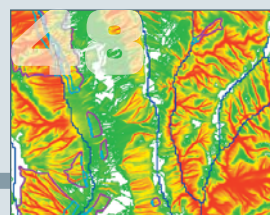


# Независимый электронный журнал ГеоИнфо

Влияние состава и концентрации растворов солей на фильтрационные особенности глинистых грунтов. Стр. 6

Проблемы прикладной инженерной геологии, связанные с несовершенством действующей нормативной документации. Предложения по решению. Стр. 20

Ранжирование итальянской железнодорожной сети по подверженности камнепадам и чувствительности к ним. Стр. 48



## GEOINFO

ISSN 2949-0677 (ONLINE)

[WWW.GEOINFO.RU](http://WWW.GEOINFO.RU)

ФЕВРАЛЬ • FEBRUARY • TOM VI • 1-2023

## 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



Геотехническая лаборатория  
АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ»



ГК «ОЛИМПРОЕКТ»

## СПОНСОРЫ ПРОЕКТА



ООО «МИДАС» / MIDAS IT



MalinSoft



ООО «ГЕОИНЖЕРВИС» / FUGRO

EngGeo

Обработка и хранение результатов  
инженерно-геологических  
изысканий

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «ENGGEO»

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ



Программный комплекс RosScience

ADVANCED SURVEY  
TECHNOLOGIES

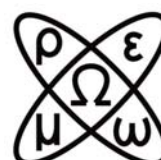
ООО «СОВРЕМЕННЫЕ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ» (ADVANCED SURVEY  
TECHNOLOGIES) – ОФИЦИАЛЬНЫЙ  
ПРЕДСТАВИТЕЛЬ ROSSCIENCE В РОССИИ



НПО «ТЕРРАЗОНД»



ООО «КОМПАНИЯ «КРЕДО-ДИАЛОГ»



ООО «КБ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ»

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ НЕЗАВИСИМОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЖУРНАЛА «ГЕОИНФО»

### **Ананко Виктор Николаевич**

Главный редактор журнала «ГеоИнфо»

### **Баборькин 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

### **Гизатуллин 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 геокриологии 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 Криосферы 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: 10 выпусков в год.

ISSN: 2949-0677

Префикс DOI: 10.58339

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

### Учредитель:

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

Распространяется бесплатно.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.

Дата выхода в свет: 28.02.2023 г.

© Ананко Виктор Николаевич, 2023

© ГеоИнфо, 2023

Фото на обложке: [www.Pixabay.com](http://www.Pixabay.com)

## ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

### Влияние состава и концентрации растворов солей на фильтрационные особенности глинистых грунтов

Королев В.А. Фазылов А.М.

6

### Проблемы несовершенства действующей нормативной документации в области инженерно-геологических изысканий.

#### Предложения по доработке

Якушев И.В., Сурина О.И.

20

## ГЕОРИСКИ. ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА ТЕРРИТОРИИ

### Об учете вторичной сейсмической опасности в нормативно-методических документах

Миронюк С.Г.

28

### Ранжирование итальянской железнодорожной сети по подверженности камнепадам и чувствительности к ним

Альвиоли М. и др.

48

## МЕХАНИКА ГРУНТОВ И ГЕОТЕХНИКА

### Анализ влияния строительства котлована на расположенный вблизи тоннель

Лю Чэнь Ян и др.

72

### «КРЕДО ГЕОТЕХНИКА» – новая программа геологической линейки «КРЕДО»

Коледа С.А.

82

## ПРИЛОЖЕНИЕ. ДИСКУССИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### ИВАН КОРОЛЁВ: Культура бережного природопользования формируется не за один год

86

### ОЛЕГ ОЗМИДОВ: Формула расчетного сопротивления грунта безнадежно устарела

90

### О текущей практике и новых задачах надзора в строительстве

Ферапонтов А.В.

94

#### 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**

**Influence of the composition and concentration of salt solutions on the seepage features of clay soils**

Vladimir A. Korolev, Airat M. Fazylov

**Imperfection problems of the current regulatory documentation in the field of engineering-geological surveys. Improvement suggestions**

Ivan V. Yakushev, Ol'ga I. Surina

**GEORISKS. ENGINEERING PROTECTION OF TERRITORIES**

**On the consideration of secondary seismic hazard in regulatory and methodological documents**

Sergey G. Mironyuk

**Rockfall susceptibility and network-ranked susceptibility along the Italian railway**

Massimiliano Alvioli etc.

**SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICS**

**Analysis on the influence of excavation of a close-range foundation pit on an existing tunnel**

Chen Yang Liu etc.

**“CREDO GEOTECHNICS” is a new program of the “CREDO” geological line**

Sergey A. Koleda

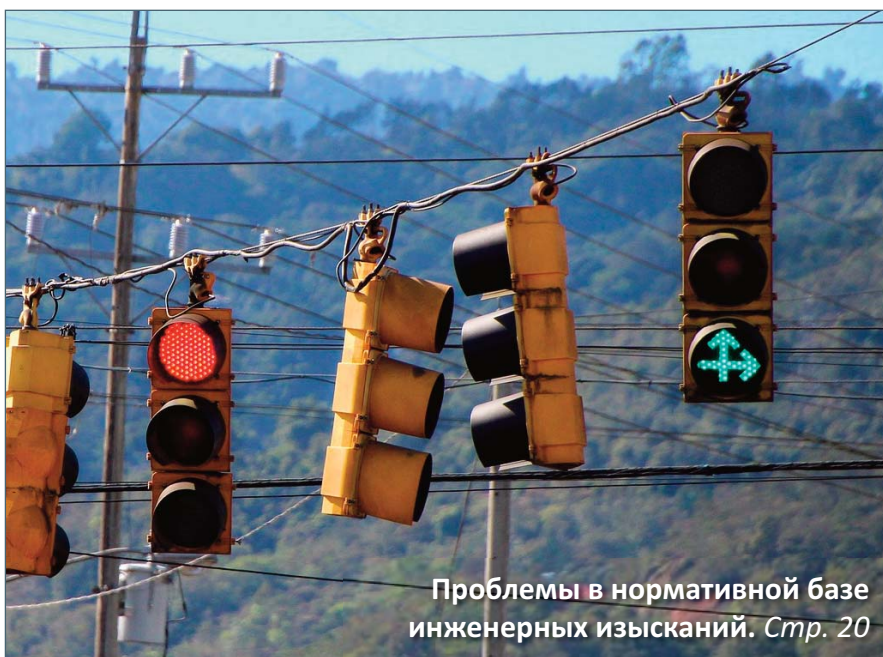
**APPENDIX. DISCUSSION MATERIALS**

**IVAN KOROLEV: The culture of cautious nature management is not formed in one year**

**OLEG OZMIDOV: The formula for the calculated soil resistance is hopelessly outdated**

**On the current practice and new tasks of the supervision in construction**

Aleksey V. Ferapontov



**GEOINFO**

6  
20  
28  
48  
72  
82  
86  
90  
94

Electronic publication

Published since 2016

Publication frequency:  
10 issues per year

ISSN: 2949-0677

DOI prefix: 10.58339

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

**Founder:**  
Ananko Viktor Nikolaevich

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

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

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

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](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: 28.02.2023

© Ananko Viktor Nikolaevich, 2023

© GeoInfo, 2023

Cover photo: www.Pixabay.com





# ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ НА ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Обзорная статья

Поступила в редакцию 01.02.2023. Принята к публикации 22.02.2023.

© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2023

## КОРОЛЁВ В.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, va-korolev@bk.ru  
Адрес: Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

## ФАЗЫЛОВ А.М.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия  
Адрес: Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

## АННОТАЦИЯ

Представлен аналитический обзор исследований по вопросам влияния состава и концентрации водных растворов различных солей на фильтрационные свойства глинистых грунтов. Показано, что в зависимости от минерального типа глин, минерализации и состава фильтрующихся водных растворов солей и поглощенных катионов коэффициенты проницаемости и фильтрации глин могут меняться в несколько раз или даже на несколько десятичных порядков, что необходимо учитывать при строительстве защитных дамб с глиняным ядром, шламонакопителей и хвостохранилищ.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

глинистый грунт; фильтрация; проницаемость; растворы солей; защитные дамбы.

## ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Королёв В.А., Фазылов А.М. Влияние состава и концентрации растворов солей на фильтрационные особенности глинистых грунтов // Геоинфо, 2023, № 1, С. 6–18 doi:10.58339/2949-0677-2023-5-1-6-18

# INFLUENCE OF THE COMPOSITION AND CONCENTRATION OF SALT SOLUTIONS ON THE SEEPAGE FEATURES OF CLAY SOILS

Review paper

Received 01.02.2023. Accepted 22.02.2023.

© Independent electronic journal "GeoInfo", 2023

## VLADIMIR A. KOROLEV

Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia, va-korolev@bk.ru  
Address: 1 Leninskiye Gory, Moscow,  
119991, Russia

## AIRAT M. FAZYLOV

Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia  
Address: 1 Leninskiye Gory, Moscow,  
119991, Russia

## ABSTRACT

An analytical review of studies on the influence of the composition and concentration of aqueous solutions of various salts on the seepage properties of clay soils is presented. It is shown that, depending on the mineral type of clays, mineralization and composition of filterable aqueous solutions of salts and absorbed cations, the permeability and filtration coefficients of clays can vary several times or even by several decimal orders, which must be taken into account when constructing protective dams with clay cores, sludge reservoirs, and tailing dumps.

## KEYWORDS:

clay soil; seepage; permeability; salt solutions; protection embankments.

## FOR CITATION:

Korolev V.A., Fazylov A.M. Vliyaniye sostava i kontsentratsii rastvorov soley na fil'tratsionniye osobennosti glinistykh gruntov [Influence of the composition and concentration of salt solutions on the seepage features of clay soils] // GeoInfo, 2023, № 1, S. 6–18 doi:10.58339/2949-0677-2023-5-1-6-18 (in Rus.).

## Введение ▶

Изучение факторов, влияющих на проницаемость глинистых грунтов, является не до конца изученной проблемой, хотя первые исследования в этой области выполнялись еще в 20–50-е годы прошлого столетия в связи с созданием глинистых экранов в противофильтрационном отношении, строительством каналов, водохранилищ и других гидротехнических сооружений, модификацией фильтрационных свойств глинистых грунтов методами технической мелиорации и др. [1, 2], а также в связи с мелиорацией почв, благодаря работам Б.Б. Польшова, В.А. Ковды, И.А. Антипова-Каратаева, П.И. Шаврыгина [3, 4]. В частности, слабо изучено влияние состава и концентрации фильтрующихся растворов, а большинство работ в этой области выполнено для воды и слабоминерализованных водных растворов солей, тогда как на практике в шламонакопителях и хвостохранилищах концентрация солевых растворов может достигать 200–250 г/л и более. Установление закономерностей влияния состава и концентрации фильтрующихся растворов солей на проницаемость глинистых грунтов позволит более качественно выявлять и решать такие проблемы с минимальными денежными затратами, а также даст



Рис. 1. Возведение земляной защитной дамбы

возможность оценить экологические риски загрязнения массива пород при захоронении сточных вод, служащих поровым раствором и взаимодействующих с водоносными и водоупорными горизонтами.

Глинистые защитные экраны, грунтовые дамбы из глинистых грунтов, широко применяемые в качестве защитных противофильтрационных сооруже-

ний по всему миру ввиду простоты и скорости возведения, дешевизны и удобства в эксплуатации, должны быть водонепроницаемыми по отношению к солевому раствору (рис. 1). Со временем глинистый защитный экран или водонепроницаемая часть дамбы (глиняное ядро, экран и диафрагма) под воздействием фильтрующихся растворов может потерять свои исходные свойства

и стать проницаемой. Это ведет к огромным техническим, инженерно-геологическим, гидрогеологическим и экологическим проблемам. Чтобы прогнозировать подобные изменения и своевременно регулировать коэффициент фильтрации глинистых грунтов, используемых в качестве ядра или противофильтрационного экрана дамбы, необходимо изучать влияние состава и концентрации фильтрующегося раствора на их проницаемость.

Глинистые грунты экранов и защитных дамб подвергаются воздействию растворов солей различной концентрации. Следовательно, при попытке определить фильтрационные свойства глинистых грунтов использование дистиллированной или водопроводной воды далеко не репрезентативно для реальных условий. Хорошо известно, что механическое и гидравлическое поведение глинистых грунтов может сильно зависеть от взаимодействия системы «грунт – раствор» [5].

Кроме того, знание влияния состава солевого раствора, сдерживаемого глинистым экраном, завесой, дамбой, позволит более грамотно определить тип глинистого грунта, необходимого для его использования в качестве непроницаемой части сооружения, а также даст возможность прогнозировать дальнейшее поведение глинистого грунта при длительной эксплуатации дамб и целенаправленно регулировать коэффициент фильтрации грунта с помощью добавления химических растворов определенных концентраций. Анализ этой проблемы весьма актуален и для решения различных экологических задач, связанных с фильтрацией сквозь глинистые грунты токсичных водных растворов солей разной концентрации и состава. Влияние растворов кислот и щелочей здесь не рассматривается, так как является предметом отдельных исследований.

В связи с этим целью настоящей работы является аналитический обзор исследований в этой области для обобщения имеющейся информации по влиянию водных растворов солей разной концентрации и состава на фильтрационные особенности глинистых грунтов.

### **Влияние концентрации водных растворов солей** ▶

Имеется большое количество публикаций по экспериментальным работам, посвященным влиянию различных химических растворов на коэффициент фильтрации глинистых грунтов. Изуче-

нием влияния концентрации водных растворов солей на фильтрационные особенности различных глинистых грунтов занимались многие исследователи, в том числе Н.Ф. Бондаренко, Ф.М. Бочевер, И.А. Брилинг [6], Н.Н. Веригин, В.М. Гольдберг, Р.Э. Дашко [7], В.Н. Жиленков [8], Р.И. Злочевская, В.А. Королев, Л.И. Кульчицкий, Н.Н. Маслов, В.А. Мироненко [9], А.М. Монюшко, С.С. Морозов [2, 10, 11], В.М. Павилонский [12, 13], С.И. Пахомов, Б.Ф. Рельтов, А.А. Рошаль, Н.П. Скворцов [14, 15], М.М. Филатов [1], П.И. Шаврыгин [3, 4], В.М. Шестаков и многие другие.

Одной из основных особенностей водных растворов солей является то, что в отличие от растворов таких электролитов, как кислоты и щелочи, большинство солевых растворов имеет нейтральную или близкую к ней реакцию среды (рН около 6,0–6,5). Поэтому вследствие ионного обмена они могут вызывать только изменение толщины двойного электрического слоя (ДЭС) вокруг частиц, тогда как растворы кислот и щелочей могут вызывать еще и перезарядку ДЭС – смену его знака. Все это сказывается на особенностях коагуляции частиц глинистых грунтов и изменении их микростроения, вследствие которого изменяются и их фильтрационные свойства.

Проницаемость глинистых грунтов меняется с течением времени. Это связано с особенностью глинистых минералов разбухать и закупоривать поровое пространство при взаимодействии с пресной водой. При фильтрации же через глинистые породы минерализованных вод это явление развито в значительно меньшей степени. Более того, в результате процессов кристаллизации солей из минерализованных вод нередко происходит рост активной пористости грунтов, а следовательно, улучшение их фильтрационных свойств [16].

