможен и четвертый вариант. И это очень сбивает с толку, потому что, с моей точки зрения, любые нормативные документы пишутся для проектирования сооружений нормального уровня ответственности, то есть тех, которые не требуют привлечения специальных организаций, наукоемких исследований и пр. Для этих случаев все должно быть предельно однозначно и понятно для исполнителей. В свое время советские нормативы создавались именно по такому принципу. А каждый уникальный случай уже требовал привлечения специализированных организаций, работы научно-исследовательских институтов, разработки специальных технических условий и т. д. У нас же сейчас получается, что в нормативных документах пытаются прописать все сразу, включая уникальные сооружения, с которыми обычная производственная лаборатория никогда в жизни не столкнется. Конечно, это ужасно неудобно.

Я знаю, что в этом плане многие хвалят СП по гидротехническому строительству 2018 года. Но у меня и к нему есть определенные претензии. В частности, в нем (а это документ для проектировщиков!) прописаны режимы проведения испытаний – методы определения параметров переуплотнения, проведения трехосных испытаний и т. д. По этому же пути со своими нормативными документами пошли Росатом, РЖД. И в результате у нас суще-

ствует несколько параллельных систем нормативных документов, не желающих объединяться. Я не понимаю, почему нельзя было вместо этого подключиться к разработке ГОСТ 12248 и обозначить в нем требования, которые устроят и гидротехников, и представителей других отраслей.

Ред.: НПП «Геотек» сейчас начинает выпускать линейки специализированного оборудования. Это АСИС Про и АСИС Спец. Скажите, пожалуйста, EngGeo работает с данными, получаемыми с помощью этих приборов?

Т.М.: По данным от АСИС Про мы взаимодействуем в рамках испытаний по ГОСТ, а в рамках других стандартов – пока нет. Но мы планируем разработку поддержки для испытаний, выполняемых на приборах этих двух линеек по разным стандартам. Это новые серии оборудования, которое, насколько мне известно, пока выпускается штучно и еще мало представлено в лабораториях. Эти новые приборы, в частности, позволяют давать нагрузки до 20 МПа, рассчитывать коэффициент переуплотнения и другие параметры для грунтов с большой глубины.

Ред.: Анатолий, а каким лабораториям и для каких целей бывают нужны такие сложные и дорогостоящие приборы? В чем их отличие от предыдущих поколений?

А.М.: Компания «Геотек» все время стремится стать лучше. Увеличить точ-

ность измерений, расширить диапазон измеряемых величин. Но в то же время основная линейка приборов АСИС Стандарт предназначена для обычных производственных лабораторий, специализирующихся на стандартных испытаниях по ГОСТ. А вот приборы линеек АСИС Про и АСИС Спец являются редкими, если не уникальными. Запросы на испытания, которые можно выполнить только с их помощью, приходят в лаборатории достаточно редко. Например, это могут быть испытания крупнообломочных или скальных грунтов, сильно превышающие по точности требования нормативных документов, или испытания мерзлых грунтов в нестандартных режимах.

Кроме того, ряд приборов создается под утвержденные новые стандарты. В частности, под новые ГОСТы разрабатывается прибор трехосного сжатия для испытаний мерзлых грунтов, «в серию» пойдет прибор простого сдвига, под который в следующем году должен выйти соответствующий стандарт. Иными словами, эти серии приборов предназначены для расширения функциональных возможностей лабораторий.

Например, давайте сравним прибор простого сдвига и привычный для нас прибор для испытаний на одноплоскостной срез. В последнем нельзя испытывать текучепластичные грунты, потому что они выдавливаются в зазор. Трехосные приборы не подходят для этих испытаний, потому что невозмож-

но собрать образец соответствующей консистенции. Здесь подходит только прибор простого сдвига. А на объектах, даже самых обычных, такой грунт можно легко встретить.

Ред.: Татьяна Юрьевна, я знаю, что все еще многие пользователи устанавливают у себя «пиратские» версии EngGeo. С какими проблемами они сталкиваются?

Т.М.: Если поговорить с любым руководителем полевой или камеральной группы, где всерьез пользуются EngGeo, он скажет, что без регулярного контакта с разработчиками работать весьма сложно. Постоянно случаются нестандартные ситуации, появляются новые приборы. Кроме того, пиратская версия может быть безнадежно устаревшей. Ведь, как я уже говорила, регулярно выходят обновления в связи с постоянными изменениями в нормативной базе. Более того, в интернет часто попадают триал-версии (пробные версии), в которых изначально много ошибок, потому что они создавались не для работы, а для тестирования.

Поэтому я обращаюсь ко всем пользователям, которые все еще пользуются пиратскими версиями: переходите на использование лицензионного программного продукта. Это быстро себя окупит, а работать станет гораздо проще и удобнее. И главное – вы будете застрахованы от ошибок в отчетах. 

Беседовал Ананко В.Н.

Информация об авторе

АНАНКО ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ

Главный редактор независимого электронного журнала «Геоинфо»

Information about the author

VICTOR N. ANANKO

The editor-in-chief of the independent electronic journal "Geoinfo"

Telegram-канал журнала

Независимый электронный журнал
Геоинфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

Список научных трудов и изобретений за 1961- 2022 гг. Гольдфельда Игоря Зусевича

№№ п.п.	Наименование труда (статьи, отчета, изобретения)	Печ., рук.	Назван. журнала, издательства	№ жур./ год изд./печ. л.	Соавтор
1	2	3	4	5	6
1	Сборная железобетонная арка – индустриальная конструкция для покрытий зданий	Печ.	Ж. «Строительные материалы и конструкции» / Будівельник, К	№3-1961, л.0,45	—
2	Бетонирование тонкостенных несущих конструкций балок в горизонтальном положении	—«—	Ж. «Промышленное строительство и инженерные сооружения" / «Будівельник», К.	№4-1962 л. 0,25	—
3	Формование балок упрощено	—«—	Ж. «Строитель». – Стройиздат, М.	№2-1963 л. 0,1	—
4	Расчет заделки конструкции в опоре	—«—	Сб. «Строительство магистр. трубопроводов и газонефтепромысловых сооружений» / ЦНТИ Мингазпрома (экспресс инф.), М	№6-1967, л. 0,3	—
5	Определение плотности лессового грунта динамическим микронзондированием	Ротапринт	Сб. «Основания, фундаменты и подземные сооружения» / Тр. НИИОСП, М.	1968, л. 0,15	—
6	Новый тип короткой свай - опоры	Печ.	ж. «Сельское строительство» / «Советская Украина», К.	№2-1969, л. 0,2	Беспалый И.Д., Григорян А.А.
7	Разработка и исследование новых типов фундаментов в виде коротких свай-опор в просадочных грунтах	Рук.	Научно-технический отчет. - НИИОСП, М.	1969	Григорян А.А.
8	Новый вид фундамента – свая-опора в выштампованном ложе	Ротапринт	Сб. «Архитектура и строительные конструкции промзданий».- Урал.кн.изд.,Свердловск	1969, л. 0,5	—«—
9	Технико-экономическое сравнение вариантов фундаментов в просадочных грунтах	Рук.	Научно-технический отчет. – НИИОСП-Минсельстрой УССР, М. - Нов. Каховка	1969	Божкова Ю.И.
10	Проект производства работ эксперим. строительства здания на фундаментах из свай-опор в выштампованном ложе	—«—	Поисковая тема-отчет. – НИИОСП-Минсельстрой УССР, М. – Нов. Каховка	—«—	—«—
11	Фундаменты в виде опор-выштамповок на просадочных грунтах	Ротапринт	Сб. «Свайные фундаменты в сельском строительстве» / Мин-сельстрой УССР, К.	1969, л. 0,1	—
12	Технико-экономическое сравнение вариантов фундаментов в просадочных грунтах	Печ.	Ж. «Сельское строительство». – «Советская Украина», К.	№10-1971, л. 0,7	Григорян А.А., Беспалый И.Д., Божкова Ю.И., Синько Б.А.
13	Специфика технико-экономической оценки фундаментов (учет различий в осадках)	—«—	Ж. «Промышленное строительство и инженерные сооружения». – «Будівельник», К.	№6-1970, л. 0,5	Дидковский В.М.
14	Учет осадки при технико-экономической оценке фундаментов	—«—	Сб. «Основания, фундаменты и подземные сооружения».- НИИОСП, М.	1970 л. 0,45	Дидковский В.М., Илькевич Л.Я.
15	Альбом испытаний свай статической нагрузкой и статического зондирования	Рук.	Научно-технический отчет. – «Фундаментпроект», арх. №10536-1, М.	1970	—
16	Рекомендации по обработке результатов испытаний свай и корректировке некоторых пунктов СНиП	—"–	Научно-технический отчет. – «Фундамент-проект», арх. №10536-2, М.	1970	—
17	Обработка результатов статических испытаний фундаментов	—"–	Сб. «Архитектура и строительные конструкции». "УралПром-стройНИИПроект», Урал. кн. изд-во, Свердловск	1971, л. 0,2	Миндич А.Л.
18	Систематизация и статистическая обработка «Альбома материалов статических и динамических испытаний свай»	Рук.	Научно-технический отчет. – «Фундамент-проект», арх. №10972, М.	1971	—
19	Оценка устройства ложа свай-опор с помощью отказа	Печ.	Сб. «Свайные фундаменты». – «Будівельник», К.	1971, л. 0,3	—
20	Расчет несущей способности свай – опор в выштампованном ложе в просадочном грунте	—«—	Сб. «Основания, фунда-менты и механика грунтов (Тр. III Всесоюзного совещания)». – «Будівельник», К.	1971, л. 0,3	Григорян А.А.

Список научных трудов и изобретений за 1961- 2022 гг. Гольдфельда Игоря Зусьевича

№№ п.п.	Наименование труда (статьи, отчета, изобретения)	Печ., рук.	Назван. журнала, издательства	№ жур./ год изд./печ. л.	Соавтор
1	2	3	4	5	6
21	Статистическая обработка параллельных испытаний грунтов сваями и статическим зондированием	Рук.	Научнотехнический отчет, «Фундамент-проект», арх. №10971, М.	1971	—
22	Исследование работы свай-опор в выштампованном ложе в грунтовых условиях I-го типа по просадочности	Печ.	Автореферат диссертации на степень к.т.н. – СНИИ ПНИИС	1971	—
23	О терминологии некоторых понятий Норм по проектированию свайных фунтов	Печ.	Сб. «Инженерно-строительные изыскания». – «Стройизыскания», М.	1/26-1972, л. 0,4	—
24	Способ построения графика $S=f(P)$ во всем диапазоне нагрузок, вплоть до критической	—	—	№2/27-1972, л. 0,4	—
25	К уточнению проектной нагрузки на сваю в свете метода расчета по предельным состояниям	—	Ж. «Транспортное строительство». – «Транспорт», М.	№9-1972, л. 0,3	—
26	Взаимосвязь некоторых строительных характеристик просадочного грунта с его физическими константами	—	Сб. «Проектирование оснований и фундамен-тов».- «Будівельник», о-во «Знання», К.	1972, л. 0,2	—
27	Определение фаз сопротивления основания на графике «осадка-нагрузка»	—	Сб. «Инженерные изыскания в строительстве» (Тр. ПНИИС).– «Стройиздат», М.	№6/24-1973, л.0,2	—
28	Интерпретация графика «осадка-нагрузка по фазам сопротивления грунта основания	—	Ж. «Транспортное строительство». – «Транспорт», М.	№7-1973, л. 0,4	—
29	Определение нормативных и расчетных нагрузок на свайный фундамент по данным полевых испытаний свай	—	Ж. «Энергетическое строительство».- «Энергия», М.	№9-1973, л.0,7	Фаянс Б.Л.
30	Указания по зондированию грунтов для строительства (СН 448-72)	—	Нормативный документ. «Стройиздат»	1973	Коллектива авторов
31	Составление производственно-технологических требований к оборудованию зондирующей установки с усилием вдавливания до 20 тс	Рук.	Научный отчет ПНИИС, арх.№1282, М.	1973	Хазанов М.И.
32	Назначение нагрузок на сваи по результатам их испытаний	Печ.	Ж. «Строительство трубопроводов». – «Недра», М.	№5-1974, л. 0,2	Фаянс Б.Л.
33	Оценка результатов испытаний свай на основе развития осадок во времени	—	Сб. «Инженерно-геологические изыскания для проектирования свайных фундаментов». «УкрВостокГИИНТИЗ (ДСП)», Харьков	1973, л. 0,35	—
34	Разработать техническое задание на проектирование зондирующей установки с усилием вдавливания до 20 тс с тензометрической системой записи	Рук.	Научный отчет ПНИИС, арх. №1351, М.	1974	Хазанов М.И.
35	Использование результатов опытов со штампом для прогноза осадок натуральных фундаментов	Печ.	сб. «Основания и фундаменты», КИСИ, «Будівельник», К.	1975-л.0,3	—
36	Прогноз длительных осадок свай по данным стандартных испытаний	—	сб. «Свайные фундаменты», тр. ПНИИС, вып. 65, Стройиздат, М.	1975, л. 0,4	Фаянс Б.Л.
37	К методологии назначения проектных нагрузок на фундаменты	—	сб. «Методика инженерных изысканий для стр-ва», тр. ПНИИС, Стройиздат, М.	1975 л. 0,5	Абрамов С.П.
38	Сравнение опытных и расчетных данных о работе песчаного основания под круглым жестким штампом	—	сб. «Инженерно-строительные изыскания», ЦТИСИЗ, Стройиздат, М.	№3(39)-1975, л. 0,7	—
39	Статистический анализ работы грунта под штампом по графикам зависимости осадки от нагрузки	—	, сб. «Математич. методы в инженерной геологии», тр. ПНИИС, Стройиздат, М.	вып.39 -1975, л. 0,75	—
40	Упорная система УС для испытаний грунтов штампами и сваями	Рук.	Научно-технический отчет, ПНИИС, план внедрения, арх. №1553, М.	1975	—