Концентрации раствора в глинистых грунтах по сечению тонких пор, особенно в случае взаимного перекрытия диффузных слоев, распределяются неравномерно. Концентрация раствора в порах ( $C_1$ ) не равна концентрации объемного раствора ( $C_0$ ). Направление возникающего вследствие этого капиллярно-осмотического потока зависит от величины соотношения  $C_1/C_0 < 1$ , что наиболее характерно для глинистых грунтов в сторону большей концентрации. Если тонкие поры в глинистых грунтах недоступны для молекул растворенного вещества (идеальная полупроницаемая

мембрана), то есть при  $C_1=0$ , то перенос воды осуществляется только за счет перепада осмотического давления по обе стороны глинистой мембраны в сторону раствора с большей концентрацией [17].

Имеется множество публикаций по экспериментальным работам, посвященным влиянию различных химических растворов на коэффициент фильтрации глинистых грунтов. Некоторые из этих исследований сосредоточены на водных растворах солей [12, 18–26 и др.]. При этом большинство исследователей указывают на то, что коэффициент фильтрации глинистых грунтов увеличивается с ростом концентрации водных растворов солей.

Влияние состава и концентрации водного порового раствора солей на проницаемость грунтов проявляется через изменение вязкости и структуры поровой жидкости, а также через изменение агрегатного состава грунта. Повышение концентрации раствора ведет к подавлению диффузной части ДЭС вокруг частиц и увеличению степени агрегированности частиц, что влечет за собой увеличение размера межагрегатных пор, а следовательно – к росту коэффициента фильтрации.

Изменение агрегатного состояния глинистого грунта влияет на его фильтрационную способность. Общий характер изменения коэффициентов фильтрации ( $K_f$ ) в зависимости от засоления при учете только степени агрегированности грунта, которое приводит к преобразованию геометрии одного порового пространства, показан на рисунке 2. В более легких глинистых разностях при засолении порядка 1% наблюдается снижение коэффициентов фильтрации за счет диспергации породы (см. рис. 1, минимум на кривой I). Дальнейшее засоление приводит к увеличению коэффициента фильтрации. Рост содержания глинистой фракции ( $M_c$ ) вызывает менее заметное влияние диспергации на изменение коэффициента фильтрации (см. рис. 2, кривая II). При высоком содержании глинистых частиц ( $M_c > 50\%$ ) идет постепенное возрастание коэффициента фильтрации породы по мере ее засоления, причем гораздо менее интенсивное, чем для легких разностей (см. рис. 2, кривая III). Эти явления объясняются тем, что агрегация в высокодисперсных грунтах незначительно влияет на увеличение размера пор, поскольку укрупнение начинается с самых тонких коллоидных фракций и постепенно распространяется на более крупные.



Засоление литифицированных глинистых грунтов приводит к росту их микро- и макротрещиноватости, что в большой мере влияет на изменение коэффициента фильтрации грунтов. Общий характер изменения коэффициента фильтрации во времени для литифицированных глинистых грунтов (например, кембрийских глин), обладающих трещиноватостью, при различных концентрациях фильтрующихся растворов приведен на рисунке 3.

На изменение фильтрационных свойств глинистых грунтов при их взаимодействии с водными растворами солей разной концентрации также оказывают большое влияние и диффузионно-осмотические процессы. При этом важно учитывать соотношение концентрации внешнего (фильтрующегося) раствора соли ( $C_{\phi}$ ) и концентрации внутрипорового раствора грунта ( $C_{п}$ ) вследствие возможного проявления концентрационной усадки, под которой понимается уменьшение объема грунта за счет осмотического оттока из него порового раствора при условии, что  $C_{\phi} > C_{п}$ . При этом уменьшается коэффициент фильтрации.

Для учета этого фактора важно знать «порог осмотической усадки» ( $C_{пoy}$ ) изучаемого грунта (по [7]) – концентрацию порового раствора грунта, при которой концентрационной усадки не происходит. Если концентрация внешнего фильтрующегося раствора ( $C_{\phi}$ ) больше порога осмотической усадки ( $C_{пoy}$ ), то происходит снижение степени раскрытия микротрещин и коэффициент фильтрации со временем постепенно уменьшается (см. рис. 3, кривая 1). При  $C_{\phi} = C_{пoy}$  наблюдается неизменность либо постепенное закрытие трещин в процессе набухания блоков глинистых пород (см. рис. 3, кривая 2). Если же  $C_{\phi} \leq C_{пoy}$ , то происходит увеличение степени раскрытия микротрещин и осмотический подток раствора внутрь образца, что приводит к набуханию грунта и увеличению коэффициента фильтрации (см. рис. 3, кривая 3).

Согласно исследованиям Р.Э. Дашко [7], в процессе осмоса за счет концентрационной усадки отмечается постепенное уменьшение влажности глинистых грунтов различного гранулометрического состава (рис. 4). Исследования были проведены в широком диапазоне изменений концентраций раствора NaCl – 5; 50; 100; 200; 300 г/л в интервале влажностей глинистых грунтов от предела пластичности  $W_p$  до предела текучести  $W_L$ . Из анализа результатов

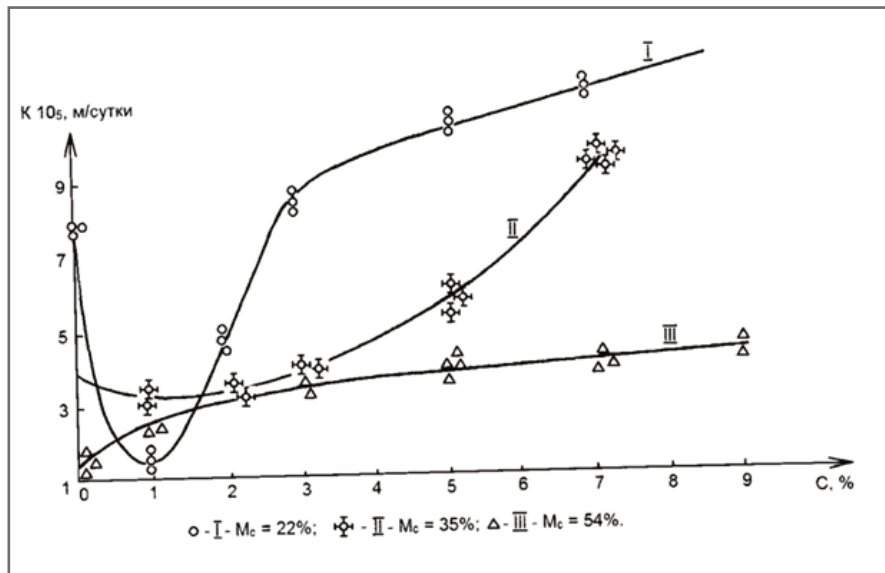


Рис.2 Изменение коэффициента фильтрации ( $K_{\phi}$ ) глинистых пород в зависимости от величины засоления ( $C$ ) [7]

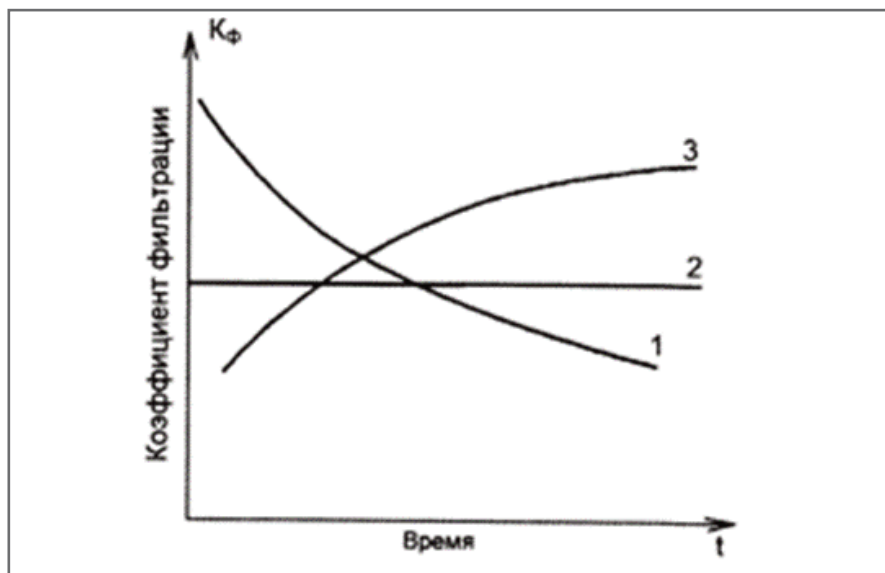


Рис.3. Общий характер изменений коэффициента фильтрации трещиноватых глинистых пород во времени в зависимости от концентрации и состава фильтрующихся растворов [7]. Графики: 1 – фильтрация воды и электролитов при  $C_{\phi} < C_{пoy}$ ; 2 – фильтрация растворов при  $C_{\phi} = C_{пoy}$ ; 3 – фильтрация при  $C_{\phi} > C_{пoy}$

этих экспериментов следует, что интенсивное развитие осмотических процессов, приводящих к потере влаги, наблюдается при влажности грунтов выше  $1,2W_p$ , и по мере увеличения влажности потеря воды из грунта возрастает. Соответственно, в зависимости от влагосодержания грунта изменяется и концентрация растворов, выше которой имеет место осмотическое обезвоживание глинистого грунта. Все это сказывается и на фильтрационных особенностях глинистых грунтов.

В целом, зависимость коэффициента фильтрации высокодисперсных глин от концентрации электролита порового пространства в широком диапазоне

концентраций носит сложный характер (рис. 5). В области малых концентраций (менее 10% NaCl) их рост приводит к увеличению  $K_{\phi}$  за счет агрегации частиц и увеличения размера межагрегатных пор. Однако дальнейший рост концентрации приводит к снижению  $K_{\phi}$  вследствие того, что при высоких концентрациях порового раствора начинает сказываться влияние его повышенной вязкости, рост которой и ведет к снижению  $K_{\phi}$ , что и наблюдается в экспериментах [27].

Интересно также исследование М.А. Сунцова [18], являющееся, по-видимому, одной из первых гидрогеологических работ по вопросу влияния

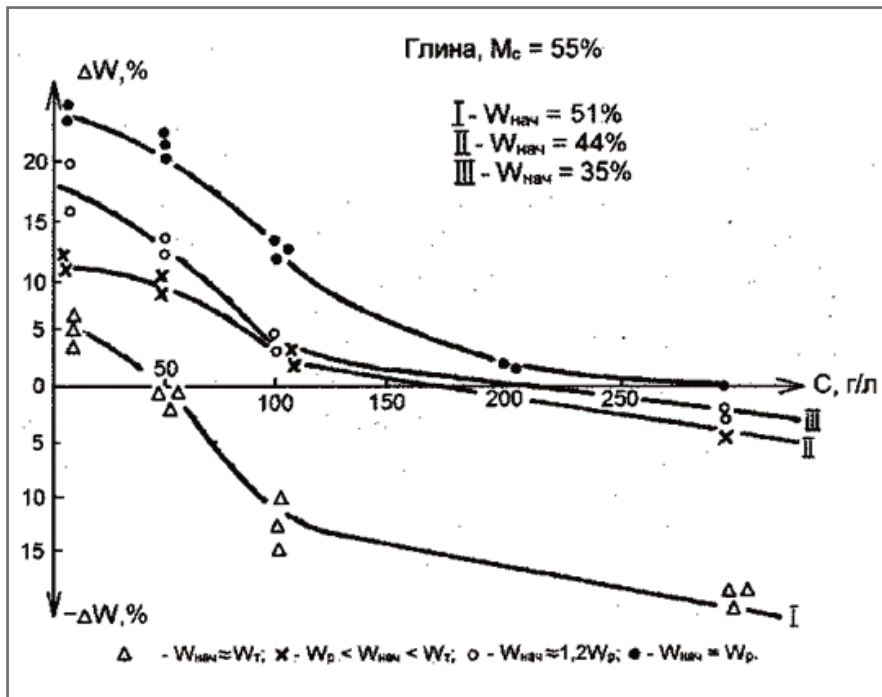


Рис. 4. Изменение влажности ( $\Delta W$ ) глинистых грунтов за счет осмоса при взаимодействии их с растворами разной концентрации ( $C$ ) (по [7])

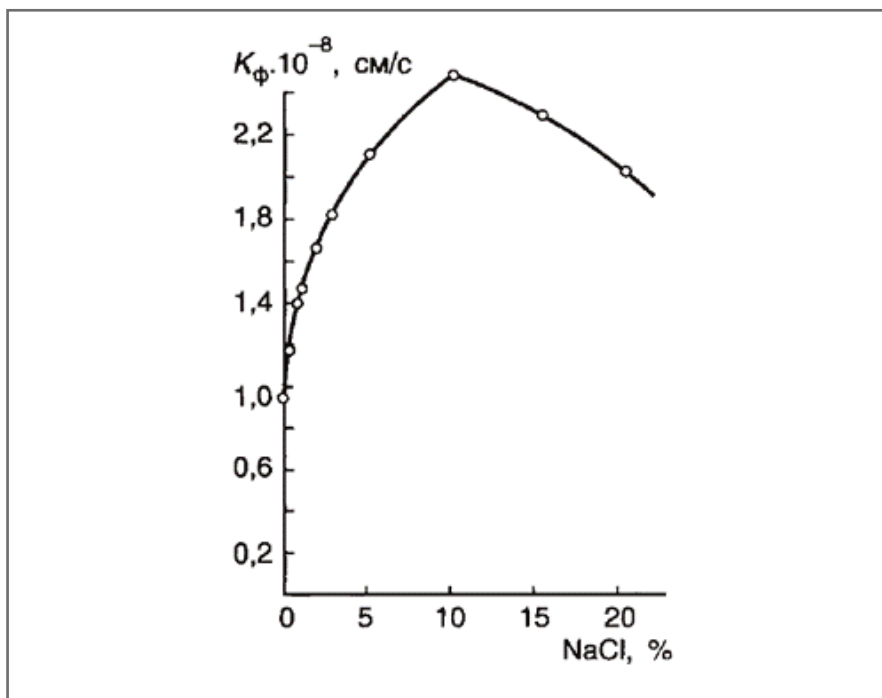


Рис. 5. Зависимость коэффициента фильтрации монтмориллонитовой глины от концентрации NaCl (по Б.В. Дерягину) [27]

подземных вод разной минерализации на проницаемость глинистых грунтов. Эксперименты проводились на образцах четвертичного суглинка, отобранного с глубин 2,0–2,5 м. В качестве фильтрующей жидкости использовались аналог поровой раствора с минерализацией 35 г/л, восьмикратно разбавленный поровый раствор и дистил-

лированная вода. Данные фильтрационных испытаний показали последовательное снижение проницаемости суглинков при переходе от раствора с минерализацией 35 г/л к его разбавленному варианту и дистиллированной воде.

Вопросу влияния фильтрующей жидкости на уплотненные глинистые грунты, используемые в качестве экра-

нов в накопителях сточных вод для снижения фильтрационных потерь, были посвящены экспериментальные исследования В.М. Павилонского [12, 13]. Экспериментально было установлено, что при фильтрации стоков, содержащих хлоридные и сульфатные соли кальция и натрия, проницаемость глин возрастает на 1–2 порядка по отношению к пресной воде (рис. 6). При этом длительная фильтрация растворов солей приводила к некоторому снижению коэффициентов фильтрации за счет структурной перестройки грунтов [12].

Р. Петров и Р. Роу [23] показали, что коэффициент фильтрации бентонита увеличивается с  $10^{-11}$  до  $10^{-8}$  м/с при росте концентрации NaCl от 0 до 2 н.