Список научных трудов и изобретений за 1961- 2022 гг. Гольдфельда Игоря Зусевича

№№ п.п.	Наименование труда (статьи, отчета, изобретения)	Печ., рук.	Назван. журнала, издательства	№ жур./ год изд./печ. л.	Соавтор
1	2	3	4	5	6
41	Изобретение «Анкер», авт. свид. №492623	Печ.	Бюллетень изобретений	№43-1975	Шелихов В.В., Хазанов М.И., Абрамов С.П.
42	Глава СНиП П-17-77 «Свайные фундаменты и глубокие опоры» (пересмотр главы СНиП П-Б. 5-67)	--«--	Научный отчет, ПНИИИС, арх. №1386, М.	1975	Абрамов С.П.
43	Изобретение «Зонд с сердечником»	--«--	Бюллетень изобретений	№42-1975	Коллектив авторов
44	Грунты. Метод полевого испытания статическим зондированием (ГОСТ 20069-74)	--«--	Госстандарт, М.	1975, л. 0,5	Коллектив соавторов
45	О вероятностно-статистическом подходе при определении допустимой нагрузки на сваю	---«---	сб. «Свайные фундаменты», тр. НИИОСП, Стройиздат, М.	1975, л. 0,5	Бахолдин Б.В. Фаянс Б.Л.
46	Указания по полевым методам исследования грунтов при инженерных изысканиях для строительства	--«--	Стройиздат, М.	1976, л. 3,6	Коллектив авторов
47	Рекомендации по расчету свайных фундаментов на слабых грунтах	---«---	Стройиздат, М.	1976, л. 2,4	Фаянс Б.Л.
48	Изобретение «Устройство для проходки скважин в грунте», авт. свид. №499381	---«---	Бюллетень изобретений	№2-1976	Хазанов М.И., Шелихов В.В.
49	Технические требования на проектирование зондирующие установки	Рук.	Научно-технический отчет, ПНИИИС, арх. № М.	1976	Хазанов М.И.
50	Оценка свайных фундаментов статическим зондированием установками типа С-832 и С-979	Печ.	Сб. «Полевые методы в инженерной геологии», общ. «Знание», УССР, К.	1976, л. 1,2	—
51	Изобретение «Устройство для испытания грунта статической нагрузкой», авт. свид. №525775	---«---	Бюллетень изобретений	№31-1976	Коллектив соавторов
52	Оценка несущей способности свай статическим зондированием	---«---	ж. «Транспортное строительство», Транспорт, М.	№9-1977, л. 0,4	Хайме Н.М.
53	Анализ графиков «Осадка-нагрузка» в связи с видами систем «основание-фундамент»	---«---	сб. «Методика и практика инженерных изысканий для строительства», тр. ПНИИИС, Стройиздат, М.	вып.46-1977, л. 1,0	—
54	Изобретение «Телескопическая колонна», авт. свид. №565973	---«---	Бюллетень изобретений	№27-1977	Хазанов М.И., Шелихов В.В.
55	Изобретение Способ проходки скважин», авт. свид. №576371		Бюллетень изобретений	№38-1977	Коллектив соавторов
56	Изобретение «Устройство для определения механических свойств грунта», авт. свид. №581418	---«---	Бюллетень изобретений	№43-1977	---«---
57	Изобретение «Зондирующая установка», авт. свид. №580273	---«---	Бюллетень изобретений	№42-1977-	---«---
58	Расчет осадок илистого основания	---«---	ж. «Строительство трубопроводов», «Недра», М.	№5-1977, л. 0,3	—
59	Учет изгиба зонда при обработке данных зондирования	---«---	сб. «Инженерные изыскания в строительстве», сер. XV, реф. информация, Стройиздат, М.	№5(58)-1977 л. 0,3	Шелихов В.В.
60	Влияние скорости статического зондирования на результаты исследований	---«---	---«---	Л. 0,25	Якимов Ю.Ф.

Список научных трудов и изобретений за 1961- 2022 гг. Гольдфельда Игоря Зусевича

№№ п.п.	Наименование труда (статьи, отчета, изобретения)	Печ., рук.	Назван. журнала, издательства	№ жур./ год изд./печ. л.	Соавтор
1	2	3	4	5	6
61	Изобретение «Анкер», авт. свид. №552390	--«--	Бюллетень изобретений	№12-1977	Хазанов М.И., Шелихов В.В. Абрамов С.П.
62	Оказание методической помощи тресту «Укрнефтегазмонтаж» во внедрении нового способа прокладки докеров в сложных условиях	Рук.	Научно-технический отчет ПНИИИС, арх. №1468, М.	1977	Амарян Л.С.
63	Оказание методической и научно-технической помощи «Укртипроводохозу» по проведению инженерно-геологических изысканий слабых грунтов полевыми лабораториями ПЛГ – 1рм	--«--	Научно-технический отчет ПНИИИС, арх.	1977	Амарян Л.С.
64	Интерпретация результатов испытаний грунта штампом	Печ.	Сб. «Полевые методы в инженерной геологии», общ. «Знание», К.	1977, л. 0,3	—
65	Опыт применения полевой лаборатории ПЛГ – 1рм для исследования слабых грунтов на акватории	--«--	Тезисы семинара «Особенности инженерно-геологических изысканий на слабых грун-тах», К., изд. об-ва «Знание», УССР	1977-0,1	--«--
66	ГОСТ 12374-77 «Грунты. Метод полевого испытания статическими нагрузками»	--«--	Стандартиздат, М.	1978	Коллектив соавторов
67	Полевая лаборатория для исследования грунтов ПЛГ – 1рм	--«--	Проспект для ВДНХ	1978	--«--
68	Изобретение «Способ укладки подводного трубопровода», авт. свид. №614279	--«--	Бюллетень изобретений	№22-1978	--«--
69	Определение параметров сопротивления грунта сдвигу по результатам штамповых опытов	--«--	сб. «Инженерные изыскания в строительстве», реф. информация, Стройиздат, М.	7(72)-1978, л. 0,2	—
70	Построение графика «осадка – нагрузка» забивной сваи по данным статического зондирования	--«--	сб. «Основания и фундаменты», изд. «Будівельник», К.	1978 л. 0,3	—
71	Изобретение «Грунтонос», авт. свид. №588286	--«--	Бюллетень изобретений	№2-1978	Шелихов В.В.
72	Опыт применения нового оборудования для испытаний грунтов штампами и сваями	--«--	сб. «Инженерно-строительные изыскания», ЦТИСИЗ, Стройиздат, М.	2(50)-1978, л. 0,5	Черняк Э.Р.
73	Причины различий данных зондирования грунтов установками С-979 и С-832	— —	сб. «Техника и технология инженерных изыс-каний», тр. ПНИИИС, Стройиздат, М.	1980, л. 0,8	—
74	Изобретение «Анкер для слабых грунтов», авт. свид. №740896	--«--	Бюллетень изобретений	№22-1980	—
75	Изобретение «Устройство для стабилизации нагрузки при испытании грунтов», авт. свид. №735561	— —	Бюллетень изобретений	№19-1980	Бойко И.П., Потапенко И.Ф.
76	Изобретение (запрещено к открытой публикации) авт. свид. №809735	--«--	--«--	1981	Фаерман Н.Б.
77	Исследование возможности разработки методики определения коэффициента трения грунтов о фундаментные конструкции при инженерно-геологических изысканиях	Рук.	Научно-технический отчет по поисковой теме. ПНИИИС, арх. №1584, М.	1980	Зиангиров Р.С.
78	Изобретение «Обсадная труба скважины», авт. свид. №899821	Печ.	Бюллетень изобретений	№3-1980	Хейфец В.Б., Егоров А.И.
79	Рекомендации по производству инженерно-геологических исследований для проектирования дымовых труб	— —	Общесоюзный норматив	1981	Егоров К.Б., Терновская В.В.
80	Рекомендации по инженерным изысканиям для проектирования и устройства свайных фундаментов	— —	Общесоюзный норматив	1983	Коллектив соавторов

Список научных трудов и изобретений за 1961- 2022 гг. Гольдфельда Игоря Зусевича

№№ п.п.	Наименование труда (статьи, отчета, изобретения)	Печ., рук.	Назван. журнала, издательства	№ жур./ год изд./печ. л.	Соавтор
1	2	3	4	5	6
81	Изобретение «Устройство для проходки скважин», авт. свид. №870654	—	Бюллетень изобретений	№37-1981	Долодаренко С.А. Фаерман Н.Б.
82	Изобретение "Кернорватель", авт. свид. №857432	—	Бюллетень изобретений	№31-1981	
83	Изобретение «Устройство для захвата свай», авт. свид. №889799 от 17.12.79	—	Бюллетень изобретений	№46-1981	Бахолдин Б.В., Малышев В.Н., Старосельский А.И.
84	Некоторые закономерности уплотнения слабого грунта поверхностным трамбованием	—	сб. «Исследование инж-геол. свойств грунтов», ПНИИИС, Стройиздат, М.	1986, л. 1,0	—
85	Изобретение «Устройство для извлечения труб из грунта», авт. свид. №924251	---	Бюллетень изобретений	№16-1986	Анатольевский П.А.
86	Изобретение «Способ изготовления набивной свай», авт. свид. №1118742	---	---	№38-1984	Гуща Ю.П.
87	Инвентарный анкер повышенной удерживающей способности	---	Тезисы Всер. семинара «Опыт и перспективы применения способа «стена в грунте» и анкеров в грунте для стр-ва подземных сооружений», Челябинск	1981, л. 0,2	—
88	Паспорт НТД «Способ принудительной укладки подводного трубопровода в сложных грунтовых условиях»	---	Каталог паспортов НТД, рекомендации в строительстве, М.	вып. 3-1981- л. 0,2	—
89	Методика ускоренных статических испытаний грунтов сваями с учетом грунтовых условий	Рук.	Научно-технический отчет по х/д с «Гидро-спецпроектом», арх. №1627, ПНИИИС, М.	1982, л. 4,5	—
90	Взаимосвязь между результатами лабораторных и полевых испытаний песч. грунтов на срез	Печ.	ж. «Проектирование и инженерные изыскания», Стройиздат, М.	№6-1983, л. 0,3	Черняк Э.Р.
91	Исследование свойств мерзлых крупнообломочных и элювиальных грунтов оснований и инженерная оценка районов перспективного строит. освоения г. Воркуты, ч. 1 Оборудования для испытаний грунтов сваями	Рук.	Научно-технический отчет ПНИИИС для «Печор-НИИпроекта», х/д. №1640, М.	1982	Черняк Э.Р.
92	Установка для статических испытаний грунтов штампами и сваями	Печ.	Информ-листок о научно-техн. достижениях, М.-51	№83-1983	---
93	Влияние зазора срезного прибора на результаты определения прочности грунта	---	сб. «Комплексные инженерно-геологические исследования для про-мышленного и гражданского стр-ва», ПНИИИС, «Недра», М.	1984, л. 0,5	Черняк Э.Р.
94	Изобретение «Ребристо-лопастной анкер», авт. свид. №1028781	---	Бюллетень изобретений	№26-1983	Васильев Н.Г., Чирсков В.Г.
95	Изобретение «Установка для статического испытания грунтов», авт. свид. №1030492	---	---	1983–№27	Матяшевич И.А.
96	Изобретение «Устройство для погружения свай», авт. свид. №1041635	---	---	1983	Фаерман Н.Б.
97	К вопросу о методике определения прочностных свойств крупнообломочных грунтов МНР	---	сб. докл. на УШ научно-технич. конф. по инж. изысканиям и проектированию в сложн. природ. условиях МНР, Госстрой МНР, Улан-Батор	1982, л. 0,5	Беккерман С.И., Черняк Э.Р.
98	Установка для статических испытаний грунтов штампами или сваями (УС)	Печ.	Паспорт НТД, изд. ВНИИИС Госстроя СССР, М.	1984, л. 0,1	---
99	Изобретение «Устройство для проходки скважин», авт. свид. №1058338	---	Бюллетень изобретений (не подлежит открытой публикации)	1984	Анатольевский П.А., Медведев О.П.
100	Изобретение «Устройство для определения параметр. сдвига грунта в массиве», авт. свид. №1060756А	Печ.	Бюллетень изобретений	№46-1984	Кальбергенов Р.Г., Черняк Э.Р.

Список научных трудов и изобретений за 1961- 2022 гг. Гольдфельда Игоря Зусевича

№№ п.п.	Наименование труда (статьи, отчета, изобретения)	Печ., рук.	Назван. журнала, издательства	№ жур./ год изд./печ. л.	Соавтор
1	2	3	4	5	6
101	Гидростабилизатор давления (ГСД-1)	--«--	Информ - листок МГЦНТИ №953679, М.	1984, л. 0,2	Гольдфельд И.З.
102	Исследование свойств мерзлых крупнообломочных и элювиальных грунтов оснований и инженерная оценка районов	Рук.	Научно-технический отчет ПНИИИС для «ПечорНИИпроекта», х/д, арх. №1640, М.	1982	Черняк Э.Р.
103	Изобретение «Гидростабилизатор давления», авт. свид. №1092470А	Печ.	Бюллетень изобретений	№18-1984	Лунин М.Г., Стригин Г.Н.
104	О некоторых инженерно-геологических свойствах крупнообломочных грунтов МНР	--«--	ж. "Проектирование и инженерные изыскания», Стройиздат, М.	№4-1984, л. 0,3	Черняк Э.Р.
105	Гидростабилизатор давления (ГСД-1)	--«--	Пристендовый листок ВДНХ СССР	1984, л. 0,3	Лунин М.Г., Стригин Г.Н.
106	Исследование свойств мерзлых крупнообломочных и элювиальных грунтов оснований и инженерно-геологическая оценка районов перспективного строительного освоения. Воркуты. Ч.2 «Разработать ускоренную методику испытаний грунтов сваями и моделями свай»	Рук.	Фонды ПНИИИС, арх. №1764, М.	1984 стр. 220	Топеха С.В.
107	Изобретение «Винтовой анкер», авт. свид. №1150303	Печ.	Бюллетень изобретений	№14-1985	Черняк Э.Р., Кальбергенов Р.Г.
108	Зондировочная оценка забивных свай во всем диапазоне нагружения	--«--	сб. «Инженерно-геологические исследования для строительства», ПНИИИС, «Наука», М.	1985, л. 1,0	Пырченко В.А.
109	Оценка работы забивной сваи по данным статического зондирования	--«--	ж. «Проектирование и инженерные изыскания», Стройиздат, М.	№5-1985, л. 0,6	Пырченко В.А.
110	Изобретение «Устройство для погружения в грунт пластины», авт. свид. №1161655А	--«--	Бюллетень изобретений	№22-1985	—
111	Программа «Прогноз несущей способности свай по данным статического зондирования (для ЭВМ – 1022 на языке Фортран в системе ОС ЕС)	--«--	ВНТИцентр, ПОО4968 МОФАН, ЦНИИпроект 1-Н-196, М.	1983	Пырченко В.А., Паниюкова И.М.
112	Изобретение «Устройство для измерения деформаций», авт. свид. №1179219	--«--	Бюллетень изобретений	№34-1985	Берман Б.И.
113	Изобретение «Устройство для испытания грунта наклонной нагрузкой», авт. свид. №1178840	--«--	Бюллетень изобретений	№34-1985	—
114	О характеристиках уплотненной зоны грунта при трамбовании	--«--	сб. «Инженерно-геологические характеристики грунтов и процессы в них», ПНИИИС, «Наука», М.	1985, л. 0,5	--«--
115	Изобретение «Способ определения содержания крупных обломков в грунте и устройство для его осуществления», авт. свид. №1191826	--«--	Бюллетень изобретений	№42-1985	Черняк Э.Р., Чуланов В.В., Кальбергенов Р.Г.
116	Изобретение «Прибор для определения параметров трения и сдвига», авт. свид. №1196449	--«--	Бюллетень изобретений	№45-1985	Черняк Э.Р., Кальбергенов Р.Г.
117	Изобретение «Способ испытания грунтов на срез», авт. свид. №1209816	--«--	Бюллетень изобретений	№5-1986	—
118	Изобретение «Устройство для определения деформационных свойств грунта», авт. свид. №1196768	--«--	--«--	№45-1985	—
119	Провести научные исследования и разработать техническое задание на создание прибора наклонного зондирования	Рук.	Задание для СКБ ПНИИИС в г. Рязани	1986	Зиангиров Р.С.
120	Некоторые закономерности уплотнения слабого грунта поверхностным трамбованием	Печ.	Сб. «Исследование ннж.-геол. свойств грунтов», ПНИИИС, Стройиздат, М.	1986, л. 0,5	—

Список научных трудов и изобретений за 1961- 2022 гг. Гольдфельда Игоря Зусевича

№№ п.п.	Наименование труда (статьи, отчета, изобретения)	Печ., рук.	Назван. журнала, издательства	№ жур./ год изд./печ. л.	Соавтор
1	2	3	4	5	6
121	Приставка для определения переметров трения и сдвига (ПТС)	---«--	Информ-листок НТД №87-53, изд. МГЦНТИ	1987, л. 0,3	Черняк Э.Р.
122	Изобретение «Грунтовый анкер», авт. свид. №1318657	---«--	Бюллетень изобретений	№23-1987	Лунин М.Г., Стригин Г.Н.
123	Изобретение (секретное) – Способ и устройство, авт. свид. №256133	---«--	---«--	01.06.-1987	—
124	Приставка для определения параметров трения и сдвига	---«--	Паспорт НТД ГАСНТИ	1987, л. 0,2	Черняк Э.Р.
125	Исследование прочности грунта наклонной нагрузкой	---«--	сб. «Инж.-геол. исследования для промышлен. и гражданского строительства», ПНИИИС, "Наука", М	1987, л. 0,2	Черняк Э.Р., Кальбергенов Р.Г.
126	Изобретение «Анкерная система трубопровода» №1388654	---«--	Бюллетень изобретений	№14-1988	Батыров К.А.
127	Изобретение «Прибор для определения сжимаемости пористого материала», №1381243	---«--	Бюллетень изобретений	№10-1988	—
128	Изобретение «Крепь вертикальной выработки», №1403708	---«--	---«--	1988	Кушнир Л.Г., Межов А.Ф., Запорожский В.
129	Изобретение «Устройство для испытания образцов грунта», №1474513	---«--	Бюллетень изобретений	№15-1989	—
130	Ускоренные испытания грунтов штампами и сваями	Рот.	Сб. трудов ПНИИИС (г. Улан-Батор, МНР)	1989, л. 0,1	---«--
131	Изобретение «Способ определения геометрич. параметров частиц неправ. формы», авт. свид. №1548657	Печ.	Бюллетень изобретений	№9-1990	---«--
132	Изобретение «Установка для испытаний грунта статической нагрузкой», авт. свид. №1544888	---«--	Бюллетень изобретений	№7-1990	---«--
133	Изобретение «Устройство для отбора кернов колонны», авт. свид. №1535089	---«--	Бюллетень изобретений	(ДСП)	Кушнир Л.Г., Гутриц А.С.
134	Изобретение «Стабилизатор давления», авт. свид. №1578701	---«--	Бюллетень изобретений	№26-1990	Кузнецов Г.А., Межов А.Ф.
135	Изобретение, авт. свид. №318692	---«--	---«--	№-1990	Сенатский Ю.К., Шахаратов Н.В.
136	НТО «Методика прогноза возможной глубины погружения и несущей способности забивной натурной сваи (в том числе, при пучении грунтов) по ускоренным испытаниям эталон сваи» (П этап: Выдача эскизов опытного оборудования. Информац. отчет.)	В рук.	КузбассТИСИЗ (Кемерово)	1990, л. 3,0	—
137	НТО по теме: «Разработка методики расчета несущей способности геотканевого анкера (ГТА) по грунту» (II этап-промежут.)	Машин.	ССО «Интернефтегазстрой»-Москва, ВНИИОСП, №26	1990, л. 3,0	---«--
138	То же, IV-VI этапы «Разработка и внедрение методики расчета, конструкции и технологии прокладки трубопровода в обводненных грунтах с закреплением геотканевыми анкерами (ГТА)»	---«--	ВНИИОСП, лаборатория. №16	1991, л. 3,5	---«--
139	Временная инструкция по ускоренным испытаниям ГТА в грунте (для опытной партии)	---«--	---«--	---«-- л. 0,6	---«--
140	То же, для анкеров промышленной серии	---«--	---«--	---«-- л. 1,1	---«--

Список научных трудов и изобретений за 1961- 2022 гг. Гольдфельда Игоря Зусьевича

№№ п.п.	Наименование труда (статьи, отчета, изобретения)	Печ., рук.	Назван. журнала, издательства	№ жур./ год изд./печ. л.	Соавтор
1	2	3	4	5	6
141	Изобретение «Устройство для испытания грунта в массиве, авт. свид. №1636515	Печ.	Бюллетень изобретений	№11-1991	Зиангиров Р.С. Гончаров В.С. Хомин Я.П., Оперштейн В.Л.
142	Изобретение «Способ подземной прокладки магистрал. трубопровода в слабом грунте», авт. свид. №1652726	--«--	Бюллетень изобретений	№20-1991	Батыров К.А., Зиангиров Р.С.
143	Изобретение «Способ консолидации массива слабого грунта и устройство для его осуществления», авт. свидет. №1659589	--«--	Бюллетень изобретений	№24-1991	Слинко О.В.
144	Изобретение «Способ определения параметров полости в грунте», патент РФ №1763567	--«--	Бюллетень изобретений	№35-1992	Хоменко В.П.
145	Провести исследования и разработать методы устройства и расчета композитных элементов фундаментов (КЭФ) и армированных массивов, в том числе - для стесненных условий и реконструкции объектов с выдачей рекомендаций по применен.	Рук.	Госстрой РФ. Научно-технич. отчет 16-8-377/92	1992	Коллектив авторов
146	Провести исследования и определить эффективность новых материалов на основе сапропеля для устройства поверхностных барьеров и подземных противодиффузионных конструкций с целью обеспечения экологической безопасности территорий от воздействия вредных, в том числе радиоактивных загрязнений	--«--	Научно-технич. отчет, НИИОСП, М.	--«--	--«--
147	Исследование быстровозводимых конструкций в целях экологической защиты массивов и в чрезвычайных ситуациях	Печ.	Научно-технич. отчет, НИИОСП	--«--	--«--
148	Изобретение «Способ для укрепления откоса», патент СССР №1721181	Печ.		№11-1992	Кагановская С.Е., Малышев Г.В.
149	Методика прогноза глубины погружения и несущей способности забивной ж.б. сваи по ускоренным испытаниям моделей	Рук.	НТО НИИОСП, М-Кемерово	1992, л. 3,1	Коллектив соавторов
150	Провести исследования, разработать методы расчета и устройства геотканевого анкера (ГТА) для зданий и подземных сооружений (I-II эт.)	--«--	НТО НИИОСП, М.	1993- 8	--«--
151	Изобретение «Временная дорога», патент №1790642	Печ.	Бюллетень изобретений	№3-1993	Горшунов Л.Н.
152	Изобретение «Пневмопробойник», патент №1816014	--«--	Бюллетень изобретений	№ -1990	Коллектив соавторов
153	Изобретение «Фундаментный элемент», патент №1811727	--«--		№ -1990	Коваль В.Е., Оперштейн В.Л.
154	Провести исследования и разработать рекомендации по расчету, конструированию и устройству пленочно-тканевых завес и дрен в грунтовых массивах для защиты селитебных территорий от вредных химстоков	Рук.	НТО НИИОСП, М.	1994, л. 5,4	Смолин А.Н., Фанштейн Е.А.
155	Изобретение «Устройство крепления трубопровода от всплывания (УКТВ)», патент РФ №2074998	Печ.	Бюллетень изобретений	№7-1997	Райков Р.В., Киселев В. И., Ероенкова В.И., Бабанова В.
156	Изобретение «Упруг. элемент И.З. Гольдфельда», патент РФ №2025608	--«--	Бюллетень изобретений	№24-1994	—
157	Изобретение «Способ определения параметров подземн. полости», патент РФ №2018157	--«--		№15-1994	Хоменко В.П.
158	НИР «Разработка технических решений конструкции пустотелых несущих опор для подземных сооружений, устраиваемых с примен. двойных оболочек, заполненных литым бетоном» (подр. 4.1)	Рук.	НТ отчет НИИОСП	1995, -3п.л.	Рук. отчета Ильичев В.А., Рук. сектора Гольдфельд И.З.

Список научных трудов и изобретений за 1961- 2022 гг. Гольдфельда Игоря Зусевича

№№ п.п.	Наименование труда (статьи, отчета, изобретения)	Печ., рук.	Назван. журнала, издательства	№ жур./ год изд./печ. л.	Соавтор
1	2	3	4	5	6
159	Статья «Антифильтрационная завеса против грунтовых вод и химических стоков» «Antifiltration screen preventing penetration of ground waters and chemical sewages»	Печ	Сб. X Дунайско-Европ. конференции МГиФ, Румыния, Бухарест Proceedings of the Tenth Danube–European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.4, Bucharest, pp.807...814	1995, л. 0,4 (стр. 807-814)	—
160	Проект 08.28.5.2.1. «Новые технологические здания мобильной конструкции»	--«--	Каталог инвестпроектов передовых технологий для различных отраслей промышленности.	1995 л 0,1.	--«--
161	Изобретение «Культивационное сооружение И.З. Гольдфельда», патент РФ №.2030868	--«--	Бюллетень изобретений	№.8-1995	--«--
162	Изобретение «Противофильтрационная завеса», патент РФ №.2054500	--«--	Бюллетень изобретений	№.5-1996	--«--
163	Изобретение «Устройство для бестраншейной прокладки длинномерного элемента», патент №.2052030	--«--	Бюллетень изобретений	-1996	--«--
164	КЭФ – конструкции и РТ - технологии бестраншейной прокладки подземных коммуникаций	Рук.	НИР ГНЦ «Строительство»	1996	--«--
165	Антифильтровые завесы и выстилки для защиты котлованов подземных сооружений и выработок от грунтовых вод и вредных химстоков (конструкции, материалы, технологии)	— —	НИР ГНЦ «Строительство»	--«--	--«--
166	Способ бестраншейной прокладки трубопроводов	Печ.	Ж. «Эколинк» (Россия и мир: наука и технология), ГНЦ "Строит-во", Министерство науки и технологии РФ	№.2-1997, с. 7	--«--
167	Эффективный способ крепления конструкций в слабых грунтах	--«--	--«--	№.3-1997, с.9	--«--
168	Композитные элементы фундаментов и рукавноторовые технологии их выполнения	--«--	Ж. "Основания, фундаменты и механика грунтов", Стройиздат, М.	№.5-1997, стр. 10..15	--«--
169	Изобретение "Каток", патент №.2079596	--«--	Бюллетень изобретений (Роспатент)	№.14-1997	--«--
170	Изобретение "Универсальный каркасный модуль (УКМ)", патент №.2097518	--«--	Бюллетень изобретений (Роспатент)	№.33-1997	--«--
171	Изобретение "Трость-сиденье (ГИЗ-1)", патент №.2111694	--«--	Бюллетень изобретений (Роспатент)	№.15-1998	--«--
172	Toroidal compactor: a general – purpose tool for compaction, destruction and cleaning of solids	--«--	Тр. Междунар. конференции «Подземный город: Геотехнология и архитектура», С-Петербург (8-10.09.1998)	1998, - пр.333... 337	--«--
173	Рекомендации по проектир. и устройству оснований, фундаментов и подземных сооружений при реконструкции гражданских зданий и исторической застройки	--«--	Правительство Москвы - Москомархитектура, ГУП «НИАЦ»	1998-стр.89	Коллектив соавторов под рук-вом В.А.Ильичева
174	«КЭФ – конструкции и РТ – технологии при подземном стр-ве» - отчет (I этап: Разработка методов предупреждения при экстремальных ситуациях)	Рук.	НИР. «Разработать проблемы освоения подземного пространства мегаполисов с развитой инфраструктурой для возведения крупномасштабных подземных сооружений», ГНЦ «Строительство»	1998, л. 1.	--«--
175	"Кэф-комплекс водозащитно - технологических решений для подземного стр-ства"	Печ.	ж. "Строй-клуб", (информационно-технический), М.	№.4-2004,- стр.17-19	Дегасюк О.В.
176	"Подземная прокладка магистрального трубопровода в мерзлом грунте с "управляемым" околотрубноым основанием"	Печ.	Сб. международной конференции "Криосфера нефтегазоносных провинций", г. Тюмень	2004, с. 53	
177	Задачи совершенствования системы качества ISO 9000 в постсертификационный период для развития производства проектно-исследовательского института Фундаментпроект	Печ.	Информ-бюллетень "Нормирование, стандартизация и сертификация в строительстве" / М., Госстрой России	№.6-2004, с. 23-27	Минкин М.А., Хижнякова А.В.
178	Прокладочный инжиниринг магистральных трубопроводов в сложных грунтово-климатических условиях	— —	ж. "Нефтегазопромысловый инжиниринг" / М., ООО "АРГМ"	№.4-2004, с. 2-10	--«--
179	"Опыт проектной организации по сертификации управления качеством согласно Международной системе стандартов ISO 90002000"	Печ.	Ж. "Промышленное и гражданское строительство" (ООО "Издательство ПГС"), М	№.2-2005, с.28-30	Минкин М.А., Хижнякова А.В.