Д. Ачари и др. [28] подтвердили, что концентрация ионов в фильтрующейся жидкости влияет на коэффициент фильтрации глин. Концентрация ионов в растворе влияет на объем воды, адсорбированной на частицах глины. Коэффициент фильтрации глины увеличивается, когда проникает фильтрат с высокой концентрацией ионов, из-за увеличения ассоциаций микроагрегатов частиц типа «скол-скол», что приводит к коагуляции и росту размера пор.

Й. Джо и др. [25] экспериментально исследовали коэффициент фильтрации Са-бентонита в диапазоне плотностей его скелета от 1,0 до 1,8 г/см<sup>3</sup>. Их результаты показывают, что коэффициент фильтрации увеличивается с ростом концентрации только тогда, когда плотность бентонита является относительно низкой. Для бентонитов с плотностями 1,0 и 1,2 г/см<sup>3</sup> коэффициенты фильтрации при фильтрации 0,4 н раствора NaCl увеличиваются больше тех, которые получаются в случае дистиллированной воды (в 7 и 3 раза соответственно). Однако для бентонита с плотностью скелета выше 1,4 г/см<sup>3</sup> концентрация раствора оказывает незначительное влияние на коэффициент фильтрации и последний почти постоянен в диапазоне концентраций NaCl от 0 до 0,4 н.

Такое поведение глинистых грунтов, возможно, объясняется следующим образом. При фильтрации растворов через бентонит концентрация катионов в поровой воде увеличивается, и это вызывает сжатие диффузного слоя. Сокращение толщины двойного электрического слоя может привести к изменению отталкивающих сил между глинистыми частицами. Если отдельные частицы глин смогут свободно перемещаться, то могут произойти изменения микро-

структуры из-за открытия микропор, что приведет к увеличению коэффициента фильтрации.

Кроме того, при фильтрации концентрированного раствора в глине может происходить концентрационная усадка из-за осмотического эффекта, рассмотренного выше. –

Наряду с рассмотренными выше факторами, объясняющими изменение коэффициента фильтрации глинистых грунтов при взаимодействии с растворами солей за счет изменения параметров ДЭС, необходимо учитывать и влияние концентрации солей порового раствора на начальный градиент фильтрации глинистых грунтов. Известно, что начальный градиент фильтрации, проявляющийся в глинистых грунтах, обусловлен аномальными структурными особенностями граничных слоев связанной воды вблизи твердой минеральной поверхности грунта. Вследствие этого граничные слои обладают повышенными вязкостью и предельным напряжением сдвига. Поэтому чем больше объемная доля таких слоев в объеме порового пространства глины, тем больше начальный градиент фильтрации, и наоборот.

Соли, растворенные в поровом растворе грунта, влияют на структурные особенности граничных слоев воды, поскольку разные катионы и анионы могут оказывать как упорядочивающее, так и разупорядочивающее влияние на их структуру. Аналогичное воздействие оказывают и катионы обменного комплекса глин. Для анализа этого явления необходимо учитывать ионы как положительной, так и отрицательной гидратации. К сожалению, исследований влияния солей на начальный градиент фильтрации пока проведено недостаточно.

### Влияние состава водных растворов солей ▶

Исследованием влияния состава водных растворов солей на фильтрационные особенности глинистых грунтов занимались многие ученые, в том числе Г.М. Березкина [19], И.А. Брилинг [6], В.М. Гольдберг [29], Р.Э. Дашко [7], С.С. Морозов [2, 10, 11], Е.Ф. Мосьяков [30], В.М. Павилонский, Е.М. Сергеев, Н.П. Скворцов, П.И. Шаврыгин и многие другие.

Работами С.С. Морозова [2] на примере солей нитратов натрия, стронция и алюминия в ходе опытов по фильтрации, по-видимому, впервые была обнаружена замена катионов обменного комплекса на соответствующий фильт-

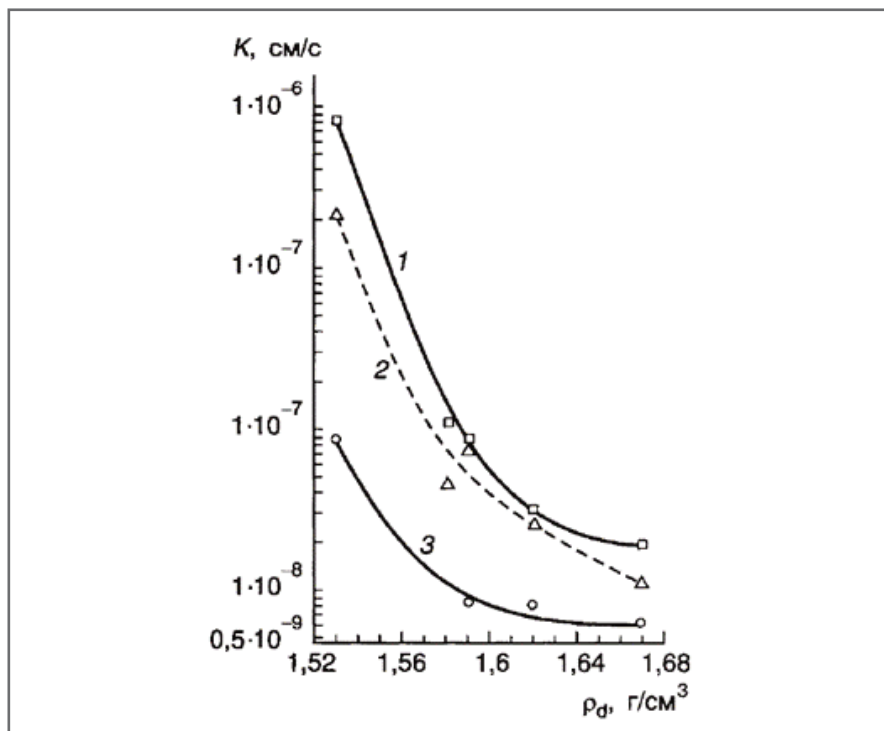


Рис. 6. Зависимость коэффициентов фильтрации раствора соли (кривые 1 и 2 соответственно для максимальных значений и минимальных при длительной фильтрации) и воды (кривая 3) от плотности скелета суглинка (по [12])

рующий катион, что сказывалось на водопроницаемости глин.

Было установлено, что состав обменных катионов глинистых грунтов, а также почв, заторфованных грунтов, илов и других высокодисперсных грунтов существенно отражается на их фильтрационных свойствах прежде всего за счет изменения их агрегатного состояния. Каждый прывносимый в грунт ион  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  в зависимости от его содержания следует рассматривать либо как диспергатор, либо как коагулянт. Соли одновалентных ионов при их содержании в количестве 1–2% действуют в основном как диспергаторы, а при дальнейшем повышении их содержания оказывают коагулирующее действие. Соли двухвалентных ионов при содержании более 0,5–0,6% и трехвалентных при содержании более 0,06–0,08% способствуют агрегации тонких фракций в породе [7].

Влияние обменных катионов на фильтрационные свойства глин рассматривалось Е.Ф. Мосьяковым [21]. Исследовались глины монтмориллонит-каолинитового состава, насыщенные одно-, двух- и трехвалентными катионами. Автор, отмечая влияние валентности катионов и энергии их активации на уплотненность (пористость) глинистых паст, установил зависимость между коэффициентом фильтрации  $K_f$  и пористостью  $n$ :  $K_f = an^b$ , где  $a, b$  – эмпири-

ческие коэффициенты. При этом независимо от  $n$  коэффициент фильтрации уменьшался в следующем ряду:  $\text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+} < \text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{K}^+ < \text{Ca}^{2+}$ . Подобная зависимость обусловлена неоднородностью результирующего влияния факторов: размера ионов, их валентности, химической активности.

Е.Ф. Мосьяков и Ю.Б. Мерков [30] изучали структурные и фильтрационные изменения глинистых грунтов в шламонакопителях. Так, при многолетних сроках эксплуатации в глинистых экранах происходят структурные изменения за счет роста кристаллов солей на поверхности глинистых частиц и в поровом пространстве. А это, в свою очередь, приводит к изменению фильтрационных свойств глинистого экрана. Установлено, что количественное содержание водорастворимых солей в глинистом экране и подстилающих четвертичных грунтах имеет тесную корреляционную связь с коэффициентами пористости. Изменение пористости глинистого экрана и подстилающих суглинков [30] связано с процессами кристаллизации солей.

Рост кристаллов солей, находящихся в ограниченном поровом пространстве, создает значительное кристаллизационное давление, которое раздвигает минеральную скелетную часть грунта, увеличивая его пористость. В поровом пространстве образуются кристаллы

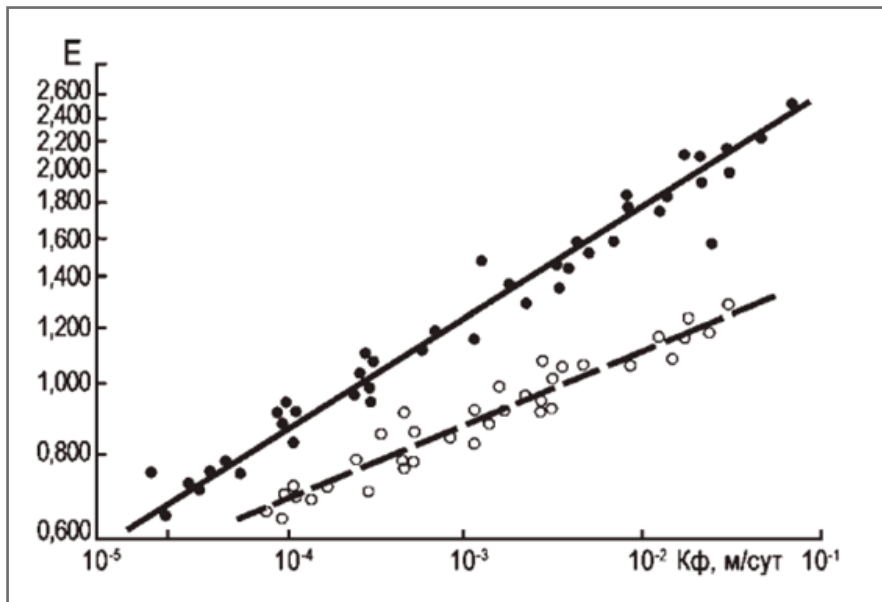


Рис. 7. Зависимость между коэффициентом пористости ( $e$ ) и коэффициентом фильтрации ( $K_f$ ) глинистого экрана (черные кружки) и четвертичных грунтов (белые кружки) (по [30])

CaCl<sub>2</sub> и NaCl. С увеличением пористости сильно возрастает коэффициент фильтрации глинистых пород (рис. 7).

Г.М. Березкиной [19] проводились исследования влияния обменных катионов на абсолютную величину коэффициента проницаемости ( $K_n$ ) каолиновых и монтмориллонитовых глин. Как показали исследования, проницаемость этих глин, содержащих ионы Na<sup>+</sup>, на порядок ниже, чем у глин, в поглощенном комплексе которых содержится Ca<sup>2+</sup>.

Кроме того, Г.М. Березкина изучала изменения проницаемости во времени в связи с оценкой влияния структурно-текстурных показателей глины на ее фильтрационные свойства. Было отмечено, что при длительных фильтрационных испытаниях проницаемость глинистых пород может значительно уменьшиться. Однако сколько-нибудь значительных изменений в структуре и текстуре глин под влиянием временного фактора не наблюдалось.

Исследованиям изменений водопроницаемости глин во времени при фильтрации водных растворов солей также посвящены работы А.Г. Баламирзоева и др. [31]. Установлено, что фильтрация может существенно меняться во времени в связи с растворением и выщелачиванием солей из глинистого грунта. Ими были определены изменения концентрации раствора во времени на нижней границе промываемой толщи грунта и получены формулы, воспользовавшись которыми можно квалифицировать коэффициенты конвективной диффузии и растворения со-

лей при одномерной фильтрации воды в грунтах конечной толщины.

А.М. Монюшко и С.П. Пахомов [32] также определили, что интенсивность воздействия нейтральных солевых растворов определяется степенью отличия их состава от состава порового раствора глинистой породы. При этом основная роль здесь принадлежит катионам. Различаются два случая: изменение состава порового раствора приводит к набуханию или усадке грунта. Первый случай наблюдается при существенно натриевом составе воздействующего раствора, если его минерализация ниже концентрации натрия в поровом растворе. При длительном воздействии содержание натрия в поровом растворе приближается к его концентрации в фильтрующей через породу жидкости.

Если воздействующий раствор по сравнению с поровым обогащен двухвалентными катионами, то последние вытесняют натрий из поглощенного комплекса глинистых минералов. Сжатие диффузных оболочек глинистых частиц приводит к уплотнению скелета и образованию макропористости, расслаивания и других видов дезинтеграции. Наблюдается усадка и значительное повышение проницаемости глинистой породы. Аналогичный эффект возникает при действии на глинистый грунт натриевых растворов высокой концентрации. В этом случае повышение содержания натрия в поровом растворе приводит к понижению степени диссоциации натриевых форм глинистых мине-

ралов, что является причиной сжатия диффузных оболочек.

Растворы калиевых солей при малых концентрациях близки по характеру к растворам натриевых солей. Но при более высоких концентрациях в экспериментах с некоторыми монтмориллонитовыми глинами наблюдалась необратимая фиксация ионов калия, приводящая к гидрослюдизации глинистых минералов.

В.М. Гольдберг и Н.П. Скворцов [29] изучали влияние хлоридных, сульфатных и нитратных растворов на проницаемость глин. В результате исследований оказалось, что по степени влияния на интенсивность роста коэффициента проницаемости ( $k_n$ ), рассматриваемые хлоридные соли располагаются в следующем ряду: FeCl<sub>3</sub> > CaCl<sub>2</sub> > KCl > NaCl. Принимая во внимание одинаковый анионный состав растворов данных солей, катионные составляющие этого ряда можно записать в следующей последовательности: Fe<sup>3+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> > Na<sup>+</sup>.

С увеличением минерализации растворов NaCl и CaCl<sub>2</sub> коэффициент проницаемости ( $k_n$ ) глин возрастает (рис. 8). Основной прирост значений  $k_n$  наблюдается в области концентраций до 10–30 г/л. Так, при переходе от дистиллированной воды к хлоридным растворам с концентрацией 10 г/л проницаемость в зависимости от типа глины и раствора возрастает в 1,5–6,3 раза, а с увеличением концентрации от 10 до 55–60 г/л – в 1,3–2,3 раза. При увеличении же концентрации раствора от 55–60 до 100–115 г/л коэффициент проницаемости практически не меняется.

Наибольший рост проницаемости отмечается в Na-монтмориллонитовых глинах: при переходе от дистиллированной воды к раствору CaCl<sub>2</sub> с концентрацией 55 г/л величина  $k_n$  увеличилась в 13 раз, а при переходе от дистиллированной воды к раствору NaCl с той же концентрацией – в 4,2 раза. В Ca-монтмориллоните при тех же условиях проницаемость в случае раствора NaCl выросла в 2 раза; в случае CaCl<sub>2</sub> – в 2,7 раза.

На рисунке 8, б показано влияние минерализации на проницаемость естественной каолиновой глины. Результаты этих экспериментов также свидетельствуют о том, что с ростом минерализации хлоридных растворов проницаемость каолинита возрастает. В диапазоне минерализации от 0 до 150 г/л величина  $k_n$  увеличивается примерно в 2,5 раза при фильтрации раствора NaCl, в 1,34–2,3 раза – при фильтрации

раствора  $\text{CaCl}_2$ . Наиболее значительные изменения коэффициента проницаемости отмечаются в диапазоне минерализации от 0 до 10 г/л. Так, уже при минерализации 3 г/л значение  $k_n$  увеличилось почти в 1,5 раза. В области концентраций от 10–30 до 150 г/л изменение проницаемости менее значительно.