Список научных трудов и изобретений за 1961- 2022 гг. Гольдфельда Игоря Зусевича

№№ п.п.	Наименование труда (статьи, отчета, изобретения)	Печ., рук.	Назван. журнала, издательства	№ жур./ год изд./печ. л.	Соавтор
1	2	3	4	5	6
180	Использование рукавно-торовых технологий в строительстве	— "	Сб. международной научно-технич. конференции "Актуальные проблемы автомоб., ж-дор. и трубопров. транспорта в Уральск. регионе" / Пермь, ПГТУ	2005 с. 78-86	—
181	Быстровозводимые объекты, изделия и способы для линейного строительства и условий ЧС	— "	ж. "Нефтегазопромысловый инжиниринг" / М., ООО "АРГМ"	№2-2005, с. 16-19	Игнатенко .А.А.
182	Использование тороидного катка в строительных целях	— "	Сб. 2-ой Междунаро. научно-практич. конф. "Торовые технологии" / г. Иркутск	2005, с. 100-109	—
183	СМК проектно-изыскательской организации: перспективы и сложности	— "	Ж. "Стандарты и качество" / (РИА Стандарты и качество), М	№9-2006, с.70-72	Хижнякова А.В.
184	Расширительные процедуры ISO 9000:2000 - признак и средство улучшения деятельности предприятия	— "	Бюллетень строительной техники (БСТ) / М., издательство БСТ	№10-2006, с. 60-63	Хижнякова А.В.
185	Труба сама себя зароет!	— "	Ж. "Промышленно-строительное обозрение" / С-Петербург	№2-2006, с. 72-73	—
186	Статья по нашему запросу о повторном аудите (в рубрике "Коллизии аудита")	— "	Ж. "Методы менеджмента качества"	№7-2006	Хижнякова А.В.
187	Копать-не копать?	— "	Газета инженеров нефти и газа "Росинг" / г. Самара	№6-2006, с.8-9	—
188	Проложим трубу без "окопов"	— "	Ж. "Промышленно-строит. обозрение" / С-Петербург	№5/103- 2007, с. 89-90	Р. Михайлова
189	Высокотехнологичный метод подземной прокладки инженерных сетей	—<	Труды междунар. конференции по геотехнике «Развитие городов и геотехнич. строитель-ство» // С-Петербург, 16-19.06.	2008, том 4, с. 575-578	Минкин М.А.
190	Изобретение "Способ прокладки подземного трубопровода, машина и буровая установка для его осуществления", патент №2322629 от 12.12.2006 г.	—<—	Бюллетень изобретений (Роспатент)	№11-2008	Минкин М.А., Тимаков В.А.
191	Линейные дрена и фильтрационно-технологические защиты при реконструкции подвалов и других заглубленных сооружений	—"	Сайт стройфирмы "Иван-Ник"	2007, стр.3	—
На 15.09.2008 г. Общих трудов 191, статей 99, изобретений 62 (в том числе, патентов 16)					
192	Высокотехнологичная прокладка подземных инженерных сетей	Печ	ж. "Основания, фундаменты и механика грунтов" (изд. на англ.- Springer Science-США)	2009, №1, с. 20...24	—
193	Технология бескопочно-бесподъемной прокладки (ББП) мелкоподземных трубчатых инженерных сетей // Non-Excavation (BBP) Technology Provides Submerged Utility Pipelines Construction	—"	Ж. Oil&Gas Eurasia (на рус. и англ. языке)	2009, май, №5, с.10,11.	Аннотир. статья
194	Бескоп.- бесподъемная прокладка инженерных сетей как объект интеллект. собст.	—"	Ж. Промышл. и гражд. строительство	2010, №3, с. 62...64	—
195	"Application of sounding penetration test with the first type of penetrometers developed by "Fundamentproekt" to predicting pile load tests results"	печать	Proceedings of the international geotechnical conference "Geotechnical challenges in megacities"	2010, Vol.3. pp.1066 ... 1072. Moscow.	Е. Smirnova
На 12.01.2011: общих трудов – 195, из них статей 104, изобрет. 62 (в том числе – 16 патентов)					
196	Графоаналитическая обработка результатов статических испытаний грунтов забивными сваями и зондированием	печать	Ж. "Основания, фундаменты и механика грунтов" (ОФМГ)	№5-2011, с.35-40, Москва	Смирнова Е.А.
197	Взаимосвязь показателей статического зондирования Грунтов установками первого и второго типов	—"	Международный журнал "Геотехника"	2012, №2, С.4-13	Смирнова Е.А.

Список научных трудов и изобретений за 1961- 2022 гг. Гольдфельда Игоря Зусевича

№№ п.п.	Наименование труда (статьи, отчета, изобретения)	Печ., рук.	Назван. журнала, издательства	№ жур./ год изд./печ. л.	Соавтор
1	2	3	4	5	6
198	Инновационные решения нулевого цикла мостов	На диске	Тр. Межд. научно-техн. конф. "Рос. и заруб. технологии проектир. и стр-ва фундаментов опор мостов. сооружений", - ООО МАФ	17.10.2013, www.fc--union.com,-с. 23-34 /BBC, пав.-75	----
199	Новые технологии и виды фундаментов	На диске	Тр. Межд. научно-техн.-конф. "Новые технологии и техника для устройства и усиления фундаментов в пром. и гражд.стр-ве"	06.06.2013- www.fc--union.com,- Крокус-Экспо, пав.3	----
200	Практика расширенного анализа результатов испытаний грунтов сваями и зондированием	печать	Международный журнал "Геотехника"	2013, №3, стр. 3-20	----
201	Геотехническая оценка работы сваи в грунте посредством угловой аппроксимации графика "осадка-нагрузка" полевого испытания	печать	Тр. Междунар. конфер. (к 80-летию кафедры Геотехники СПб ГАСУ): "Совр. геотехнологии в стр-ве и их науч.-технол. сопров."	5.02.2014,- СПб, т.2, -стр. 89-99	----
202	Индустриал.технология прокладки магистральных трубопроводов на слабых грунтах и под водой	печать	Международный журнал "Геотехника"	2015, №2,- Стр. 43-49	----
203	Универсальная опора для ЛЭП	На диске	Междун. НТ-конфер., М., ВДНХ, 1-3. 12.2015 Сб.докл. "Новые опоры и фундаменты для возд. линий электропередач"	www.fc--union.com, ООО МАФ, Стр. 27-31	Соавторы Тимаков В.А., Шимченко Г.И.
204	Учет фактора времени при анализе результатов стандартных испытаний грунтов сваями	печать	Международный журнал "Геотехника"	2015, №6, стр. 52-62	-----
206	Гибкий тороид-универсальная технологическая основа для инноваций	Доклад	Петрухинские чтения "Инновац.геотехнол. в практике стр-ва", М., НИИОСП им. Н.М. Герсеева	25.05.2016	----
207	Гибкий тороид (ГТР)-универсальная конструктивнотехнолог. основа инновационных строительных разработок	На диске	"Инновац. технологии фундаментостроения" //МАФ-ГАСИС// М., Крокус-Экспо	2.06.2016 www.fc--union.com,-стр.6,7	----
208	Трансформерный тороид в строительстве	печать	Ж. "Транспортное строительство", М.	2016, №11, стр.9-11	---
209	Конструктивно-технологические инновации взлетно-посадочных полос (ВПП) аэропортов в шельфовой зоне	На диске	Междунар. научно-практическая конференция "Современ. тех-нологии проектирования и строительства аэропортов", М. www.fc-union.com, ООО МАФ	МФЦ Крокус-Экспо", 01.06.2017, стр. 27-31	---
210	Преобразование грунтовых оснований путем армирования, дренирования и предварительного нагружения	Печать В интернете	Электронный журнал GeoInfo.ru	04.09.2017, печ. стр.-14	---
211	Планировочно-конструктивные решения нефтедобычной площадки на мелководном шельфе	печать	Сб. докл."Современ.-технологии фундаментостроения" //МАФ-ВШЭ, Институт ГАСИС//М, www. fc-union.com	14-16.11. 2017, стр. 22-33	Тимаков В. А.

Список научных трудов и изобретений за 1961- 2022 гг. Гольдфельда Игоря Зусевича

№№ п.п.	Наименование труда (статьи, отчета, изобретения)	Печ., рук.	Назван. журнала, издательства	№ жур./ год изд./печ. л.	Соавтор
1	2	3	4	5	6
212	"Угловая аппроксимация" и "векторное представление" Нагрузочных графиков стандартных испытаний грунтов	Печать в Интернете	Свайные фундаменты: тенденции, проблемы и перспективы развития// Междунар.конференция МАФ// М., Крокус-Экспо - "Аквариум", www.fc--union.com	05.06.2018, стр. 12	----
213	Долевая работа вертикально-нагруженной сваи при статических испытаниях грунтов	Печать в Интернете	Сб. докл. "Перспективы Развития инж. изысканий в строительстве РФ"// М., сайт www.geomarket.ru	1014.12.2018, стр.469-481	----
214	Камеральная обработка графика "осадка-нагрузка" стандартного испытания грунта-оснагруженной сваей	В интернете и на диске	Сб. докл. "Спец. техника и технологии устройства оснований и фундаментов//Межд. конф. МАФ//М., Крокус-Экспо, www. fc-union.com	6.06.2019, стр.4	----
215	Планировочно-конструктивные решения нефтедобычной площадки на мелководном шельфе, ч.1	Печ.	Ж."Фундаменты" МАФ	2020, №1, стр.34-38	Тимаков В.А.
216	Планировочно-конструктивные решения нефтедобычной площадки на мелководном шельфе, ч.2	Печ.	Ж."Фундаменты" МАФ	2020, №2, стр.24-270	Тимаков В.А.
217	Реализация принципов "золотого сечения" в лабораторных испытаниях грунтов оснований фундаментов	Печ.	Ж. "Геотехника" ООО "ИГИИС", М.	2021, №3, том XIII	---
218	Прогнозно-долевой анализ на базе "золотого сечения" статического испытания грунта основания моделью оснагруженной сваи	Печ.	Ж."Фундаменты" МАФ, М.	2021, №3,-стр.47-52	---
219	Натурализация принципов "золотого сечения" в геомеханике: от образцов грунта - до планеты Земля	Печ.	Ж."Фундаменты" МАФ, М.	2022, №3,-стр.58-64	---

Независимый электронный журнал

ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
будет выходить ежемесячно
в формате *PDF.



WWW.GEOINFO.RU



GRAPH-ANALYTICAL PROCESSING OF A STANDARD TEST OF FOUNDATION SOIL WITH A BARRETTE PILE

IGOR' Z. GOL'DFEL'D

International Association of Foundation
Contractors (IAFC), Moscow, Russia,
info@fc-union.com
Address: 7 Severnyi blvd., Moscow,
127490, Russia

PETR I. YASTREBOV

Gersevanov Research Institute of Bases
and Underground Structures (NIIOSP),
Research Center of Construction JSC,
Moscow, Russia, niiosp@niiosp.ru
Address: 6 Second (2nd) Institutskaya st.,
bld. 12, Moscow, 109428, Russia

EKATERINA S. DUBROVSKAYA

International Association of Foundation
Contractors (IAFC), Moscow, Russia,
info@fc-union.com
Address: 7 Severnyi blvd., Moscow,
127490, Russia

ABSTRACT

The article presents a statistical method for the cameral assessment of the work of the soil foundation of bored piles of large cross-section and the depth of laying of barrettes, testing of which for the future object was interrupted. Field tests of soils with two identical barrettes at one of the construction sites in Moscow were subject to analysis. The cross section and length of the barrette was $0.64 \times 2.80 \times 52.50$ m. The barrettes were made of B35 class concrete and reinforced with A500 class reinforcement. The ground base of the barrette point was water-saturated limestone of medium strength with a temporary resistance to uniaxial compression $R = 23$ MPa. The soils along the shaft were represented by fine and medium-sized sands, soft and fluid plastic loams, semi-hard and hard clays. The load in the tests was created by a system of combined hydraulic jacks with a total load capacity of 42,000 kN. The reactive force was perceived by a rectangular reinforced concrete beam anchored to the soil base by six barrettes identical to those tested. Barrette tests were not brought up to the loads stipulated by the program due to damage to the thrust beam. Calculation of barrettes settlements in 3D spatial formulation using the MIDAS software package was limited to the loads achieved during the tests. Evaluation of the "settlement – load" graph of the unfinished soil testing with barrettes according to the proposed method made it possible to predict their possible outcomes in the event of completion, to determine the basic parameters of work, such as limiting load of the tip, shaft and pile as a whole, "reduced" modulus of deformation and pre-experimental load. The outlined approach is useful for highly loaded piles that are difficult or impossible to fully test, and can contribute to the design of the thrust stand scheme, the selection of the required jacks, the assignment of load steps, and finally, the type and number of anchors.

KEYWORDS:

barrette pile, stop bar, anchor pile, foundation soil; load and settlement, soil testing with piles, pile calculation according to FEM, graphic-analytical processing, “settlement – load” graph, lobar graphs of the base and shaft; basic parameters of work, preexperimental load and crack formation, “reduced” modulus of deformation; test in progress forecast.

FOR CITATION:

Gol'dfel'd I.Z., Yastrebov P.I., Dubrovskaya E.S. Graph-analytical processing of a standard test of foundation soil with a barrette pile. *GeolInfo*. 2022. 12: 120–129

Introduction ►

Globalization of interstate relations, increase in the population of cities and the number of megacities, improvement of ways and means of transport required the development of new territories in various geological and climatic conditions. As a result, the need for countries and enterprises to develop construction innovations and exchange experience in the construction of high-rise structures, buried objects, long bridges, multilevel transport junctions, artificial dams, islands in water areas has expanded [1–3]. In a short period of time, many new technologies, nomenclatures of materials, types of products and equipment emerged in construction, which made it possible to fund objects with high loads and in difficult engineering and geological conditions.

For such conditions, pile, slab and pile-slab foundations in a monolithic or precast-monolithic design according to [4–8], in particular, with piles of the barrette type (hereinafter referred to as the barrette) were recognized as optimal. Barrettes are industrially produced at the site of the future facility using the “walls in the ground” technology, as a result of which they have a shaft diameter configuration in the form of linear elements. Barrette loads during testing reach $(10,28) \cdot 10^4$ kN, and the dimensions of the cross section and the depth of the shaft is $a \times b \times L = (0,7,1,5) \times (1,0,3,0) \times (20,100)$ m. In view of the heavy loads and inadmissible distortions of high-rise structures, the foundations for such objects are made of barrette-type piles, which require pre-design field tests under loading conditions close to the real operation of barrettes. This process is time-consuming, labor-intensive and traumatic [4].

The effectiveness of pile foundations depends on the completeness of the use of the physical and mechanical properties of the foundation soils. At the same time, the value of loads on the pile is limited by settlements that do not exceed those allowed for the designed object. Mean-

while, the share loads of the heel (base) and the shaft (side surface) created by the pile during testing according to the Russian GOST 5686-2012 “Soils. Methods for field testing with piles” are not separately defined, and the total load cannot always be brought to the allowable settlement. It is the last named characteristics – the share loads of the pile base and the shaft, as well as the settlement allowed under the total load – that serve as the basis of the design efficiency indicators in accordance with the Construction Rules SP24.13330.2011 “Pile foundations. Updated version of SNiP 2.02.03-85 (with changes N1, 2, 3)”. The standards given for the design of piles – SNiPs, GOSTs, as well as departmental documents cannot take into account the variety of physical and mechanical properties of soils, individual construction technologies and types of structures of the piles themselves without full-scale tests.

Osterberg’s well-received test method for heavily loaded piles “O-cell” [9] solves the problem only partially, providing separate use of the work of the pile base and the side surface. However, the “O-cell” increases the cost of testing and allows for a controversial conditionality when processing load graphs: equality of the partial work of the pile base and side surface with a total indentation of the entire pile “top-down” separately fixed, but opposite to the same partial work using the “O-cell”. At the same time, in the “O-cell”, the limiting share loads due to the large value are generally rarely achieved together. We will show the possibility of solving the noted problems using the example of testing a barrette for a 56-storey building in Moscow [7].

Methodology for performing and discussion of experimental work ►

The future construction site was located within the backfilled floodplain of the Yauza River. The settlement plan of the building provided for its dimensions along the extreme axes of $134,15 \times 139,79$ m and a frame-mono-

lithic cross section made of concrete of class B30–B50 with reinforcement of class A400–A500. The foundation was planned in the form of a monolithic reinforced concrete slab with a thickness of 3.3 m, supported by 96 bored piles of the barrette type with a cross section of $0,64 \times 2,80$ m and a pile depth of $L = 52,2$ m. According to the project, the barrette bases were embedded 1.9–5 m into the carrier layer represented by medium-strength water-saturated limestone (geological engineering element EGE-35) with a temporary resistance to uniaxial compression on average $R = 23$ MPa. The layer-by-layer alternation of layers and the physical and mechanical properties of the foundation soils are given in Table 1, starting from the level of the site layout to the bottom of the tip of the barrette piles.

According to the calculation of the building frame, the average design load per one barrette was $N_{br} = 20,710$ kN. To confirm the design calculations, studies were carried out on the territory of the allocated construction site, including field tests of 2 barrette piles. The load bench for testing the barrettes was built before the start of construction and was intended for testing 2 single full-scale piles duplicating the future foundation (Fig. 1). For reliability, two identical barrettes were used, made simultaneously at a distance of 2.55 m in axes from each other, rested against the same stop bar, but tested sequentially (the second one was tested after the completion of the test of the first pile). They differed from 6 anchor barrettes of the same design by an increased section of the head up to $1,02 \times 2,82$ m at a depth of 3.31 m (i.e. 6% of the barrette depth). The broadened heads of the barrettes were covered around the perimeter to the full length with metal sheets, and below the barrette shaft was supposed to be covered with glass insulator along the entire contour (Fig. 1, pos. 6 and 8). The widening of the head provided the placement of a set of 22 synchronized DGO-200 jacks with an auto-support station for test load stages.

Table. EGE names and physical and mechanical parameters of the barrette foundation soils

EGE	Soil	Density ρ , kN/m ³	Layer thickness h , m	Deformation Modulus E , MPa	Angle of internal friction φ , °	Cohesion c , kPa	Poisson's ratio μ
EGE-4	Soft and fluid plastic loam	18.1	4.5	7	17	13	0.35
EGE-8	Water-saturated fine and medium sand	19.2	3.7	21	27	2	0.30
EGE-26	Water-saturated coarse and medium sand	19.9	8.0	30	29	1	0.30
EGE-28a	Hard and semi-hard clays	18.1	4.0	56	16	79	0.35
EGE-29	Hard clays	18.6	40	51	21	93	0.35
EGE-33	Hard clays	21.7	23	53	21	93	0.35
EGE-35	Water-saturated medium strength limestone	18.5	5.0	68	Uniaxial compression limit $R_c = 23$ MPa**		0.35
Calculated values of parameters	$\rho_{cp} = 20.1$	$\Sigma = 52.2$	$E = 68^*$	$\varphi_{cp} = 22$	$\Sigma ch = 3087$ kPa	0.35	

* Possibly the value of the modulus of deformation $E = 6800$ given in MPa in the table of article [7] is erroneous, in fact limestone as a variety of soil has a value of the order of $E = 68$ MPa.

** Limit of uniaxial compression of limestone $R = 23$ MPa was introduced by the authors according to [7].

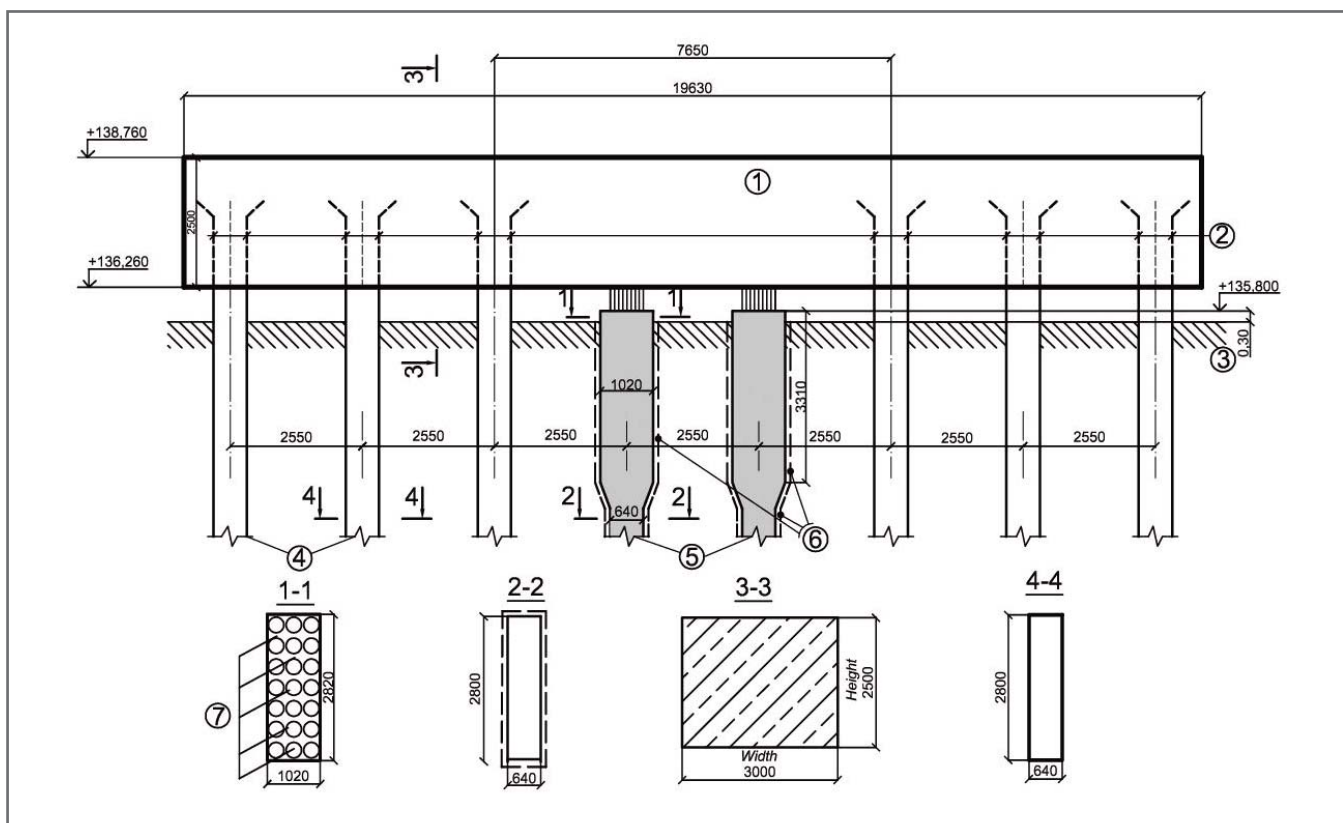


Fig. 1. Structural scheme of soil testing with barrette piles: 1 – reinforced concrete beam; 2 – releases of barrette fittings; 3 – top of the head of the tested barrettes; 4 – anchor barrettes; 5 – tested barrettes; 6 – metal sheets along the perimeter of the barrettes; 7 – hydraulic jacks with a diameter of 300 mm (22 pieces) at the top of the barrette head; 8 – glass insulator along the barrette shaft

Covering with metal sheets excluded buckling of the pile head to the sides from the concentrated load of the jacks

(Fig. 2). The loading method complied with the requirements of GOST 5686-2012. Load steps were taken as 4000 kN,

conditional stabilization speed was 0.1 mm for the last hour of observations [7].

Figure 3 shows a standard form of comparative graphs of the dependence of settlement on the load S - N tests of both barrette piles. Visual evaluation of the charts showed the next.

1. Works of barrette-1 and barrette-2 based on the results of successive tests are qualitatively close, but not the same. It can be considered that the SSS of the soil of the barrette-1 pile base in the second phase of the test (at $N > 16000$ kN) was in a more “deformable” state than the soil of the subsequent test of the barrette-2 pile.

2. After this load, the barrette-1 graph gets a break, which may be due to the beginning of the appearance of imperceptible hairline cracks on the upper plane of the stop bar, the opening of which at the last stabilized load stage $N = 32,000$ kN reached a width of $\delta = 2.5 \div 3$ mm.

3. The lower “deformability” of the barrette-2 foundation soil in the final phase compared to barrette-1 may be due to the proximity to the previously tested barrette-1 pile, which affected the initial SSS of the barrette-2 pile.

4. The barrette-2 test was also accompanied by upward bending of the stop bar, but this time it was repeated and at a lower load $N = 34,000$ kN, which caused a further expansion of cracks up to 7 mm (Fig. 4).

The foreign practice recommends that in order to maintain the nominal bearing capacity of a single pile of considerable length L , it should be placed at a distance l in the axes from neighboring piles “at least 10% of their length” [10]. Thus, be-



Fig. 2. A set of 22 synchronized jacks DGO-200 with auto support station on the head of the tested barrette pile. (photo by E.A. Parfenov).

tween barrette-1, barrette-2 and similar in design anchor piles, the distance l in the axes should be:

$$l \geq 0.1L = 0.1 \times 52.2 \text{ m} = 5.2 \text{ m}, \quad (1)$$

which is twice the actual $l = 2.55$ m. The stress-strain state of the barrette-2 foundation soil was “affected” by the previous barrette-1 test in the direction of strengthening, which influenced the barrette-2 test.