При фильтрации сульфатных растворов максимальный эффект увеличения проницаемости отмечается для растворов  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . Прирост проницаемости по сравнению с дистиллированной водой для  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{K}_2\text{SO}_4$  соответственно составил 2,76 и 3,08. Исследования показали, что при фильтрации растворов двухвалентных металлов эффект изменения проницаемости оказался минимальным:  $k_n$  возрастает лишь в 1,38 и 1,62 раза, то есть гораздо меньше, чем в случаях растворов одновалентных металлов, что соответствует изменению проницаемости при фильтрации хлоридных растворов ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ). При сравнительном анализе результатов выявлен неодинаковый масштаб увеличения  $k_n$  для хлоридных и сульфатных растворов с одинаковым катионным составом. Так, при фильтрации растворов  $\text{NaCl}$  и  $\text{KCl}$  коэффициент проницаемости возрастает по сравнению с дистиллированной водой в 1,25 и 1,43 раза, а при фильтрации растворов  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{K}_2\text{SO}_4$  – в 2,76 и 3,08 раза соответственно.

При изучении влияния нитратных растворов эксперименты выявили аналогичный с рассмотренным выше характер изменений проницаемости: максимальное изменение величины  $k_n$  по сравнению с дистиллированной водой отмечалось для растворов таких солей одновалентных щелочных металлов, как  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{KNO}_3$  (в 3,25 и 3,30 раза соответственно) и в меньшей степени для раствора соли двухвалентного металла  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  – в 1,4 раза. Это показывает, что с ростом валентности катионов в глинах значение  $k_n$  возрастает, поскольку при этом возрастает содержание связанной воды, уменьшается содержание осмотической воды и сокращается толщина диффузного слоя.

К. Шейкельфорд и др. [24] исследовали коэффициент фильтрации грунтов, насыщенных растворами  $\text{NaCl}$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ , и установили, что поровый раствор с высокой концентрацией одновалентных катионов, а также с низкой концентрацией двухвалентных катионов вызывает значительное увеличение коэффициента фильтрации. Авторы объясняют это тем, что увеличение

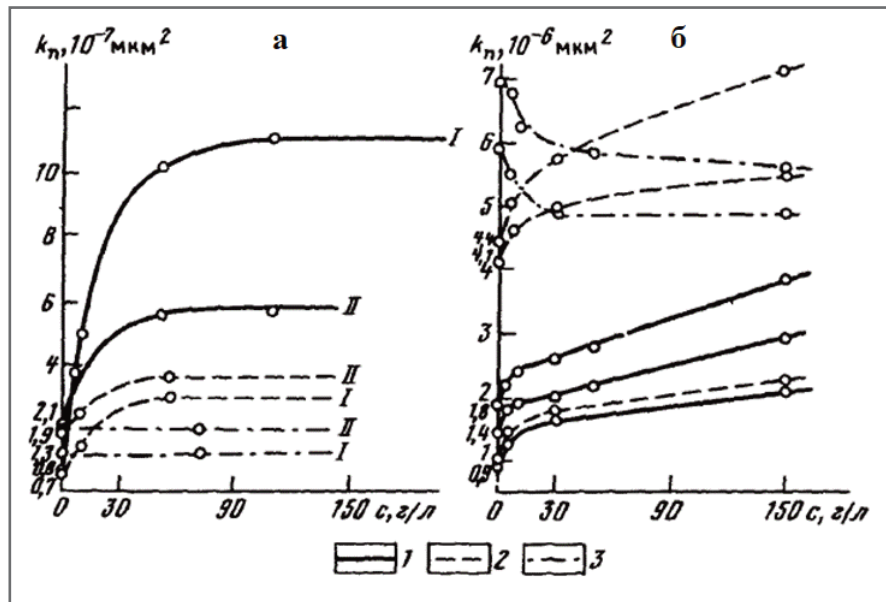


Рис 8. Графики зависимостей коэффициента проницаемости Na- и Ca-монтмориллонитовой (а) и каолинитовой (б) глин от минерализации и состава фильтрующей жидкости. Глины: I – Na-монтмориллонит, II – Ca-монтмориллонит. Растворы: 1 –  $\text{NaCl}$ , 2 –  $\text{CaCl}_2$ , 3 –  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (по [29])

концентрации уменьшает адсорбционный слой, что, в свою очередь, ведет к увеличению коэффициента фильтрации. Это неверное заключение, так как толщина адсорбционного слоя не зависит от концентрации электролита, тогда как толщина диффузного слоя, наоборот, зависит от нее.

Й. Джо и др. [25] провели испытания по определению коэффициента фильтрации Na-бентонита с использованием растворов  $\text{KCl}$  в концентрации 100 ммоль/л и  $\text{CaCl}_2$  в концентрациях 20 и 40 ммоль/л. Было обнаружено, что величина  $k_f$  бентонита уменьшается с уменьшением концентрации соли. При относительно низкой концентрации раствор  $\text{CaCl}_2$  оказывал большее влияние на  $k_f$  по сравнению с той же концентрацией раствора  $\text{NaCl}$ . Для проникающих растворов с двухвалентными катионами при увеличении концентрации происходят более значительные и быстрые изменения  $k_f$  и влажности. Это происходит в результате более быстрого замещения катионов натрия в обменном комплексе двухвалентными катионами в проникающем растворе.

В ходе испытаний с раствором  $\text{KCl}$  с концентрацией 100 ммоль/л не произошло практически никаких изменений коэффициента фильтрации и коэффициента пористости по сравнению с дистиллированной водой, даже если  $\text{K}^+$  заменял  $\text{Na}^+$  в обменном комплексе. С другой стороны, напротив, для растворов  $\text{CaCl}_2$  (20 ммоль/л и 40 ммоль/л)

коэффициент фильтрации увеличивался, а свободное набухание и влажность уменьшались по мере обмена  $\text{Ca}^{2+}$  на  $\text{Na}^+$ . Заметные изменения проницаемости и обменного комплекса произошли при испытаниях с раствором  $\text{CaCl}_2$  в концентрации 40 ммоль/л. Коэффициент фильтрации, полученный при использовании 20 ммоль/л  $\text{CaCl}_2$  был меньше, а влажность больше, чем в случае использования 40 ммоль/л  $\text{CaCl}_2$  ( $2,6 \times 10^{-8}$  см/с против  $6,7 \times 10^{-8}$  см/с, или 122% против 111% и 3,2 против 2,9 соответственно). То есть в бентоните, пропитанном более разбавленным раствором  $\text{CaCl}_2$ , удерживается больше воды, несмотря на то что оба бентонита в конце испытаний становятся Ca-бентонитами.

Кроме того, Й. Джо и др. [25] провели исследование влияния предварительной гидратации дистиллированной водой бентонитов на их коэффициенты фильтрации. Предварительно гидратированный бентонит имеет более низкий  $k_f$  ( $1,9 \times 10^{-8}$  см/с), чем бентонит, сразу пропитанный раствором  $\text{CaCl}_2$  в концентрации 40 ммоль/л ( $6,7 \times 10^{-8}$  см/с). Это позволяет предположить, что более низкий коэффициент фильтрации обусловлен удержанием связанной воды. Проникающие растворы с более высокой концентрацией, вероятно, вызывают большее вытеснение молекул воды, поскольку осмотический градиент между свободной и связанной водой больше.

А. Таммативат и У. Чимой [33] исследовали влияние растворов солей од-

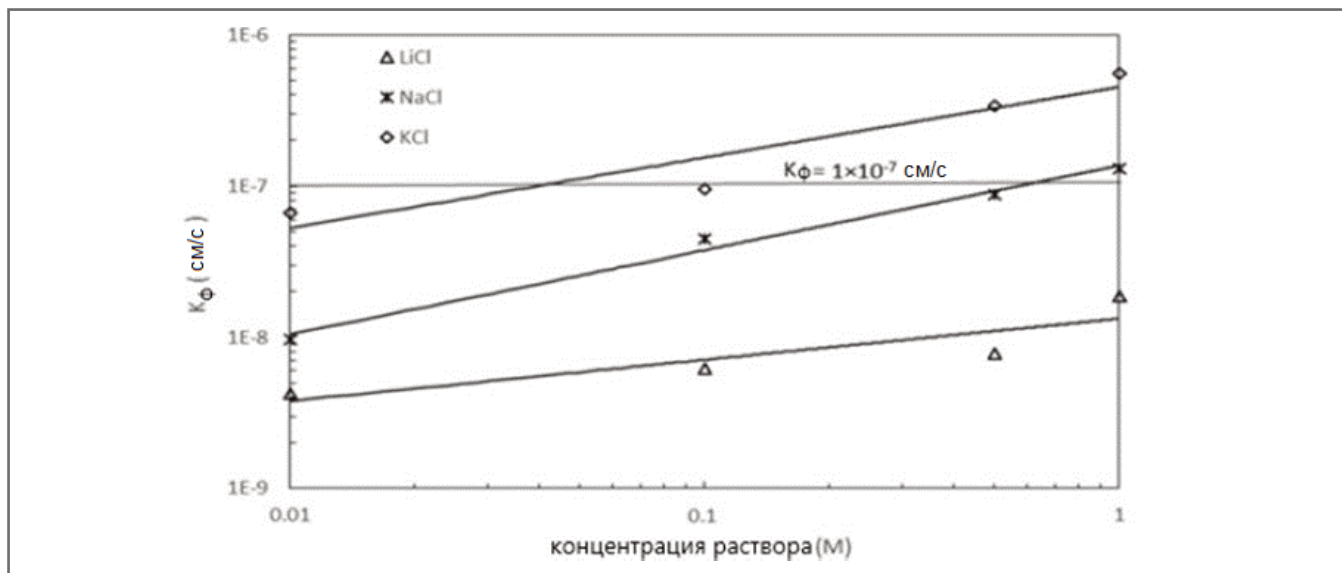


Рис. 9. Изменение коэффициента фильтрации в зависимости от концентрации различных солей-электролитов [35]

новалентных (LiCl, NaCl, KCl), двухвалентных ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CuCl}_2$ ) и трехвалентных ( $\text{FeCl}_3$ ) металлов на набухание и коэффициент фильтрации глинистых грунтов и подтвердили, что при одинаковой концентрации набухание грунтов больше при одновалентных катионах, чем при двухвалентных и трехвалентных. Для грунтов, насыщенных растворами, содержащими двух- или трехвалентные катионы, наблюдались более высокие значения коэффициента фильтрации по сравнению с одновалентными катионами или дистиллированной водой. Это объясняется уменьшением толщины диффузного слоя, что в свою очередь приводит к увеличению пористости грунта.

К. Сюэ и др. [34] изучали влияние растворов солей в высокой концентрации ( $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ , NaCl, KCl) на коэффициент фильтрации бентонитов и подтвердили, что  $k_{\phi}$  увеличивается в несколько раз при фильтрации растворов более высокой концентрации по сравнению с проницаемостью грунтов с дистиллированной водой. Ими подтверждено, что коэффициент фильтрации монтмориллонитовых глин в зависимости от состава солей порового раствора увеличивается в ряду:  $\text{CaCl}_2 > \text{MgCl}_2 > \text{KCl} > \text{NaCl}$ .

С ростом валентности катионов в глинах  $k_{\phi}$  возрастает, поскольку при этом увеличивается содержание связанной воды и, наоборот, уменьшается содержание осмотической воды, так как сокращается толщина диффузного слоя. Представленный ряд находится в соответствии с аналогичным рядом активности катионов по энергии их поглощения

(адсорбции) глинами. Степень диссоциации глинистых минералов в водной среде обуславливает образование диффузного слоя, который определяется характером катионов. По убыванию степени диссоциации устанавливается ряд:  $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ . Отсюда следует, что наиболее мощный диффузный слой, а следовательно, наименьшую проницаемость можно ожидать у монтмориллонитовых глин, содержащих катионы натрия. И наоборот, относительно слабо развитый диффузный слой и поэтому более высокую проницаемость следует ожидать у каолинистых глин, в особенности содержащих катионы кальция или трехвалентного железа. Все это позволяет увязывать фильтрационные свойства глин с составом обменных катионов и их емкостью обмена, а также регулировать их с помощью ионного обмена.

В случае сравнительного анализа влияния катионов одинаковой валентности необходимо учитывать различия радиусов гидратированных катионов и их влияние на коэффициент фильтрации. Этот фактор изучали Т.В. Бхарат и П. Дас [35]. Они провели три серии испытаний с использованием различных электролитов с катионами одинаковой валентности. Серии состояли из 0,01-; 0,1-; 0,5- и 1-молярного водного раствора LiCl, NaCl и KCl. Они установили, что с уменьшением катионного радиуса обменных ионов коэффициент фильтрации увеличивается (рис. 9). Увеличение было значительным при концентрации 1 М, при которой коэффициент фильтрации в присутствии иона  $\text{Li}^+$  составлял  $1,88 \times 10^{-8}$  см/с, а в

присутствии иона  $\text{K}^+$  он наблюдался на уровне  $5,58 \times 10^{-7}$  см/с, то есть увеличился почти в 29 раз. Однако наименьшее увеличение наблюдалось для концентрации 0,01 М. Таким образом, уменьшение радиуса катионов одинаковой валентности приводит к увеличению степени их гидратации и росту коэффициента фильтрации. Это связано с увеличением агрегированности частиц с ростом радиуса катионов, что в свою очередь приводит к увеличению эффективного размера пор, изменяя их от микропор до макропорам, в результате чего увеличивается коэффициент фильтрации грунтов.


### Заключение ►

Таким образом, фильтрационная проницаемость глинистых грунтов существенно зависит от минерализации и состава фильтрующейся жидкости: под влиянием концентрированных водных растворов солей проницаемость значительно возрастает по сравнению с проницаемостью того же грунта в случае пресной воды. В зависимости от минерального типа глин, минерализации и состава фильтрующейся жидкости и поглощенных катионов коэффициент проницаемости и коэффициент фильтрации глин могут меняться в несколько раз или даже на несколько десятичных порядков. Увеличение проницаемости глин обусловлено сложными процессами физико-химического взаимодействия фильтрующейся жидкости с грунтом. В условиях длительной фильтрации изменение проницаемости существенно зависит от фактора времени.

Результаты исследований влияния состава (и минерализации) растворов солей показывают, что для различных видов фильтрующихся растворов проницаемость глин выше, чем для пресной воды. При взаимодействии глинистых грунтов с растворами солей в результате катионного обмена одновалентных ионов на многовалентные происходит уменьшение толщины диффузного слоя, которая будет

также подавляться под влиянием роста концентрации раствора, вследствие чего происходит изменение структуры порового пространства и рост фильтрационных характеристик глинистых грунтов.

Анализ опубликованной литературы по данной теме показал, что основные закономерности под влиянием состава и концентрации растворов солей на фильтрационные характеристики гли-

нистых грунтов уже установлены и подтверждены многими учеными. Тем не менее имеются некоторые пробелы в изучении изменения микростроения глинистых грунтов, их начального градиента фильтрации под влиянием состава и концентрации фильтрующихся растворов солей, мало работ проведено для грунтов природного сложения, что требует дальнейшего изучения. 