Figure 2 of the article [7] does not show that the experimental barrettes are covered with metal sheets, although this is stipulated in the text. It is also not clear why the shafts of the barrettes were coated with glass insulator and how this was taken into account in the obtained physical and mechanical characteristics of the EGE soils. How was the deformation modulus of limestone determined at a depth of 50 m? These data would be very useful to confirm the analytical calcula-

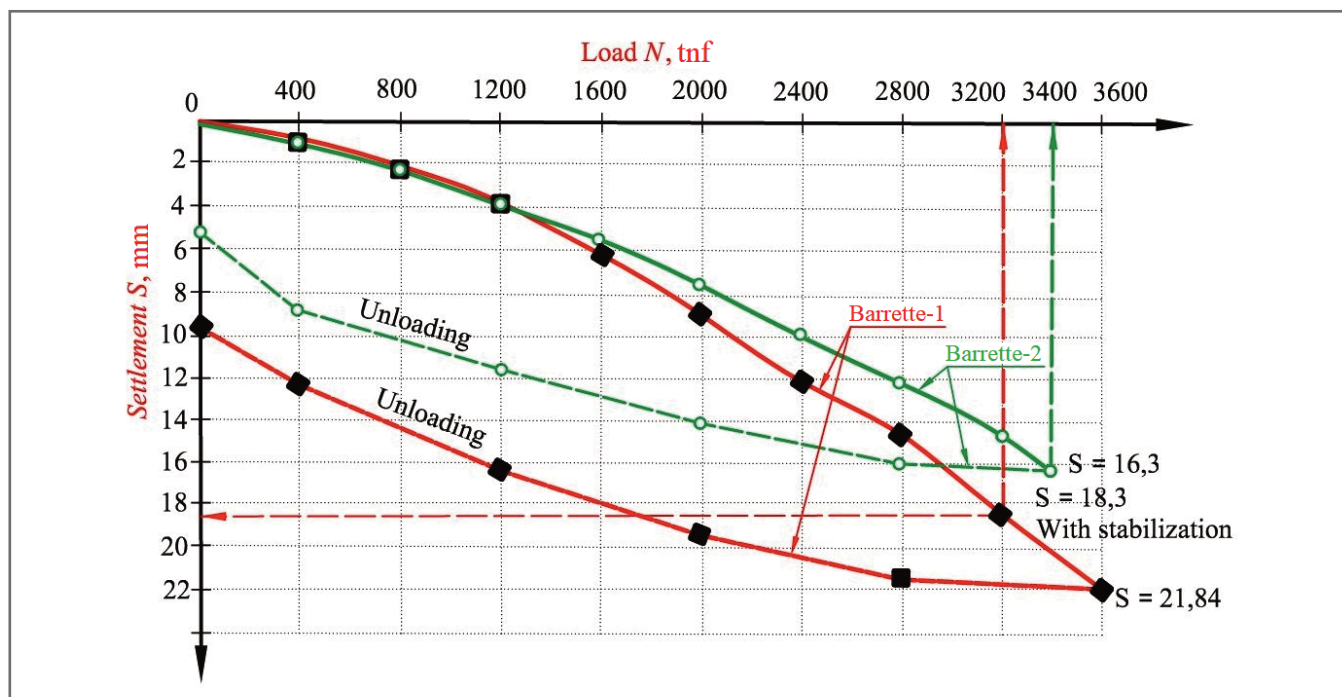


Fig. 3. Dependence of barrette settlement on load

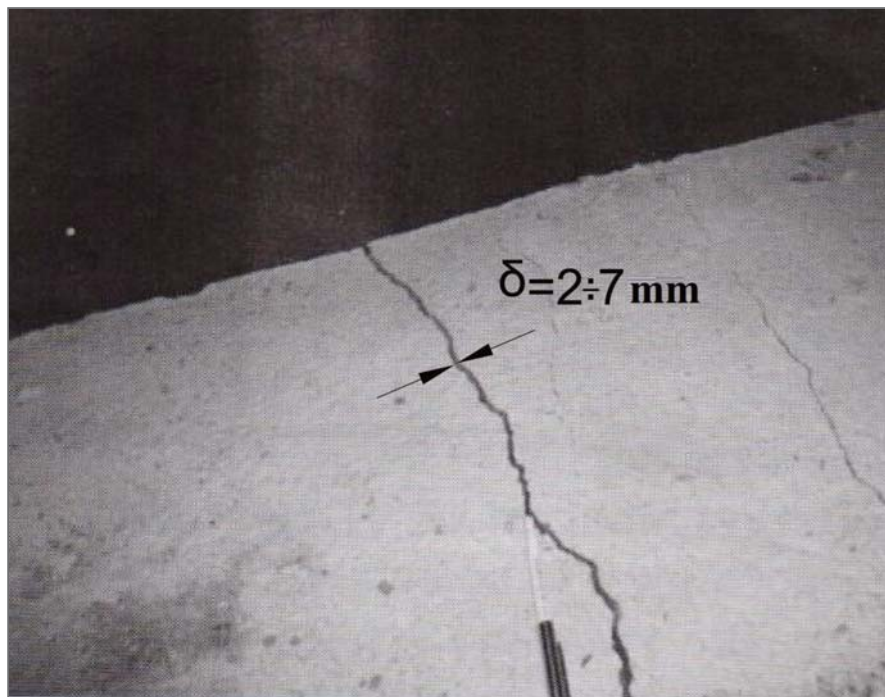


Fig. 4. Photo of cracks on top of the barrette-1 stop bar, which expanded by the time the barrette-2 test was completed. (Photo by E.A. Parfenov)

tions of the barrette test and the development of the foundation design.

It is important that, along with the provision of real soil properties and barrette test conditions (Table 1 and Fig. 1), the barrette-1 calculation was performed by the finite element method based on the MIDASGTSNX software package in 3D formulation. Finite element calculation schemes were based on the elastic-plastic model "Modified Mohr-Coulomb". In Fig. 9 of the article [7] it is concluded that the full-scale and program graphs for test-

ing piles are similar due to the close linear dependence of settlement on load $S = f(N)$ for both and the small difference in settlement $DS = 6.1$ mm at the final load stage $N = 36,000$ kN (design settlement is 2.6% more than the experimental one).

From our copy (Fig. 5) of these authors' graphs, the linearity of the full-scale barrette-1 graph in the entire loading range does not follow, and the comparison of the design settlement with the full-scale one, but not stabilized, is hardly correct.

Taking into account the proximity of the tested barrette-1 and barrette-2 to the neighboring anchor piles, an assessment was made of the nominal settlement of barrette-1, which would be in the absence of the influence of neighboring piles. According to the Converse Labarre formula [10], the "economics" of a single pile in a cluster is determined by the next formula:

$$\Theta = 1 - \arctg \frac{d_0}{l} x \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn}, \quad (2)$$

where: 1 is 100% work of a single pile; d_0 is the "equivalent" pile diameter; $l = 2.55$ m is the distance between the axes of the barrette and neighboring piles; $n = 4$ is a number of piles in a row; $m = 1$ is the number of rows.

The calculated equivalent diameter d_0 of the barrette pile made up:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4X(a-b)}{\pi}} = \sqrt{\frac{4X(0.64-2.8)}{\pi}} = 1.51 \text{ m}, \quad (3)$$

where a, b are the dimensions of the sides of the barrette diameter, m.

Then:

$$\Theta = 1 - \arctg \frac{1.51}{2.55} x \frac{(4-1) \times 1 + (1-1) \times 4}{90 \times 1 \times 4} = 0.75. \quad (4)$$

That is, the final settlement S_k at the final load $N_k = 36,000$ kN in the absence of influence on the barrette-1 test from the neighboring piles would be:

$$S_k = S_{op} / \Theta = 21.84 / 0.75 = 29.1 \gg S_{pk} = 29.6 \text{ mm}. \quad (5)$$

Thus, the software calculation confirmed the operation of barrette-1 as a

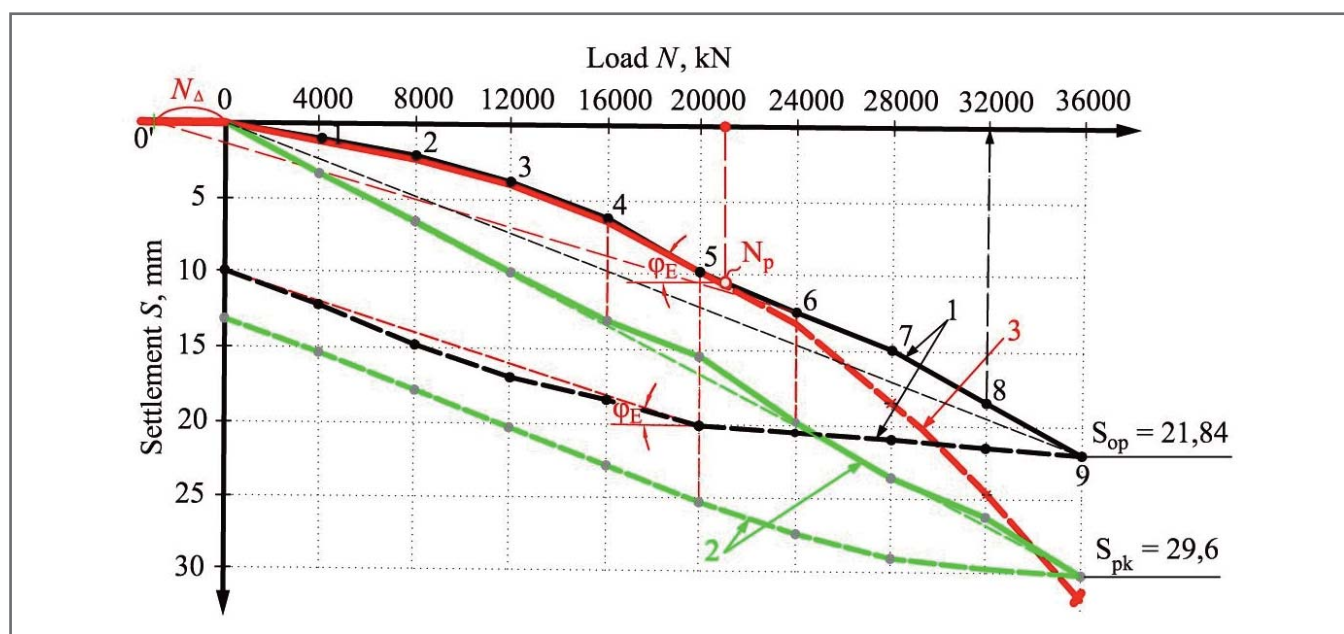


Fig. 5. Comparison of test graphs: 1 – experimental barrette-1; 2 – software calculation of barrette-1 by the FEM method; 3 – graphic-analytical processing of barrette-1 according to the method used by the authors

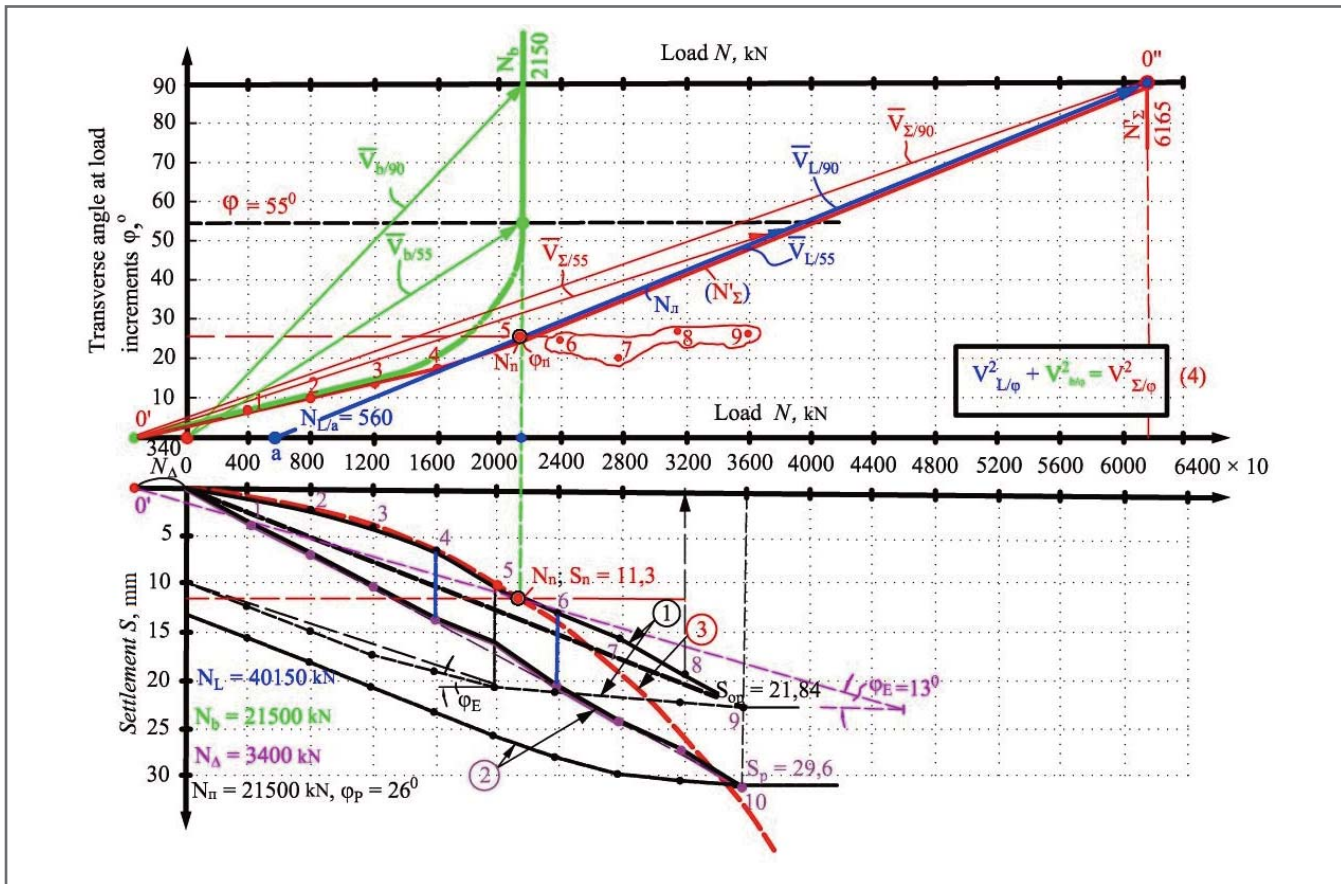


Fig. 6. The method of graph-analytical processing of the barrette-1 test: 1 – an experimental graph for testing the barrette-1 pile; 2 – a graph of software calculation using the FEM method; 3 – a load graph for in-depth graphical analytical processing

single pile, despite testing it under the influence of neighboring piles. It remains to be regretted why the software calculation based on the elastic-plastic model of the pile was not continued 2–3 steps beyond the linear section of the “settlement - load” graph $S_n = f(N)$. This could provide, for example, an assessment of the fractional work of the pile base (heel) N_l or the shaft (side surface) N_b required by the design.