## Список литературы ►

1. Филатов М.М. Стабилизация дорожных грунтов прогревом, солями, битуминозными дегтевыми и другими материалами // Стабилизация грунтов. М.: Изд-во Гущосдор, 1938. С. 5–33.
2. Морозов С.С., Полтев Н.Ф., Самойлов В.Г. К вопросу создания водоемов в ЦЧО на сильнофильтрующих грунтах // Вестник МГУ. Сер. физ.-мат. и естеств. наук. 1951. Вып. 8, № 12.
3. Шаврыгин П.И. Физические свойства почв в зависимости от состава поглощенных оснований // Труды Почвенного института им. В.В. Докучаева. 1936. С. 51–99.
4. Шаврыгин П.И. Солевой режим почв и почвенных растворов центральной части Барабы // Труды Почвенного института АН СССР. 1954. Т. 42. С. 104–171.
5. Mitchell J.K. Fundamentals of soil behavior (2nd ed.). New York: Wiley, 1993. P. 236–271.
6. Брилинг И.А. Фильтрация в глинистых породах: обзор. М.: ВИЭМС, 1984. 57 с.
7. Дашко Р.Э. Инженерно-геологический анализ и оценка водонасыщенных глинистых пород как оснований сооружений. С.-Пб.: Геореконструкция, 2015. 382 с.
8. Жиленков В.Н. Водопроницаемость экранов из глинистых грунтов (опытные исследования) // Материалы Всесоюзных научно-технических совещаний «Фильтрационные исследования и расчеты при проектировании гидротехнических сооружений», Нарва, 18–20 мая 1982 г. Л.: 1983. С. 119–127.
9. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л.: Недра, 1980. 320 с.
10. Морозов С.С., Самойлов В.Г., Лужина Л.Г. Создание водо- и растворопроницаемых экранов из дисперсных грунтов известкованием // Труды совещания по теоретическим основам технической мелиорации грунтов, 1–4 февраля 1960 г. М.: Изд-во МГУ, 1961. С. 216–224.
11. Морозов С.С., Васильева В.И., Дьячкова Н.Г. Изменение микроагрегатного состава и физико-механических свойств грунтов при взаимодействии с растворами солей, кислот и щелочей // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. Вып. 2. М.: Изд-во МГУ, 1968. С. 401–415.
12. Павилонский В.М. Изменение проницаемости суглинка при длительной фильтрации растворов едкого натра // Труды ВОДГЕО. 1977. Вып. 68. С. 6–9.
13. Павилонский В.М. Изменение проницаемости уплотненных глинистых грунтов в процессе долговременной фильтрации растворов электролитов // Труды ВСЕГИНГЕО. М., 1983. Вып. 152. С. 86–96.
14. Скворцов Н.П. Результаты исследования начального градиента фильтрации в глинах // Труды ВСЕГИНГЕО. М.: 1983. Вып. 152. С. 66–75.
15. Скворцов Н.П. Изучение влияния гидрохимических условий на проницаемость глинистых водоупоров в связи с оценкой защищенности подземных вод от загрязнений // Тезисы докладов Всесоюзного совещания «Использование и охрана подземных вод Урала». Свердловск, 1983. С. 72–74.
16. Попов В.Г., Абдрахманов Р.Ф. Ионообменная концепция в генетической гидрогеохимии / под ред. В.Г. Попова. Уфа: Гилем, Башкирская энциклопедия, 2013. 356 с.
17. Габибов Ф.Г. Теория и практика улучшения свойств структурно-неустойчивых глинистых грунтов при решении геотехнических и инженерно-геоэкологических проблем. Баку: Элм, 2011. 422 с.
18. Сунцов М.А. О фильтрации воды в структурных глинистых породах // Гидрогеохимические минералы. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 62–76.
19. Березкина Г.М. Влияние структуры и текстуры глинистых пород на процесс фильтрации. Объекты и методика исследований // Физико-химические процессы в глинистых породах. М.; Изд-во МГУ, 1980. С. 100–142.
20. Гольдберг В.М. Исследование фильтрации в глинах с учетом влияния на этот процесс физико-химических и термодинамических условий // Труды ВСЕГИНГЕО. М., 1983. Вып. 152. С. 6–14.
21. Мосьяков Е.Ф. Об уплотнении и фильтрационных свойствах глинистых грунтов с различными обменными катионами // Геология и разведка. 1976. № 9. С. 9–13.

22. Березкина Г.М., Брилинг И.А., Корякина Н.С., Краснушкин А.В. Экспериментальные исследования движения влаги и солей в глинистых породах // Взаимодействие поверхностного и подземного стока. М.: Изд-во МГУ, 1976. Вып. 4. С. 195–271.
23. Petrov R.J., Rowe R.K. Geosynthetic clay liner (GCL) – chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance // Canadian Geotechnical Journal. 1997. Vol. 34. P. 863–885.
24. Shackelford C.D., Benson C.H., Katsumi T., Edil T.B., Lin L. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids // Geotextiles and Geomembranes. 2000. Vol. 18. P. 133–162.
25. Jo Y.H., Katsumi T., Benson C.H., Edil T.B. Hydraulic conductivity and swelling of non-prehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 2001. Vol. 127. № 7. P. 557–567.
26. Mishra A.K., Ohtsubo M., Li L., Higashi T., Park J. Effect of salt of various concentrations on liquid limit, and hydraulic conductivity of different soil-bentonite mixtures // Environmental Geology. 2009. Vol. 57. № 5. P. 1145–1153.
27. Грунтоведение / Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А. и др. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
28. Achari G., Joshi R.C., Bentley L.R., Chatterji S. Prediction of the hydraulic conductivity of clays using the electric double layer theory // Canadian Geotechnical Journal. 1999. Vol. 36. P. 783–792.
29. Гольдберг В.Н., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах. Москва: Недра, 1986. 160 с.
30. Мосьяков Е.Ф., Мерков Ю.Б. Структурные и фильтрационные изменения глинистых грунтов в шламонакопителях Стерлитамакского содово-цементного комбината // Стратиграфия и корреляция плиоцена и плейстоцена Предуралья. Уфа: БФАН СССР, 1976. С. 79–84.
31. Баламирзоев А.Г., Зербалиев А.М., Курбанов К.О. Математическое моделирование выщелачивания солей при одномерной фильтрации воды в грунтах конечной толщины // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. № 2 (41). С. 118–125.
32. Монюшко А.М., Пахомов С.П. Основные закономерности, определяющие устойчивость глинистых грунтов к воздействию обводнения и промстоков (по экспериментальным данным) // Инженерная геология. 1985. № 6. С. 35–45.
33. Thammathiwat A., Chimoye W. Effect of permeant liquid on the swell volume and permeability of geosynthetic clay liners // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2010. Vol. 15. P. 1183–1197.
34. Xue Q., Zhang Q., Liu L. Impact of high concentration solutions on hydraulic properties of geosynthetic clay liner materials // Materials. 2012. Vol. 5. P. 2326–2341. URL: doi.org/10.3390/ma5112326.
35. Bharat T.V., Das P. Effect of inorganic salt solutions on the hydraulic conductivity and diffusion characteristics of compacted clay // Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns, Proceedings of IGC 2018. 2020. P. 99–111.

## References ►

1. Filatov M.M. Stabilizatsiya dorozhnyh gruntov progrevom, solyami, bituminoznymi degtevyami i drugimi materialami [Stabilization of road soils by heating, salts, bituminous-tar and other materials] // Stabilizatsiya gruntov. M.: Izd-vo Gushosdor, 1938. S. 5–33 (in Rus.).
2. Morozov S.S., Poltev N.F., Samoilov V.G. K voprosu sozdaniya vodoyemov v TSCHO na sil'nofil'truyushchih gruntah [On the issue of creating water reservoirs in the Central Black Earth region on highly seepagable grounds] // Vestnik MGU. Ser. fiz-mat. i estestv. nauk. 1951. Vyp. 8, № 12 (in Rus.).
3. Shavrygin P.I. Fizicheskie svoystva pochv v zavisimosti ot sostava pogloshchennyh osnovaniy [Physical properties of soils depending on the composition of absorbed bases] // Trudy Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchayeva. M., 1936. S. 51–99 (in Rus.).
4. Shavrygin P.I. Solevoy rezhim pochv i pochvennyh rastvorov tsentral'noy chasti Baraby [Salt regime of soils and soil solutions in the central part of Baraba] // Trudy Pochvennogo instituta AN SSSR. 1954. T. 42. S. 104–171 (in Rus.).
5. Mitchell J.K. Fundamentals of soil behavior (2nd ed.). Wiley, New York, 1993. P. 236–271.
6. Briling I.A. Fil'tratsiya v glinistykh porodah: obzor [Seepage in clayey soils: overview]. M.: VIEMS, 1984. 57 s. (in Rus.).
7. Dashko R.E. Inzhenerno-geologicheskii analiz i otsenka vodonasyshchennyh glinistykh porod kak osnovaniy sooruzheniy [Engineering-geological analysis and assessment of water-saturated clayey soils as foundations for structures]. S.-Pb.: Georekonstruktsiya, 2015. 382 s. (in Rus.).
8. Zhilenkov V.N. Vodopronitsaemost' ekranov iz glinistykh gruntov (opytnye issledovaniya) [Water permeability of screens of clayey soils (experimental studies)] // Materialy Vsesoyuznykh nauchno-tekhnicheskikh soveshchaniy «Fil'tratsionnyye issledovaniya i raschety pri proyektirovaniy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy», Narva, 18–20 maya 1982 g. L.: 1983. S. 119–127 (in Rus.).
9. Mironenko V.A., Rumynin V.G., Uchaev V.K. Ohrana podzemnykh vod v gornodobyvayushchih rayonah [Groundwater protection in mining areas]. L.: Nedra, 1980. 320 s. (in Rus.).
10. Morozov S.S., Samoilov V.G., Luzhina L.G. Sozdaniye vodo- i rastvoronepronitsaemykh ekranov iz dispersnykh gruntov izvestkovaniem // Trudy soveshchaniya po teoreticheskim osnovam tekhnicheskoy melioratsii gruntov, 1–4 fevralya 1960 g. M.: Izd-vo MGU, 1961. S. 216–224 (in Rus.).
11. Morozov S.S., Vasil'yeva V.I., D'yachkova N.G. Izmeneniye mikroagregatnogo sostava i fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov pri vzaimodeystvii s rastvorami soley, kislot i shchelochey [Changes in the microaggregate composition and physical-mechanical properties of soils when interacting with solutions of salts, acids and alkalis] // Voprosy inzhenernoy geologii i gruntovedeniya. Vyp. 2. M.: Izd-vo MGU, 1968. S. 401–415 (in Rus.).



12. Pavilonskiy V.M. Izmeneniye pronitsayemosti suglinka pri dlitel'noy fil'tratsii rastvorov yedkogo natra [Changes in loam permeability during long-term seepage of caustic soda solutions] // Trudy VODGEO. 1977. Vyp. 68. S. 6–9 (in Rus.).
13. Pavilonskiy V.M. Izmeneniye pronitsaemosti uplotnennykh glinistyyh gruntov v protsesse dolgovremennoy fil'tratsii rastvorov elektrolitov // Trudy VSEGINGEO. M., 1983. Vyp. 152. S. 86–96 (in Rus.).
14. Skvortsov N.P. Rezul'taty issledovaniya nachal'nogo gradiyenta fil'tratsii v glinah // Trudy VSEGINGEO. M., 1983. Vyp. 152. S. 66–75 (in Rus.).
15. Skvortsov N.P. Izucheniye vliyaniya gidrohimicheskikh usloviy na pronitsaemost' glinistyyh vodouporov v svyazi s otsenkoy zashchishchennosti podzemnykh vod ot zagryazneniy // Tezisy dokladov Vsesoyuznogo soveshchaniya «Ispol'zovaniye i ohrana podzemnykh vod Urala». Sverdlovsk, 1983. S. 72–74 (in Rus.).
16. Popov V.G., Abdrakhmanov R.F. Ionoobmennaya kontseptsiya v geneticheskoy gidrogeohimii [Ion exchange concept in genetic hydrogeochemistry] / pod red. V.G. Popova. Ufa: Gilem, Bashkirskaya ehntsiklopediya, 2013. 356 s. (in Rus.).
17. Gabibov F.G. Teoriya i praktika uluchsheniya svoystv strukturno-neustoychivyyh glinistyyh gruntov pri reshenii geotekhnicheskikh i inzhenerno-geoekologicheskikh problem [Theory and practice of improving the properties of structurally unstable clay soils in solving geotechnical and engineering-geoecological problems]. Baku: Elm, 2011. 422 s. (in Rus.).
18. Suntsov M.A. O fil'tratsii vody v strukturnyyh glinistyyh porodah // Gidrogeohimicheskkiye mineraly [On water seepage in structural clay soils]. M.: Izd-vo AN SSSR, 1963. S. 62–76 (in Rus.).
19. Berezkina G.M. Vliyaniye struktury i tekstury glinistyyh porod na protsess fil'tratsii. Ob'ekty i metodika issledovaniy [Influence of the structure and texture of clay soils on the seepage process. Objects and methods of the research] // Fiziko-himicheskkiye protsessy v glinistyykh porodah. M.; Izd-vo MGU, 1980. S. 100–142 (in Rus.).
20. Gol'dberg V.M. Issledovaniye fil'tratsii v glinah s uchedom vliyaniya na etot protsess fiziko-himicheskikh i termodinamicheskikh usloviy // Trudy VSEGINGEO. M., 1983. Vyp. 152. S. 6–14 (in Rus.).
21. Mos'yakov E.F. Ob uplotnenii i fil'tratsionnykh svoystvakh glinistyyh gruntov s razlichnymi obmennymi kationami [On the compaction and filtration properties of clay soils with various exchangeable cations] // Geologiya i razvedka. 1976. № 9. S. 9–13 (in Rus.).
22. Berezkina G.M., Briling I.A., Koryakina N.S., Krasnuskin A.V. Eksperimental'nyye issledovaniya dvizheniya vlagi i soley v glinistyykh porodah [Experimental studies of the movement of moisture and salts in clayey soils] // Vzaimodeystviye poverhnostnogo i podzemnogo stoka. M.: Izd-vo MGU, 1976. Vyp. 4. S. 195–271 (in Rus.).
23. Petrov R.J., Rowe R.K. Geosynthetic clay liner (GCL) – chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34: 863–885.
24. Shackelford C.D., Benson C.H., Katsumi T., Edil T.B., Lin L. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids. Geotextiles and Geomembranes, 2000. 18: 133–162.
25. Jo Y.H., Katsumi T., Benson C.H., Edil T.B. Hydraulic conductivity and swelling of non-prehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 2001, 127 (7): P. 557–567.
26. Mishra A.K., Ohtsubo M., Li L., Higashi T., Park J. Effect of salt of various concentrations on liquid limit, and hydraulic conductivity of different soil-bentonite mixtures. Environmental Geology, 2009, 57 (5): 1145–1153.
27. Gruntovedeniye [Ground science] / Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesenskiy E.A. i dr. M.: Izd-vo MGU, 2005. 1024 s. (in Rus.).
28. Achari G., Joshi R.C., Bentley L.R., Chatterji S. Prediction of the hydraulic conductivity of clays using the electric double layer theory. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36: 783–792.
29. Gol'dberg V.N., Skvortsov N.P. Pronitsaemost' i fil'tratsiya v glinah [Permeability and seepage in clays]. Moskva: Nedra, 1986. 160 s. (in Rus.).
30. Mos'yakov E.F., Merkov Yu.B. Strukturnyye i fil'tratsionnyye izmeneniya glinistyyh gruntov v shlamonakopitel'yakh Sterlitamakskogo sodovo-tsementnogo kombinata [Structural and seepage changes of clayey soils in sludge reservoirs of the Sterlitamak Soda-Cement Plant] // Stratigrafiya i korrelyatsiya pliotsena i pleistotsena Predural'ya. Ufa: BFAN SSSR, 1976. S. 79–84 (in Rus.).
31. Balamirzoev A.G., Zerbaliyev A.M., Kurbanov K.O. Matematicheskoye modelirovaniye vyshchelachivaniya soley pri odnomernoy fil'tratsii vody v gruntah konechnoy tolshchiny [Mathematical modeling of salt leaching during one-dimensional water seepage in soils of finite thickness] // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Tehnicheskkiye nauki. 2016. № 2 (41). S. 118–125 (in Rus.).
32. Monyushko A.M., Pahomov S.P. Osnovnyye zakonomernosti, opredelyayushchiye ustoychivost' glinistyyh gruntov k vozdeystviyu obvodneniya i promstokov (po eksperimental'nym dannym) [The main regularities that determine the resistance of clay soils to the effects of flooding and industrial wastes (according to experimental data)] // Inzhenernaya geologiya. 1985. № 6. S. 35–45 (in Rus.).
33. Thammathiwat A., Chimoye W. Effect of permeant liquid on the swell volume and permeability of geosynthetic clay liners. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 15: 1183–1197.
34. Xue Q., Zhang Q., Liu L. Impact of high concentration solutions on hydraulic properties of geosynthetic clay liner materials. Materials, 2012, 5: 2326–2341. URL: doi.org/10.3390/ma5112326.
35. Bharat T.V., Das P. Effect of inorganic salt solutions on the hydraulic conductivity and diffusion characteristics of compacted clay. Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns, Proceedings of IGC 2018. 2020. P. 99–111.

### Информация об авторах

#### **КОРОЛЕВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

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

#### **ФАЗЫЛОВ АЙРАТ МУХАРАМОВИЧ**

Аспирант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

### Information about the authors

#### **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

#### **AIRAT M. FAZYLOV**

Postgraduate student at the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

# Независимый электронный журнал **ГеоИнфо**

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



# WWW.GEOINFO.RU

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 (±2) С°**

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



Источник фото: Pixabay  
The photo source: Pixabay

# ПРОБЛЕМЫ НЕСОВЕРШЕНСТВА ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В ОБЛАСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ДОРАБОТКЕ

Аналитическая статья

Поступила в редакцию 13.02.2023. Принята к публикации 27.02.2023.

© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2023

## ЯКУШЕВ И.В.

ГК «Олимппроект»,  
yakushev@olimpprojekt.ru  
Адрес: Россия, г. Москва,  
ул. Автозаводская, вл. 23А, корпус 2

## СУРИНА О.И.

ГК «Олимппроект»  
Адрес: Россия, г. Москва,  
ул. Автозаводская, вл. 23А, корпус 2

## АННОТАЦИЯ

В процессе инженерно-геологических изысканий специалисты ежедневно сталкиваются с трудностями интерпретации действующих нормативных технических документов, несоответствиями между различными нормативами или недостаточностью указанных в них требований. В статье рассмотрены эти проблемы и приведены предложения по актуализации нормативно-технической базы, направленные на их решение.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

инженерно-геологические изыскания; прикладная геология; нормативно-техническая документация; корректировка; виброползучесть; прессиометрические испытания; пески; плотность; ограждение котлована; подпорные стены; модуль деформации.

## ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Якушев И.В. Сурина О.И. Проблемы несовершенства действующей нормативной документации в области инженерно-геологических изысканий. Предложения по доработке // Геоинфо, 2023. № 1. С. 20–27. doi:10.58339/2949-0677-2023-5-1-20-27.

# IMPERFECTION PROBLEMS OF THE CURRENT REGULATORY DOCUMENTATION IN THE FIELD OF ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS. IMPROVEMENT SUGGESTIONS

Analytical paper

Received 13.02.2023. Accepted 27.02.2023.

© Independent electronic journal "GeoInfo", 2023

## IVAN V. YAKUSHEV

GK "Olimproekt", office@olimproekt.ru  
Address: 23A Avtozavodskaya st., bld. 2,  
Moscow, Russia

## OL'GA I. SURINA

GK "Olimproekt", office@olimproekt.ru  
Address: 23A Avtozavodskaya st., bld. 2,  
Moscow, Russia

## ABSTRACT

In the process of engineering-geological surveys, specialists daily face difficulties in the interpretation of the existing normative-technical documents, inconsistencies between various standards or the insufficiency of the requirements stated in them. The paper considers these problems and provides some proposals for updating the regulatory base aimed at solving them.

## KEYWORDS:

engineering-geological survey; applied geology; normative-technical documentation; correction; vibrocreep; pressuremeter tests; sands; density; foundation pit shoring; retaining walls; deformation module.

## FOR CITATION:

Yakushev I.V., Surina O.I. Problemy nesovershenstva deystvuyushchey normativnoy dokumentatsii v oblasti inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy. Predlozheniya po dorabotke [Imperfection problems of the current regulatory documentation in the field of engineering-geological surveys. Improvement suggestions] // GeoInfo, 2023. № 1. S. 20–27. doi:10.58339/2949-0677-2023-5-1-20-27 (in Rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективная реализация строительных проектов и безопасность возведенных объектов в современных условиях требует усовершенствования нормативно-технической базы не только самого строительства, но и инженерных изысканий. При этом появлению актуализированных или новых стандартов и сводов правил должен предшествовать тщательный анализ существующих отечественных и зарубежных нормативно-технических документов, в котором должно участвовать все профессиональное сообщество. При этом сам процесс внесения изменений в нормативные акты их принятия, закрепленный в Федеральном законе от 27.12.2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» и в ГОСТ Р 1.2-2016 «Стандарты национальные РФ. Правила разработки, утверждения, обновления и отмены», на практике порой достаточно непрозрачен и продолжителен по времени, тогда как до осуществления обновления и актуализации изыскателям приходится сталкиваться с разночтениями и недочетами нормативных документов при

защите результатов своих работ, в том числе в органах экспертизы.

Свой вклад в привлечение внимания профессионального сообщества как к самим проблемам разночтений и несовершенства нормативных документов, так и к возможным вариантам их решения и попытались сделать авторы настоящей статьи на основе большого опыта работы в сфере инженерно-геологических изысканий.

## ВИБРОПОЛЗУЧЕСТЬ. РАЗНОЧТЕНИЯ ФОРМУЛИРОВОК В ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

### Проблема 1

Необходимость определения виброползучести описана в СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» [1] и СП 446.1325800.2019 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» [2]. При этом требования в них сильно различаются.

Пункт 6.14.4 первого из этих сводов правил [1] гласит:

«Для *мелких и пылеватых водонасыщенных песков и глинистых грунтов текучей консистенции* в пределах зон, указанных в 6.14.3, необходимо проводить расчет длительных осадок от совместного действия статических и динамических нагрузок (виброползучесть)».

В пункте 7.2.24.4 второго из этих СП [2] указано:

«При проектировании зданий и сооружений вблизи внешних источников динамических нагрузок от транспорта или промышленного оборудования, а также сооружений, являющихся при эксплуатации источниками динамических нагрузок, выполняют динамические испытания в соответствии с ГОСТ Р 56353 для определения характеристик виброползучести грунтов основания:

- *песков рыхлых любой влажности;*
- *песков средней плотности водонасыщенных;*
- *связных грунтов с показателем консистенции выше 0,5».*

Разночтения между этими двумя документами заключаются в типах, влаж-

**Таблица 1. Соответствие городских улиц и дорог категориям автомобильных дорог общего пользования (соответствует таблице 6 из ПНСТ 542-2021 [4])**

Категория улиц и дорог	Аналог категории дороги общего пользования
Магистральные дороги скоростного движения, магистральные улицы общегородского значения непрерывного движения	I
Магистральные дороги регулируемого движения, магистральные улицы общегородского значения регулируемого движения, магистральные улицы районного значения	II
Улицы и дороги местного значения: в общественно-деловых и торговых зонах, в производственных зонах, улицы в зонах жилой застройки в крупных и крупнейших городах, основные улицы сельских поселений	III
Улицы в зонах жилой застройки (за исключением улиц крупных и крупнейших городов), проезды, улицы и дороги сельских поселений (за исключением основных улиц), велосипедные дорожки, тротуары, пешеходные улицы и площади	IV

ности и консистенции грунтов, для которых необходимо определять параметры виброползучести.

По данному вопросу была получена консультация главного геолога ГУП «Мосгоргеотрест» кандидата технических наук В.П. Коновалова. Дополнительно были проведены консультации с представителями ГАУ «Мосгосэкспертиза». Все опрошенные единодушно пришли к мнению, что оба указанных нормативно-технических документа (НТД), регламентирующих требования к изучению виброползучести, имеют одинаковый статус, поэтому в настоящий момент необходимо в задании на проведение инженерно-геологических изысканий в разделе «Дополнительные требования к изысканиям» указывать, согласно какому НТД в рамках конкретного объекта следует выполнять эти исследования. В целом, это вынужденный подход, но другого на сегодняшний день нет и пока не предвидится.

### Проблема 2 ▶

Не представляется возможной идентификация автомобильных дорог по классификациям, на которые приведена ссылка в СП 446.1325800.2019 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» [2].

Пункт 7.2.24.4 этого документа [2] гласит:

«Динамические испытания грунтов допускается не проводить, если граница фундамента сооружения находится на расстоянии более 100 м от края земляного полотна железной дороги, далее 50 м от осевой части автомобильной дороги категории I (IA, IB и IV по СП 34.13330.2012), трамвайной линии, линии метрополитена (с учетом глубины заложения), а также далее 50 м от границ

фундаментов машин с динамическими нагрузками».

Инженер-геолог не имеет достаточной компетенции самостоятельно определить категорию дороги и, соответственно, необходимость определения параметров виброползучести по данным классификациям. Кроме того, при выявлении такой необходимости отсутствует информация о частоте колебаний грунта и области грунтового массива (поверхности или глубины заложения фундамента), для которых необходимо определять коэффициент виброползучести.

Для г. Москвы сотрудниками ГК «ОЛИМПРОЕКТ» эта проблема решается следующим образом:

- используется постановление Правительства Москвы № 214-ПП от 26 марта 2002 г. «О Перечне улиц и магистралей города Москвы» [3], в котором перечислены все улицы и магистрали столицы;

- используется предварительный национальный стандарт ПНСТ 542-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования» [4], где приведено сопоставление типов автодорог с категориями, указанными в СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги» [5] (таблица 1).

### Проблема 3 ▶

Эта проблема касается необходимости выполнения дорогостоящих определений коэффициента виброползучести при их очевидной статистической сходимости.

По накопленным данным ГК «ОЛИМПРОЕКТ» по объектам Московского региона за последние четыре года (2019–2022 гг.) была произведена статистическая обработка коэффициента виброползучести для каждого типа грунта

(песок мелкий пылеватый, суглинок мягкопластичный, супесь пластичная ( $I_L > 0,50$ )). Всего было исследовано 130 образцов. Была выявлена зависимость между возрастом и коэффициентом виброползучести. Кроме того, лишь в единичных случаях коэффициент виброползучести был менее 0,70.

Согласно полученным данным средние значения коэффициента виброползучести составили:

- 0,79 для песка пылеватого четвертичного, 0,85 для песка юрского и мелового;
- 0,83 для песка мелкого четвертичного, 0,87 для песка юрского и мелового;
- 0,95 для песка средней крупности четвертичного;
- 0,77 для суглинка мягкопластичного четвертичного;
- 0,87 для супеси пластичной.

При этом коэффициент вариации не превышал 0,05–0,07 д. ед.

### Предложения ▶

1. Привести классификацию дорог по таблице 6 ПНСТ 542-2021 [4] (см. таблицу 1) в пункте 7.2.24.4 СП 446.1325800.2019 [2] и изменить часть формулировки этого пункта на следующую «...50 м от осевой части автомобильной дороги категории I согласно таблице...».

2. В СП 446.1325800.2019 [2] ввести дополнительную таблицу со значениями частоты колебаний грунта, характерными для железной и автомобильной дорог, трамвайной линии, линии метрополитена. В примечании к этой таблице для других видов источников динамических нагрузок (действующих и проектируемых) привести требование об указании частоты колебаний в техническом задании.

3. Обсудить с разработчиками формулировки в пункте 7.2.24.4

**Таблица 2. Предлагаемая таблица значений понижающих коэффициентов для модуля деформации, учитывающих виброползучесть, для корректировки пункта 2.24.4 из СП 446.1325800.2019 [2]**

Тип грунта	Понижающий коэффициент, учитывающий виброползучесть, д. ед.
Песок пылеватый четвертичный / юрский, меловой	0,75 / 0,80
Песок мелкий четвертичный / юрский, меловой	0,80 / 0,85
Песок средней крупности	0,90

СП 446.1325800.2019 [2] и для зданий и сооружений 1 и 2 класса (КС-1, КС-2) ввести таблицу понижающих коэффициентов для модуля деформации. Предлагается представить этот пункт в следующей формулировке: «При проектировании зданий и сооружений вблизи внешних источников динамических нагрузок от транспорта или промышленного оборудования, а также сооружений, являющихся при эксплуатации источниками динамических нагрузок, для деформационных характеристик грунтов основания применять понижающий коэффициент, учитывающий виброползучесть, в соответствии с таблицей...» (таблица 2).

Ввиду очевидной недостаточности статистических данных для связных грунтов (суглинков, супесей текучей консистенции), а также для всех предусмотренных разновидностей песчаных грунтов, склонных к снижению деформационных свойств при воздействии вибраций и при этом залегающих в основаниях уникальных зданий и сооружений (КС-3), рекомендуется оставить требование о непосредственном определении показателей виброползучести в лабораторных условиях.

## ПРЕССИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. НОВЫЙ ГОСТ 20276.2-2020. ОШИБКА В ФОРМУЛЕ ▶

### Проблема 1 ▶

Результат расчета по-новому ГОСТ 20276.2-2020 «Грунты. Метод испытания радиальным прессиометром» [6] в 1,5–2,0 раза превышает результат, получаемый по ГОСТ 20276-2012 «Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости» [7].

Формула для нахождения модуля деформации из ГОСТ 20276-2012 [7]:

$$E = K_r \times r_0 \times \frac{p_k - p_0}{\Delta r}. \quad (1)$$

Формула из ГОСТ 20276.2-2020 [6]:

$$E = K_r \times (1 + \mu) \times r_0 \times \frac{p_k - p_0}{\Delta r}. \quad (2)$$

Приведем пример расчета. Испытание проводится в медленном режиме на глубине 20,0 м в верхнеюрской полутвердой глине.

По формуле (1) получается:

$$E = 1,42 \times 44,6 \times \frac{0,675 - 0,425}{0,98} = 16,1 \text{ МПа}. \quad (3)$$

По формуле (2):

$$E = 2,0 \times (1 + 0,42) \times 44,6 \times \frac{0,675 - 0,425}{0,98} = 32,2 \text{ МПа}. \quad (4)$$

Разница заключается в дополнительном множителе (выделен красным в формуле (2) и в расчете (4)) и в значении  $K_r$ . В результате при расчете по формуле (2) получаются завышенные значения модуля деформации  $E$ .