It is assumed that the barrette pile transfers the load to the ground as a stand, only with the end face of the lower end. This is permissible in the absence of sludge sediment in the bottom hole. It is not always possible to clean the bottom hole from sludge. For example, at the 16th plot of Moscow-City site, soil testing was carried out with piles embedded in limestone, with separate loading of the lower end and side surface [11]. The test results showed that the pile base settlements were several times higher than the shaft settlements, the contact of which with the ground was only along the lateral surface. In this case, for long piles, the forces of lateral friction cannot be neglected.

Let us compare the facts of testing piles given in the article [7] with the re-

sults of graphic-analytical processing of the S - N load graph for barrette-1 pile according to the method [12–15]. The results of test processing based on Fig. 5 are detailed in Fig. 6.

The previous positive results of using the method made it possible to correct the requirements for testing the soil with heavily loaded piles and barrettes in terms of the scheme of the thrust system for testing, the number of jacks, the values of the load steps, the type and number of anchors (Fig. 1).

Through the beginning and end of each step of the load graph of the barrette-1 pile in S - N coordinates (Fig. 6, points 1–9), let us draw secants and measure the geometric angles j_i of these secants to the horizontal with a protractor. The values of the angles j_i obtained in the initial coordinates (in the range of 0–90°) are plotted in the j - N auxiliary coordinates above the S - N loading graph. Through the obtained points 1–9 in these coordinates one or two straight lines can be statistically drawn. It should be noted that points 1–5 lie well on one straight line (up to $N \approx 20,000$ kN), while points 6–9 are grouped differently (circled by a “rope” curve).

Extending the line 1–5 in j - N coordinates in both directions until it intersects with the horizontal axes: at the bottom – at point O^* and at the top – at point O^{**} , respectively, we obtain the unaccounted experimental load at point $O^* \rightarrow N_D = 3,400$ kN (for example, the mass of the pile) and theoretically limiting load in terms of bearing capacity at point $O^{**} \rightarrow N_{S/c} = 61.650$ kN. At $N_{S/c}$ with a slope angle $j_s = 90^\circ$, the secant of the S - N graph steps is vertical, and the corresponding settlement S_∞ asymptotically tends to infinity.

The nature of the subsequent change in the linear regularity by points 6–9 on the segment can be explained by the beginning of a possible crack formation on the upper plane of the stop bar (first, in the form of imperceptible / hardly noticeable hairline cracks). As the loads increased, the width of the cracks increased, and their opening did not allow stabilizing the settlement of barrette-1 even at a load of $N = 36,000$ kN. As a result of the test for barrette-1, the maximum load $N_{max} = 32,000$ kN was adopted with a stabilized settlement $S = 18.3$ mm < 20 mm, which is permissible according to clause 7.3.5 of the Construction Rules SP 24.13330.2011.

Transferred to point O' of the beginning of the experimental load N_D , a copy of the unloading branch crossed in the coordinates $S-N$ the initial experimental graph near point 5 at $N_n = 21,500$ kN and settlement $S_n = 11.3$ mm. In this way, on the $S-N$ graph, the load of the proportionality limit N_n and its settlement S_n are fixed, and the secant drawn through points O' and N_n forms an angle of the "reduced" modulus of deformation of the soil base $j_E = 13^\circ$ with the horizontal.

The graphical calculation of the tested barrette-1 showed that, like the processing of other ψ tests of soils with piles, when the proportionality limit N_n is loaded, the pile usually breaks along the side surface $N_{b/s}$, and the general test graph itself undergoes a break "by definition". The angle φ_n of the proportionality limit N_n in the $\varphi-N$ coordinates made up by construction $\varphi_n = 2\varphi_E = 26^\circ$.

Thus, the graphical-analytical construction used made it possible to process in more detail and unambiguously the standard graph of static testing of the soil with a pile, including for barrette-type piles. We, the authors of this article, as processors of standard tests of industrial piles, determined the most characteristic (key) loads of barrette-1: pre-experimental $N_\Delta = 3,400$ kN, limiting when the pile is torn off along the shaft (side surface) $N_{b/s} = 21,500$ kN (35%) and limiting under the pile base (heel) $N_{l/s} = 61,650 - 21,500 = 40,150$ kN (65%).

Shared verification of loads can be performed on the corresponding share and general graphs in $\varphi-N$ coordinates using the next formula:

$$N_{l/\varphi} + N_{b/\varphi} = N_{\Sigma/\varphi}, \quad (6)$$

where the terms are share (l/φ , b/φ) and total (Σ) loads taken along one ordinate horizontal φ_i .

The next vector approach is used to determine the moment when the share loads come into operation:

$$V_{l/\varphi}^2 + V_{b/\varphi}^2 = V_{\Sigma/\varphi}^2, \quad (7)$$

where the terms of the sum are the squares of the moduli of the vectors of the share graphs of the pile base N_l and the side surface N_b of the pile, and the final sum is the square of the modulus of the vector of the general graph $V_{\Sigma/\varphi}$ at the selected angles $\varphi = 0 \div 90^\circ$.

Based on the obtained points of the fractional and general graphs in the $\varphi-N$ angular coordinate system, it is possible to graphically construct a standard type

of fractional and general graphs in the $S-N$ coordinate system, including the part not obtained during experimental testing, up to the limit of the bearing capacity $N_{\Sigma/90} = 61,650$ kN. (Fig. 6). This summary graph up to the load $N_n = 21,500$ kN practically coincides with the experimental one, and at the final experimental load $N_k = 36,000$ kN and the settlement $S_k \approx 30$ mm – with the theoretically obtained by the calculation program $S_{PK} = 29.6$ mm (Fig. 5). Therefore, we can trust the "full" form of the predictive graph $S = f(N)$.

We would like to emphasize that we have shown the principle of processing the pile graph assuming that it passed the test as standard. We tried to analytically "predict" the possible operation of the pile in the entire loading range using the obtained incomplete graph. The processing results confirmed the need to take into account the load from the self-weight of the pile ($N_\Delta = 3,400$ kN) and the fact of the "delay" of the inclusion of the pile base ($N_{l/a} = 5,600$ kN). Such a statement of the problem requires knowledge of the ultimate share loads of the pile under the pile base and on the side surface according to the results of engineering forecast.

Engineering forecast of experimental results ►

Let us carry out simplified engineering calculations of the most characteristic (basic) parameters of the predicted completion of the graph $S = f(N)$ of barrette-1 operation based on physical and mechanical indicators of the foundation soil (Table 1) and design and technological features of barrettes (Fig. 1).

1. Preexperimental load N_Δ :

— load from the stop bar:

$$N_{sb} = (2.4 \times 2.5 \times 3.0 \times 19.6 / 17.85) \times 7.65 = 1.512 \text{ kN}; \quad (8)$$

— load from the set of jacks:

$$N_g = 2 \times 22 = 44 \text{ kN}; \quad (9)$$

— own weight of the barrette (with broadening):

$$N_{br} = 227 + 2200 = 2,427 \text{ kN}; \quad (10)$$

— total experimental load of the pile on the ground:

$$N_\Delta = N_{sb} + N_g + N_{br} = 1.512 + 44 + 2.427 = 3.980 \text{ kN}. \quad (11)$$

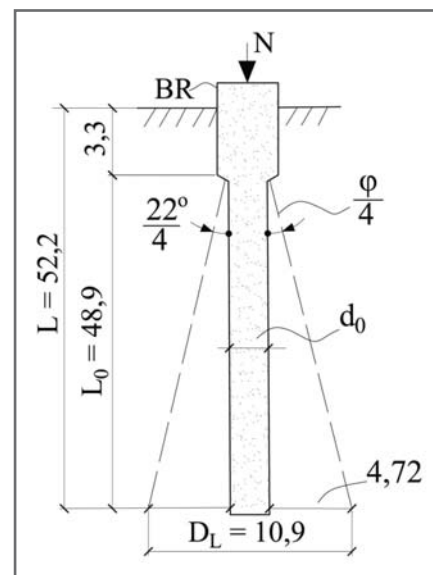


Fig. 7. Conditional pressure cone: D_L is the diameter of the base of the conditional pressure cone, L is the length of the pile shaft buried in the soil, d_0 is the equivalent pile diameter (formula (3)); φ is the angle of internal friction of soils averaged over the depth of the base

2. Ultimate load on the base (heel) of the pile $N_{l/s}$:

$$N_{l/s} = R_s F_{br} = 23,000 (0.64 \times 2.80) = 41,200 \text{ kN}, \quad (12)$$

where R_s is the temporary resistance of limestone to uniaxial compression, kN/m²; F_{br} is a cross-sectional area of the base (heel) of the pile, m².

3. Ultimate (min) load on the shaft (side surface) of the pile (only on the adhesion "c" due to the ambiguity of the effect of glass insulation):

$$N_{b/s} = \Sigma(c_i h_i) \times P = 21,200 \text{ kN}, \quad (13)$$

where $\Sigma(c_i h_i)$ is soil resistance per linear meter of the perimeter of the barrette diameter within the layers of the EGE, kPa/m; P is the perimeter of the barrette cross-section, m.

4. The total load of the pile break is the limit of the bearing capacity $N_{\Sigma/C}$:

$$N_{\Sigma/C} = N_{l/s} + N_{b/s} = 41,200 + 21,200 = 62,400 \text{ kN} \quad (14)$$

5. Calculation of the "reduced" modulus of deformation E_{pr} of the "pile – soil" system takes into account the conditions of the barrette-1 test – the geometry of the pile, the load and settlement at the limit of proportionality, the nature of the

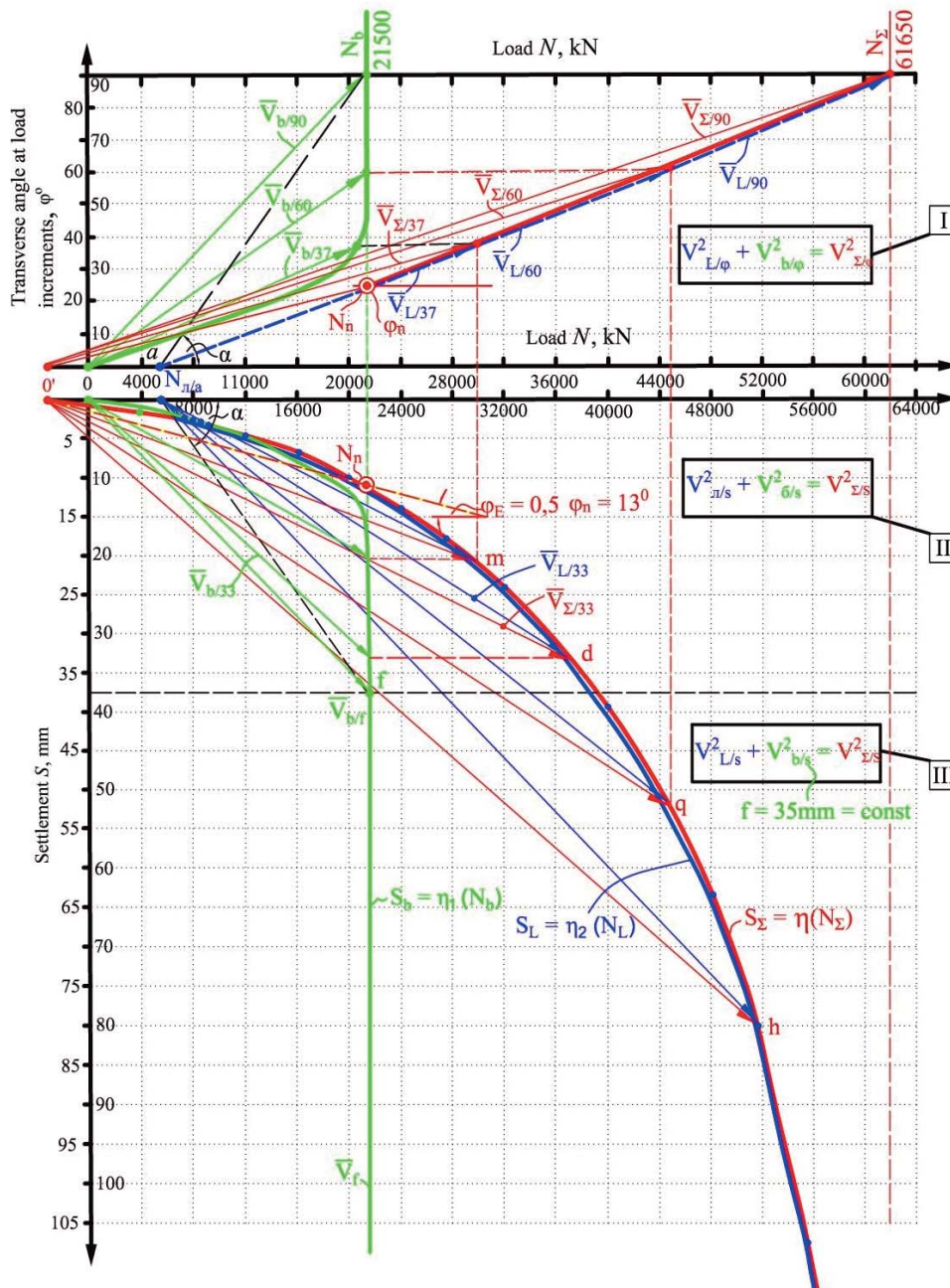


Fig. 8. Obtained predictive share and general standard form graphs of the fully completed barrette test: a – at the top in the φ - N coordinates, three levels $\varphi = 37; 60; 90^\circ$ are arbitrarily taken to demonstrate examples; b – below in the S - N coordinates – similar levels at points m, d, g, h (approximate settlements $S = 21; 33; 53; 82$ mm). The sum of the squares of the absolute values of the vectors of these selected levels is observed. Designations: blue – lobar graphs of the pile base; green – lateral surface; red – general graph with their colour symbols

unloading graph. As a starting point, the formula for testing soil with a flat rigid stamp was used:

$$E = \omega (1 - \mu^2) b (\Delta N_{i/n} / \Delta S_{i/n}) \quad (15)$$

where $\omega = 0.79 \div 2.0$ is the coefficient of the stamp settlement, depending on its shape and the ratio of planned dimensions; μ is the coefficient of lateral expansion of the base soil (Poisson); b is the size of the stamp; $\Delta N_{i/n}, \Delta S_{i/n}$ are the specific load and the corresponding settlement within the limits of the proportionality limit of the test graph. Formula (15)

is transformed to determine the “reduced” deformation modulus E_{pr} of the pile, using the concepts of Fig. 7.