Кроме того, в пункте 8.6 в описании расчета коэффициента анизотропии в числителе и знаменателе указан один и тот же параметр – одометрический модуль деформации образца, вырезанного в вертикальном направлении. Очевидно, что это просто техническая ошибка, но она есть и требует исправления.

### Предложение ▶

Отменить действующий ГОСТ 20276.2-2020 [6], вернуть ГОСТ 20276-2012 [7] до уточнения старой формулы для расчета модуля деформации в части по прессиометрическим испытаниям либо исключить корректирующий коэффициент  $K_r$  из новой формулы.

## ПЛОТНОСТЬ СЛОЖЕНИЯ ПЕСКОВ ▶

### Проблема 1 ▶

Эта проблема заключается в отношении к рыхлым пескам песков с высокими (17–20 МПа) значениями показателей деформационных свойств (таблицы 3, 4). На нее с 2018 года обращает внимание главный геолог ООО «ПИК-Проект» кандидат геолого-минералогических наук В.Ю. Котов, но пока изменений в нормативной базе по этому поводу нет.

Таблица Ж.1 из СП 446.1325800.2019 [2] (см. таблицу 3) неизменна со времени

принятия СНиП II-15-74 «Основания зданий и сооружений» [8].

На основе таблицы Ж.1 из СП 446.1325800.2019 [2] (см. таблицу 3) к рыхлым относятся пески при лобовом сопротивлении грунта менее 2–5 МПа. Согласно же таблице Ж.2 из СП 446.1325800.2019 [2] (см. таблицу 4) при лобовом сопротивлении 2–4 МПа модуль деформации  $E$  для аллювиальных и флювиогляциальных песков равен 17–20 МПа, что является достаточно высоким показателем для основания фундамента, особенно для типовых и невысоких сооружений. При этом рыхлые пески справедливо не признаются экспертами в качестве грунтов оснований, обеспечивающих надежность строительства и эксплуатации зданий и сооружений, а относятся к специфическим грунтам (наравне с органическими и другими грунтами, оказывающими существенно влияние на проектные решения, согласно п. 5.4 ГОСТ 20522-2012 «Методы статистической обработки результатов испытаний» [9]) и требуют замены, усиления либо применения свайных фундаментов. При этом, например, тугопластичные суглинки с модулем 10–12 МПа зачастую применяются в качестве оснований и не входят в состав специфических грунтов согласно СП 22.13330.2016 [1] и другим нормативным документам.

### Проблема 2 ▶

К этой проблеме относятся: неоднозначное прочтение приложения Ж СП 446.1325800.2019 [2], ограниченные возможности использования данных таблиц и в целом интерпретации результатов статического зондирования. Кроме того, возникает некоторое недопонимание при прочтении всего приложения Ж. Так, в пункте Ж.3 сказано: «Определяемые по настоящему приложению характеристики относятся к кварцевым и кварцево-полевошпатовым песчаным грунтам четвертичного возраста со значением удельного сцепления менее 0,01 МПа и к четвертичным глинистым грунтам с содержанием органических веществ менее 10%».

**Таблица 3. Определение плотности сложения песков по данным статического зондирования (соответствует таблице Ж.1 из СП 446.1325800.2019 [2])**

Пески	Плотность сложения при $q_c$ , МПа		
	плотные	средней плотности	рыхлые
Крупные и средней крупности независимо от влажности	более 15	от 5 до 15	менее 5
Мелкие независимо от влажности	более 12	от 4 до 12	менее 4
Пылеватые: – малой и средней степени водонасыщения; – водонасыщенные	более 10	от 3 до 10	менее 3
	более 7	от 2 до 7	менее 2

**Таблица 4. Определение нормативного модуля деформации песчаных грунтов  $E$  по данным статического зондирования (соответствует таблице Ж.2 из СП 446.1325800.2019 [2])**

Пески	Нормативный модуль деформации песчаных грунтов $E$ при $q_c$ , МПа									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Все генетические типы, кроме аллювиальных и флювиогляциальных	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
Аллювиальные и флювиогляциальные	17	20	22	25	28	30	33	36	38	41

При этом, как видно из таблицы Ж.2 СП 446.1325800.2019 [2] (см. таблицу 4), верхняя строчка относится ко всем генетическим типам песчаных грунтов, кроме аллювиальных и флювиогляциальных. Но если исходить из пункта Ж.3, то не понятно, на какие еще генетические типы могут распространяться данные значения – на внутриморенные, морские, делювиальные, элювиальные или эоловые.

Дочетвертичные пески вообще не участвуют в интерпретации результатов статического зондирования, что странно, так как испытания проводятся регулярно и в большом объеме. При этом эксперты просят проводить расчеты для дочетвертичных песков по приложению Ж и давать расчетные показатели в сравнительной таблице свойств, что противоречит пункту Ж.3.

Ранее в пункте И.3 приложения И СП 47.13330.2012 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения» [10] не были указаны генетические типы, на которые распространяются таблицы, а был лишь указан минеральный состав. Таким образом, можно было приводить показатели свойств для меловых кварцевых и кварц-полевошпатовых песков.

Согласно приложению Ж последней редакции СП 446.1325800.2019 [2] по результатам статического зондирования могут быть определены показатели физико-механических свойств глинистых

грунтов **только для четвертичных отложений, исключая грунты ледникового комплекса**. При этом не дана расшифровка, какие именно отложения относятся к ледниковому комплексу – только непосредственно моренные или все от флювиогляциальных до лимногляциальных и аллювиально-флювиогляциальных.

С учетом всего сказанного выше возникает слишком много ограничений по использованию данных таблиц и в целом по интерпретации результатов статического зондирования. Получается, что нельзя определять свойства всех моренных и межморенных отложений, меловых и юрских песков, широко распространенных на территории Московского региона. Остается возможность интерпретации только для отложений речных долин и террас (в пределах Московского региона), имеющих относительно ограниченное распространение.

#### Предложения ►

1. Провести анализ результатов инженерно-геологических изысканий наиболее авторитетных организаций и актуализировать таблицы нормативных свойств грунтов и их зависимости от результатов полевых испытаний, в том числе для рыхлых песков.

2. Сместить границу между песками средней плотности и рыхлыми в зависимости от значений удельного сопротивления грунта под нижним концом зонда.

3. Внести уточнение по видам отложений ледникового комплекса (какие грунты к ним относятся).

4. Ввести в таблицы возможность оценки свойств дочетвертичных песков.

5. Вернуть возможность оценки свойств моренных отложений, тем более что отмечается высокая степень сходимости с результатами лабораторных определений.

#### ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ ПОД ОГРАЖДЕНИЕ КОТЛОВАНА ►

##### Проблема ►

Рассмотрим проблему ограниченной методики изысканий под ограждение котлована. В настоящее время данный вид изысканий регламентируется пунктом 9.4 СП 22.13330.2016 [9] и пунктом 7.2.10 СП 446.1325800.2019 [2]: «...геологические разведочные скважины следует размещать по трассе ограждающих конструкций не реже чем через 20 м. При отсутствии фактической возможности расположения скважин указанным образом их следует устраивать по прямоугольной сетке с шагом не более 20 м...». Здесь не совсем понятно, что значит «прямоугольная сетка».

Иными словами, если нет возможности пробурить скважину в назначенном месте, то количество скважин увеличивается в соответствии с дополнительными прямыми углами контура сетки.



Либо необходимо смещать скважины не по прямоугольной сетке. При этом очевидно, что расстояние между скважинами будет более 20 м (гипотенуза в прямоугольном треугольнике). Здесь предлагается внести примечание, аналогичное пункту 7.2.5 СП 446.1325800.2019 (с изменением № 1) [2], то есть разрешить смещение скважин в доступные места на расстояние, не превышающее половины рекомендуемого расстояния между скважинами.

Кроме того, при проведении инженерно-геологических изысканий первого этапа часть скважин под проектируемое здание допускается заменять точками статического / динамического зондирования (до 33%) согласно примечанию 1 к таблице 7.1 из пункта 7.1.7 СП 446.1325800.2019 [2].

Ограждение котлована в большинстве случаев является временным сооружением со значительно меньшими нагрузками и несоизмеримо меньшим сроком эксплуатации, чем капитальные здания и сооружения. Особенно это касается извлекаемых шпунтов. При этом при расстоянии между скважинами под ограждение 20 м сходимости и однозначности интерпретации результатов статического зондирования имеет очень высокую вероятность. Также с точки зрения геотехники при расчете ограждения котлована более важным является то, какой грунт находится вдоль «тела» конструкции, а не ниже нее по глубине.

### Предложения ►

1. Скорректировать формулировку пункта 9.4 СП 22.13330.2016 [1] и представить ее следующим образом: «...геологические разведочные скважины следует размещать по трассе ограждающих конструкций не реже чем через 20 м. При отсутствии фактической возможности расположения скважин указанным образом допускается их смещение с увеличением расстояния между скважинами не более чем в 1,5 раза по сравнению с рекомендуемыми значениями расстояний...».

2. Дополнить пункт 9.4 СП 22.13330.2016 [1] возможностью замены части скважин точками статического зондирования.

## ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ ПОД ПОДПОРНЫЕ СТЕНЫ ►

### Проблема ►

Проблемой является отсутствие в нормативно-технических документах

требований к изысканиям для проектирования указанных сооружений.

В настоящее время при назначении объемов бурения под подпорные стены изыскатели руководствуются методом аналогий. Назначают объемы в соответствии с пунктом 9.4 СП 22.13330.2016 [1], то есть аналогично бурению под ограждение котлована.

Второй вариант – по таблице 7.2 СП 446.1325800.2019 [2] по аналогии с эстакадами для наземных коммуникаций. Данная таблица определяет расстояние между скважинами 100–200 м в зависимости от сложности инженерно-геологических условий и глубину скважин 3–7 м от поверхности земли. Также есть требования таблицы 7.3 СП 446.1325800.2019 [2] к изысканиям под эстакады на участках пересечения водных и других преград. Данная таблица ссылается на требования пунктов 7.2.6 и 7.2.10 в зависимости от типа фундаментов сооружений (то есть на естественном основании или аналогично ограждению котлована – размещение скважин через 20 м и на глубину (1,5h+5,0 м)). При этом однозначного понимания нет, а требования указанных пунктов имеют значительные различия.

### Предложение ►

Дополнить таблицу 7.2 «Размещение и глубина инженерно-геологических скважин на участках трасс линейных сооружений» в СП 446.1325800.2019 [2] однозначными требованиями к изысканиям для проектирования подпорных стен следующим образом: «...в зависимости от сложности инженерно-геологических условий расстояние между скважинами назначается 25–75 м. Глубина выработок должна быть на 2 м больше (ниже) глубины заложения подпорной стены на естественном основании и на 5 м ниже концов свай при свайном основании».

## МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ►

### Проблема ►

Проблемой является сравнение несравнимых величин, определяемых в разных режимах испытаний. На данный момент это крайне болезненная тема в производстве, требующая особого внимания и проработки.

Согласно пункту 5.4.1 ГОСТ 20276.1-2020 «Грунты. Метод испытания штампом» [11] «общее число ступеней давления после достижения давления, соответствующего вертикальному эффективному напряжению от собственного веса грунта на отметке испытания, должно быть не менее четырех».

Согласно пункту 5.5.1 данного стандарта [11] в описании обработки результатов испытаний штампом указаны конкретные требования к расчетному интервалу, а именно: «...за начальное значение давления и осадки принимают давление, равное вертикальному эффективному напряжению от собственного веса грунта на отметке испытания и соответствующую осадку; за конечные значения давления и осадки принимают значения, соответствующие четвертой точке графика на прямолинейном участке...»; «...допускается уменьшение числа точек в расчетном интервале до трех либо применять меньшие ступени давления при испытании».

Изыскатели, как правило, интерпретируют данную формулировку как четыре ступени в расчетном интервале и останавливаются на этом. Требование учитывать нагрузку от сооружения в расчетном интервале отсутствует.

Согласно пункту 7.2.22 СП 446.1325800.2019 [2] это требование все же присутствует, хотя и весьма завуалировано. Формулировка там звучит следующим образом: «Выбор методов определения характеристик грунтов при полевых исследованиях следует устанавливать в соответствии с требованиями 5.8, а также в зависимости от вида и назначения зданий и сооружений, с учетом их уровня ответственности, глубины заложения и типов фундаментов, методов их расчетов, **проектных нагрузок на фундаменты**, условий эксплуатации оснований зданий и сооружений».

В соответствии с пунктом 9.8 ГОСТ 12248.3-2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия» [12] модуль деформации определяется в интервале от  $\sigma_{zg}$  (давления от собственного веса грунта) до  $1,6\sigma_{zg}$ . То есть нагрузка от сооружения снова не учитывается, особенно на малых глубинах непосредственно в основании фундамента, где деформационные показатели особенно важны. Как правило, фундамент закладывают на глубине до 15 м. Иными словами, вертикальное напряжение составляет не более 0,3 МПа, а расчетный интервал модуля деформации составляет от 0,30 до 0,48 МПа.

Более того, формулировка в пункте 9.8 ГОСТ 12248.3-2020 [12] разными лабораториями интерпретируется по-разному. Некоторые лаборатории выбирают любой интервал в пределах от  $\sigma_{zg}$  до  $1,6\sigma_{zg}$ , другие принимают его строго от  $\sigma_{zg}$  до  $1,6\sigma_{zg}$ , не обращая внимания на то, например, что касательная на гра-

фике зависимости относительной деформации от давления стала секущей.

По результатам статического зондирования и согласно приложению А СП 22.13330.2016 [1] деформационные характеристики в целом имеют абстрактный статистический характер, основанный на данных, которые остаются неизменными многие годы.

Как результат, изыскатели получают сравнение несравнимых величин, определяемых в разных режимах. Но выйти из этого положения не представляется возможным, так как согласно СП 22.13330.2016 [1] и СП 446.1325800.2019 [2] для зданий нормального и повышенного уровней ответственности необходимо определять характеристики полевыми и лабораторными методами, а также корректировать их по результатам сопоставления. **При этом не указано, какой способ является приоритетным – штамповое испытание в полевых условиях или испытание методом трехосного сжатия в лаборатории – и какой модуль стоит корректировать по какому. Не указано, в единых ли интервалах должен быть определен модуль деформации грунта или согласно методике ГОСТ.**

Среди изыскателей есть представители с разными взглядами, которые придерживаются диаметрально противополож-

ных точек зрения, каждая из которых имеет обоснование в нормативно-технических документах, но они противостоят друг другу.

Так, для высотных зданий, где нагрузка от сооружения превышает 0,5 МПа, определение модуля деформации при трехосном сжатии в интервале от 0,30 до 0,48 МПа (при глубине котлована 15 м) не несет в себе физического смысла, так как нагрузка от сооружения больше и фактически нет возможности охарактеризовать массив относительно конкретного проектируемого здания. Часто при проведении лабораторных испытаний, особенно для малых глубин с низким бытовым давлением, при нагрузке более 0,4 МПа образец переходит в интервал пластических деформаций, то есть разрушается. Следовательно, не представляется возможным в том числе определить модуль деформации при повторном нагружении ( $E_2$ ).

Представители другого направления взглядов считают, что модуль деформации должен характеризовать грунт в его природном состоянии независимо от того, какие здания на нем проектируются.

Тем не менее графики испытаний методом трехосного сжатия строятся до разрушения и в целом вся кривая поведения грунта имеет цифровой вид и может быть интерпретирована

с получением модуля деформации на любом интересующем участке. Так, для специфических задач проектирования, в том числе для определения модуля деформации грунта с учетом высоких нагрузок от сооружения, могут быть взяты различные участки на кривой деформации и использоваться в расчетах.