$$D_L = d_0 + 2 \cdot (L_0 + \frac{d_0}{2}) = 1.51 + 2(48.9 + 0.096) = 10.9 \text{ m} \quad (16)$$

$$D_L = \frac{8 \cdot d_0}{15} \cdot L_0 = 0.53 \cdot d_0 \cdot L_0$$

Substituting the size of the stamp b in Formula (15) with the diameter of the conditional pressure cone D_L according to Formula (16), introducing $N_{i/n}$ load and the corresponding settlement $S_{i/n}$ within the proportionality limit N_n of the pile test graph, taking into account the experimental load N_Δ , we obtain the expression [14]:

$$E_{pr} = \omega(1 - \mu^2) \cdot D_L \cdot \frac{(N_{i/n} + N_\Delta)}{D_L^2 \cdot \Delta S_{i/n}} =$$

$$= \omega(1 - \mu^2) \cdot \frac{(N_{i/n} + N_\Delta)}{D_L \cdot \Delta S_{i/n}} \quad (17)$$

$$= \omega(1 - \mu^2) \cdot \frac{(N_{i/n} + N_\Delta)}{0.53 \cdot d_0 \cdot L_0 \cdot \Delta S_{i/n}}$$

Let us calculate:

$$E_{pr} = 1.4(1 - 0.35^2) \cdot \left(\frac{21200 + 3980}{0.53 \cdot 1.51 \cdot 48.9 \cdot 0.0113} \right) =$$

$$= 70.180 \text{ kN/m}^2 = 70.2 \text{ MPa} \quad (18)$$

where $\omega = 1.4$ corresponds to an aspect ratio of 2.74 of the greater diameter of the pile.

The linearized graph of the work of the pile base of the barrette in the φ - N coordinate system passes through two points: the loads of the proportionality limits and the bearing capacity, which indicates the single-phase work of the soil under the tip of the pile [16]. The linear graph of the work of the pile base fixes its beginning on the axis of loads at the point α at the settlement $S = 0$, where $N_{V\alpha} = 5,600$ kN. The starting point $N_{V\alpha}$ fixed on a common standard graph in the S - N coordinates fixes the settlement of the entry into work of the pile base $S_{V\alpha} = 1.3$ mm on the graph of the lateral surface. The key results calculated by simple engineering methods for loads, settlements and deformation modulus are close to those graphically obtained from the experimental graph or indicated in the Table and in Fig. 6.

The engineering forecast confirmed the fundamental results and numerical values of the basic parameters of the graphical-analytical processing of the interrupted pile test, as if it had been completed in full. Empirical control of a fully completed test of long heavily loaded piles can be nominal parameters [17]:

$$\begin{aligned} 0.95 N_{\Sigma C} &= 0.95 \cdot 61,650 = 58,600 \text{ kN} \rightarrow \\ \rightarrow S_{0.95N} &= 0.1 d_0 = 0.1 \cdot 1,510 = 151 \text{ mm} \end{aligned} \quad (19)$$

It should be noted that at the limit shear load along the side surface of the pile the limit of proportionality $N_n = 21,500$ kN. The initial shear settle-

ment on the graph was $S_{sl} = 11.3$ mm, and the ultimate shear settlement ended at 15–20 mm. Such values of ultimate shear settlements are typical for piles in loams and clays [18].

With the same formal load on the graph, we determine the elastic settlement of the shaft:

the actual load will be:

$$N_l = 21,500 - (3,400 + 5,600) = 12,500 \text{ kN}; \quad (20)$$

specific stress in the cross section:

$$\begin{aligned} \sigma &= N_l / \pi (0.5 d_0)^2 = \\ &= 12,500 / \pi (0.5 \times 1.51)^2 = \\ &= 6,980 \text{ N/m}^2; \end{aligned} \quad (21)$$

relative compression of shaft concrete:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \sigma / E = 698 / (35 \times 10^5) = \\ &= 19.9 \times 10^{-5}; \end{aligned} \quad (22)$$

total deformation of the barrette shaft will be:

$$\begin{aligned} \Delta &= L \varepsilon = \\ &= (52.2 \times 10^3) (0.199 \times 10^{-3}) = \\ &= 10.4 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (23)$$

That is, the compression of the pile shaft is close to the soil settlement along the lateral surface of the pile and the total settlement under proportionality limit load.

Vector check provides the ability to share the work of the pile base (heel) and the shaft (lateral surface) on the summary chart of the standard view $S=f(N)$ (Fig. 8). To do this, we built a continuation of the partially processed test graph for barrette-1 (Fig. 6) further achieved during the test load $N_k = 36,000$ kN. The methodology consists in checking the equality of the sum of the squares of the modules of the fractional vectors $(V_{l/q})^2$ and $(V_{b/q})^2$ to the square of the module $(V_{\Sigma/q})^2$ of the total load of the barrette: at the top – in the φ - N coordinates at the same angle φ , and at the bottom – in the S - N coordinates with correspondingly related settlements S .

In the second case, the vectors of the total load $V_{\Sigma/S}$ are drawn from the beginning of the pre-experimental load O' to the selected horizontal on the general graph. Shared load vectors $V_{l/S}$ and $V_{b/S}$ of frontal (N_l) and lateral (N_b) loads correspondingly at the bottom are drawn from the analogous beginnings of each of the share graphs in the S - N coordinates to the corresponding contour lines of the settlement S of the total load graph.

The exceptions are the equalities in the S - N coordinates below the point f . Here (due to the graphical difference between the upper and lower vertical coordinate axes), when checking the required equalities, the modulus of the side surface load vector remains constant ($V_{b/f}$) with increasing settlement after stall, and the moduli of the vectors V_l and V_s retain regular variability. 

Conclusions ▶

1. The design of heavily loaded deep-laid piles should, in the course of engineering and geological surveys, include field testing of foundation soils with full-scale piles of the design and technology proposed in the project.
2. Field tests of such piles should be preceded by the calculation of a bench scheme that is close to the conditions for the subsequent operation of the pile in the foundation.
3. The distance in axes between the tested pile of increased length as a single one in a pile group, barrette piles and anchor piles of the thrust system is recommended not less than 0.1 of the immersion depth of the shaft.
4. Settlement-load (S - N) curves of static testing of soils with piles is preferably brought to loads exceeding at least two steps the approximate limit of proportionality of the load curve.
5. The resulting standard-type graph $S = f(N)$ is expedient to process statistically, for example, using the graphical-analytical method described above, which makes it possible to separate the pile test in the soil by the phases of the foundation soil operation and predict the “failure” of the pile.
6. Methods of angular approximation make it possible to graphically highlight the partial loads of the pile base and the lateral surface of the shaft in the form of S - N graphs, determine the pre-experimental load and start the inclusion of partial loads in the work.
7. Verification of the “continued” load standard form of the S - N graph is performed using a linearized φ - N graph controlled by determining the equality of the sum of the squares of the modules of the share load vectors to the square of the total load vector at the selected characteristic levels of ordinates along S and φ in the S - N and φ - N coordinates.
8. The base pile loads determined by the check are converted into soil resistivity along the pile base (heel) and shaft (side surface), allowing more reasonable use of the data obtained for designing piles of other parameters, structures and technologies than provided by the generalized standards.

References ▶

1. Van Impe F. Fundamenty glubokogo zalozeniya, tendentsii i perspektivy razvitiya [Deep foundations, trends and development prospects]. Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo. 2005. 9: 7–33 (in Rus.).

2. Petruhin V.P., Kolybin I.V., Shulyat'yev O.A. Mirovoy opyt ustroystva fundamentov neboskrebov i vysotnykh sooruzheniy [World experience in the construction of foundations of skyscrapers and high-rise structures]. Rossiiskaya arkhitekturno-stroitel'naya ehntsiklopediya. OOO «VNIINTPI», Moskva, 2010. 13: 288–327 (in Rus.).
3. Petruhin V.P., Shulyat'yev O.A., Mozgacheva O.A. Novye sposoby geotekhnicheskogo proyektirovaniya i stroitel'stva [New ways of geotechnical design and construction]. ASV, Moskva, 2019 (in Rus.).
4. Mangushev R.A., Gotman A.L., Znamenskiy V.V., Ponomarev A.B. Svai i svaynye fundamenty. Konstruktsii, proyektirovaniye i tehnologii [Piles and pile foundations. Constructions, design and technologies]. ASV, Moskva, 2015 (in Rus.).
5. Baholdin B.V. Plitno-svainye fundamenty. Proyektirovaniye i osobennosti tehnologii vozvedeniya [Slab-pile foundations. Design and features of the construction technology]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2003. 5: 24–272 (in Rus.).
6. Bezvoley S.G. Metodika rascheta kombinirovannykh plitno-svainykh i svayno-plitnykh fundamentov [A technique of the calculation of combined slab-pile and pile-slab foundations]. Trudy NIIOSP. 2008. 99: 26–52 (in Rus.).
7. Znamenskiy V.V., Baholdin B.V., Parfenov E.A., Musatova M.V. Issledovaniye nesushchey sposobnosti barett dlya 56-ehnazhno go zhidogo zdaniya [A study of barrett load-bearing capacities for 56-storey residential building]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2019. 1: 2–6 (in Rus.).
8. Kolodiy E.V. Sravnitel'nyi analiz sovremennykh metodov otsenki nesushchey sposobnosti svay (na primere svay-barett v inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh Sankt-Peterburga). Sbornik trudov nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Aktual'nye voprosy geotekhniki pri reshenii slozhnykh zadach novogo stroitel'stva i rekonstruktsii». Sankt-Peterburg, 2010, 87–95 (in Rus.).
9. Schmertmann J.H., Hayes J.A., Molnit T., Osterberg J.O. O-cell testing case histories demonstrate the importance of bored pile (drilled shaft) construction technique. Proceedings of the 4th International Conference on case histories in geotechnical engineering, USA, MO, St. Louis, 1998, 1103–1115.
10. Leonards Dzh.A., Chellis R.D. Osnovaniya i fundamenty. Glava 3. Svainye fundamenty [Foundation Engineering. Chapter 3. Pile foundations]. Stroyizdat, Moskva, 1968, 332–338 (in Rus.).
11. Ladyzhenskiy I.G., Sergeyenko A.V. Opyt proyektirovaniya svaynykh i svayno-plitnykh fundamentov na uchastke 16 MMTsD «Moskva-Siti» [Experience in designing pile and pile-slab foundations at site 16 of the Moscow International Business Center “Moscow-City”]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2016. 10: 46–54 (in Rus.).
12. Gol'dfel'd I.Z., Mindich A.L. Obrabotka rezul'tatov staticheskikh ispytaniy fundamentov [Processing of the results of static tests of foundations]. Arkhitektura i stroitel'nye konstruktsii promyshlennykh zdaniy: sbornik. Izd-vo UralPromstroINIIproekta, Sverdlovsk, 1971, 61–65 (in Rus.).
13. Gol'dfel'd I.Z. Sposob postroeniya grafika $S = f(p)$ vo vsem diapazone nagruzok vplot' do kriticheskoy [The method of plotting $S = f(p)$ over the entire load range up to the critical one]. Inzhenerno-stroitel'nye izyskaniya: sbornik statey. 1972. 2 (27): 44–50 (in Rus.).
14. Gol'dfel'd I.Z., Smirnova E.A. Grafoanaliticheskaya obrabotka rezul'tatov staticheskikh ispytaniy gruntov zabivnymi svayami i zondirovaniyem [Graph-analytical processing of the results of static tests of soils by driven piles and probing]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2011. 5: 35–40 (in Rus.).
15. Gol'dfel'd I.Z., Smirnova E.A. Application of sounding penetration test with the first type of penetrometers developed by “Fundament” to predicting pile load tests results. Proceedings of the International geotechnical Conference “Geotechnical challenges in megacities”. Moscow, 2010. 3: 1066–1072.
16. Baholdin B.V., Yastrebov P.I., Chashchihina L.P. Issledovaniye osobennostey soprotivleniya gruntov v osnovanii zabivnykh svay [A study of resistance features of foundation soils of driven piles]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2009. 2: 2–6 (in Rus.).
17. Chin F.K. Estimation of ultimate load of piles not carried to failure. Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, 1970, 81–92.
18. Narbut R.M. Rabota svay v glinistykh gruntah. Stroizdat, Leningrad, 1972. S. 118.

Information about the authors

IGOR' Z. GOL'DFEL'D

Scientific and technical consultant, International Association of Foundation Contractors (IAFC), PhD (Candidate of Science in Technics), Moscow, Russia

PETR I. YASTREBOV

Deputy head of the Laboratory of Pile Foundations, Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Research Center of Construction JSC, Moscow, Russia

EKATERINA S. DUBROVSKAYA

General director, International Association of Foundation Contractors (IAFC), Moscow, Russia