Другой вариант: при разрушении образцов одного инженерно-геологического элемента ранее, чем будет достигнута нагрузка от сооружения, в отчете по инженерно-геологическим изысканиям дают рекомендацию о рассмотрении принятия другого вида фундамента, например свайного.

### Предложение ►

Привести к единообразию расчетные интервалы определения модуля деформации для полевых и лабораторных методов, а также определить приоритетный метод для корреляции.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Авторы выражают надежду, что их предложения по корректировке действующих нормативно-технических документов, используемых при изысканиях для строительства, не останутся без внимания, найдут поддержку в профессиональном сообществе и в скором времени соответствующие поправки будут внесены. **И**

### ИСТОЧНИКИ ►

1. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.
2. СП 446.1325800.2019. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
3. Постановление Правительства Москвы № 214-ПП от 26 марта 2002 года «О Перечне улиц и магистралей города Москвы» // Вестник мэрии Москвы. 2002. Апрель.
4. ПНСТ 542-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования.
5. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги.
6. ГОСТ 20276.2-2020. Грунты. Метод испытания радиальным прессиометром.
7. ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.
8. СНиП II-15-74. Основания зданий и сооружений.
9. ГОСТ 20522-2012. Методы статистической обработки результатов испытаний.
10. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.
11. ГОСТ 20276.1-2020. Грунты. Метод испытания штампом.
12. ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия.

### REFERENCES ►

1. SP 22.13330.2016. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy [Foundations of buildings and structures].
2. SP 446.1325800.2019. Inzhenerno-geologicheskiye izyskaniya dlya stroitel'stva. Obshchiye pravila proizvodstva rabot [Engineering-geological surveys for construction. General rules for the production of works].
3. Postanovleniye Pravitel'stva Moskvyy № 214-PP ot 26 marta 2002 goda «O Perechne ulits i magistralej goroda Moskvyy» [Decree of the Government of Moscow № 214-PP dated March 26, 2002 "On the List of streets and highways of the city of Moscow"] // Vestnik merii Moskvyy. 2002. Aprel'.

4. PNST 542-2021. Dorogi avtomobil'nyie obshchego pol'zovaniya. Nezhestkiye dorozhnyie odezhdyy. Pravila proyektirovaniya [Public automobile roads. Non-rigid road pavements. Design rules].
5. SP 34.13330.2012. Avtomobil'nyie dorogi [Motor roads].
6. GOST 20276.2-2020. Grunty. Metod ispytaniya radial'nym pressiometrom [Grounds. Test method with a radial pressuremeter].
7. GOST 20276-2012. Grunty. Metody polevogo opredeleniya harakteristik prochnosti i deformiruyemosti [Grounds. Methods for field determination of strength and deformability characteristics].
8. SNIP II-15-74. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy [Foundations of buildings and structures].
9. GOST 20522-2012. Metody statisticheskoy obrabotki rezul'tatov ispytaniy [Methods of statistical processing of test results].
10. SP 47.13330.2012. Inzhenernyie izyskaniya dlya stroitel'stva. Osnovnyie polozheniya [Engineering surveys for construction. Basic provisions.].
11. GOST 20276.1-2020. Grunty. Metod ispytaniya shtampom [Grounds. Test method by a stamp].
12. GOST 12248.3-2020. Grunty. Opredeleniye harakteristik prochnosti i deformiruyemosti metodom trehosnogo szhatiya [Grounds. Determination of strength and deformability characteristics by the triaxial compression method].

#### Информация об авторах

##### ЯКУШЕВ ИВАН ВЛАДИМИРОВИЧ

Руководитель отдела инженерно-геологических изысканий ГК «Олимпроект», г. Москва, Россия

##### СУРИНА ОЛЬГА ИГОРЕВНА

Главный специалист-геолог отдела инженерно-геологических изысканий ГК «Олимпроект», г. Москва, Россия

#### Information about the authors

##### IVAN V. YAKUSHEV

Head of the Engineering-Geological Survey Department, GK "Olimproekt", Moscow, Russia

##### OL'GA I. SURINA

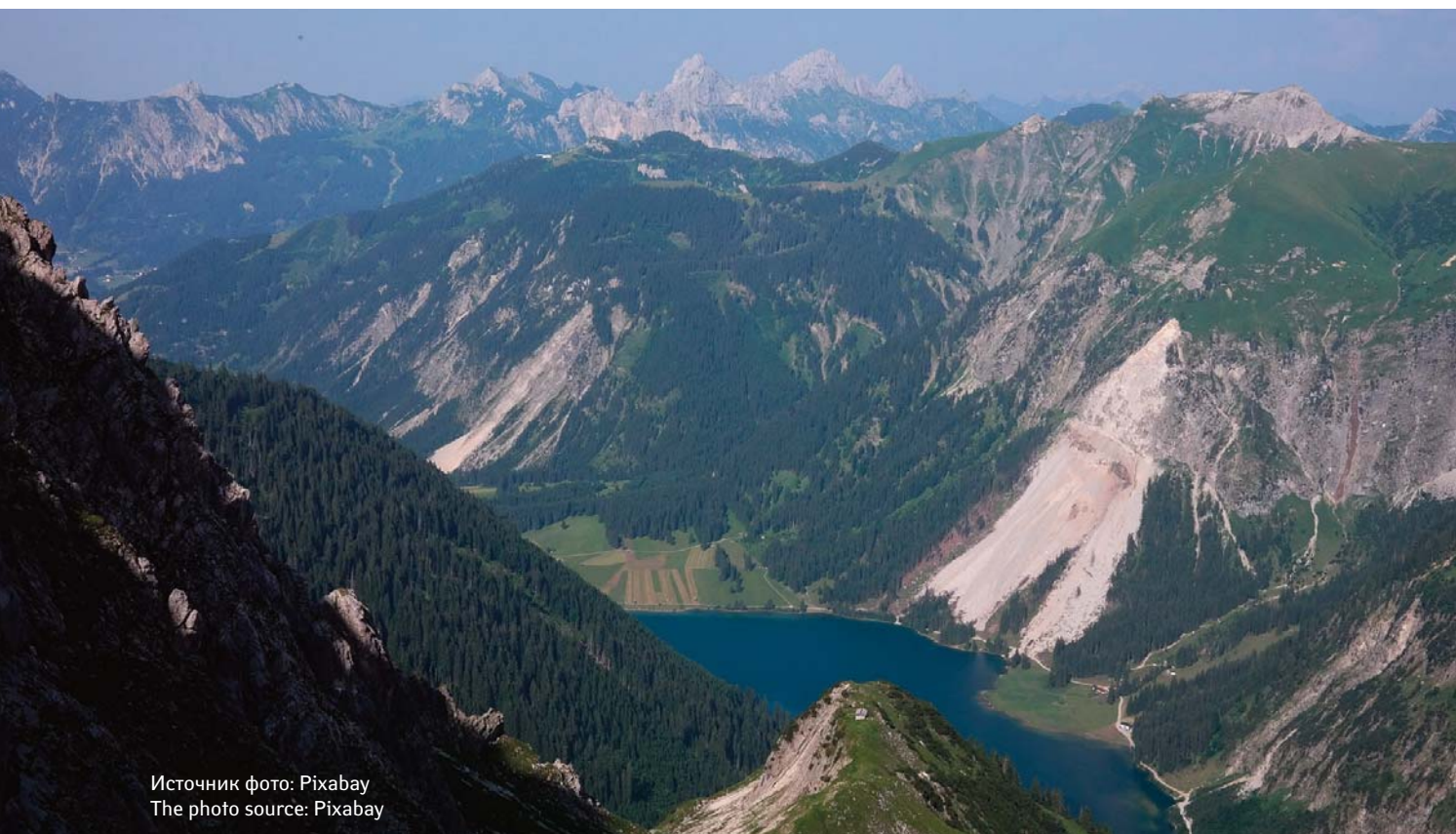
Chief specialist (Geology) of the Engineering-Geological Survey Department, GK "Olimproekt", Moscow, Russia

Независимый электронный журнал  
**ГеоИнфо**

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



**WWW.GEOINFO.RU**



Источник фото: Pixabay  
The photo source: Pixabay

# ОБ УЧЕТЕ ВТОРИЧНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ В НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТАХ

Обзорная статья

Поступила в редакцию 18.01.2023. Принята к публикации 27.02.2023.

© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2023

**МИРОНЮК С.Г.**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия  
Адрес: Россия, 119991, г. Москва,  
Ленинские горы, д. 1

## АННОТАЦИЯ

К разрушению зданий и сооружений часто приводят не сами землетрясения, а их вторичные эффекты – цунами, подтопления, сейсмогенные смещения вдоль разломов, разжижение грунтов, оползни (в том числе обвалы), лавины и пр. Хорошо известно, что при проектировании и строительстве зданий и сооружений в сейсмоопасных районах суши необходимо оценивать опасность таких сейсмогенных процессов и явлений. В данной статье дается краткий обзор проблемы учета вторичных последствий землетрясений при детальном сейсмическом районировании и микрорайонировании суши и акваторий в нормативно-методических документах. Особое внимание обращается на оценку сейсмической опасности акваторий, в том числе на необходимость более детального изучения еще слабо исследованной динамики извержений морских грязевых вулканов и выявления ее связи с землетрясениями.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

сейсмическая опасность акваторий; грязевые вулканы; землетрясения.

## ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Миронюк С.Г. Об учете вторичной сейсмической опасности в нормативно-методических документах // Геоинфо, 2023, № 1, С. 28–46  
doi:10.58339/2949-0677-2023-5-1-28-46

# ON THE CONSIDERATION OF SECONDARY SEISMIC HAZARD IN REGULATORY AND METHODOLOGICAL DOCUMENTS

Review paper

Received 18.01.2023. Accepted 27.02.2023.

© Independent electronic journal "GeoInfo", 2023

**SERGEY G. MIRONYUK**

Lomonosov Moscow State University,  
Moscow, Russia, va-korolev@bk.ru  
Address: 1 Leninskiye Gory, Moscow,  
119991, Russia

## ABSTRACT

**It is not earthquakes themselves that often lead to the destruction of buildings and structures, but their secondary effects such as tsunamis, flooding, seismogenic displacements along faults, soil liquefaction, landslides (including collapses), avalanches, etc. It is well known that in the design and construction of buildings and structures in seismically hazardous land areas, it is necessary to assess the hazards of such seismogenic processes and phenomena. This paper provides a brief overview of the problem of taking into account the secondary consequences of earthquakes in detailed seismic zoning and microzoning of land and water areas in regulatory and methodological documents. Particular attention is paid to assessing the seismic hazards of water areas, including to the need for more detailed studies of the still poorly studied eruption dynamics of marine mud volcanoes and for revealing the relationship between the eruption dynamics and earthquakes.**

## KEYWORDS:

**water area seismic hazards; mud volcanoes; earthquakes.**

## FOR CITATION:

**Mironyuk S.G. Ob uchete vtorichnoy seismicheskoy opasnosti v normativno-metodicheskikh dokumentah [On the consideration of secondary seismic hazards in regulatory and methodological documents] // GeoInfo, 2023, № 1, S. 28–46 doi:10.58339/2949-0677-2023-5-1-28-46(in Rus.).**

## Введение ▶

Как показывает практика эксплуатации зданий и сооружений в сейсмичных районах, их разрушение часто происходит не от колебаний грунтов в основаниях конструкций, а от так называемых вторичных эффектов сильных землетрясений (цунами, сейсмогенных смещений вдоль разломов, разжижения грунтов, оползней, в том числе, обвалов, и др.). Известны многочисленные случаи, когда именно вторичные геологические процессы и явления вызывали большой материальный и социальный ущерб при землетрясениях [1–3]. В этой связи нельзя не упомянуть работу Г.Л. Коффа и Е.В. Рюминой [4], в которой отмечалось, что «масштабы последствий вторичных воздействий соизмеримы с последствиями самого землетрясения».

Максимально полный список «сухопутных» вторичных сейсмогенных процессов и явлений и перечень нормативно-методических документов, предписывающих их изучение, приведен в ра-

боте С.Н. Никитина и др. [5]. Анализ этого списка показал, что в настоящее время при проектировании и строительстве зданий и сооружений в сеismoопасных районах суши необходимо оценивать опасность следующих сейсмогенных процессов и явлений: оползней в том числе, обвалов, разжижения грунтов, лавин, подтопления и цунами.

Цель данной статьи – привлечь внимание специалистов прежде всего к проблеме оценки сейсмической опасности акваторий, в частности к изучению еще слабо исследованной динамики извержений морских грязевых вулканов и выявлению ее связи с землетрясениями.

## Вопросы терминологии ▶

Извержения разжиженных осадков различного состава из образующихся во время сильного землетрясения сейсмогенных разрывов и трещин или из раскрывшихся ранее возникших структур прорыва флюидов создают на местности разнообразные флюидогенные формы рельефа (формы рельефа на поверх-

ности литосферы, возникающие в результате напорной восходящей миграции холодных флюидов) [6] – чаще в виде сейсмогенных грязевых сопки, грифонов и кратерообразных провалов (для обозначения этих форм Э.А. Штебером был предложен термин «вулканоиды») [7]. Эти формы по большей части проявляются в водонасыщенных аллювиальных, озерных и морских отложениях. Вулканоиды – приповерхностные образования, формирующиеся под действием гидравлических ударов, которые сопровождаются выбросами воды и дисперсных грунтов (песка, супесей, суглинков, режее гальки) [8].

Одними из характерных флюидогенных явлений, сопутствующих сильным землетрясениям, являются грифоны (в статьях для них часто используют названия «грязевые вулканчики», «вулканоиды») (рис. 1.).

Согласно справочнику [9] «грифон» – это мелкий вторичный эруптивный аппарат на грязевой сопке (сальзе, мелком грязевом вулкане), выделяю-



**Рис. 1.** Грифон высотой 2,5 м в кальдере грязевого вулкана Бахар в Республике Азербайджан (фото С.Г. Миронюка, 2022 г.)

ший грязь или воду, или газ, или все это одновременно в небольших количествах. Приурочены грифоны в основном к участкам распространения голоценовых водонасыщенных дисперсных осадков (глин, суглинков, песков) [10], способных разжижаться при динамических воздействиях, в частности при 6–7-балльных землетрясениях и более ( $M \geq 5-6$ ). При этом образуются грифоны в виде, как правило, конических микроформ рельефа. Согласно трактовке авторов работы [11] «Грифоны – в общем случае это мелкие эруптивные аппараты выброса из недр на дно моря подземных флюидов (нефтей, газов, пластовых вод). Они являются одной из форм инъективных дислокаций, которые возникают в результате внедрения из глубоких частей земной коры в вышележащие ее горизонты пластичных горных масс в виде указанных флюидов, разжиженных глин, толщ каменной соли, магматических расплавов и т. п.».

На поверхности земли в пределах грязевулканических полей грифоны образуют непрерывный морфологический ряд от высоких конусообразных с крутыми склонами до низких котлообразных с пологими склонами. В зависимости от диаметра подводящего канала меняются и их поперечные размеры.

Здесь уместно сделать одно принципиально важное замечание. Кроме типичных грязевых вулканов (сложных флюидогеодинимических систем [12]) с глубокими корнями в различных регионах мира [13, 14] в плейстосейстовых областях сильных землетрясений

часто возникают приповерхностные так называемые сейсмовулканоиды, грязевые вулканчики, грязевулканические проявления, морфологически сходные с классическими грязевыми вулканами, но отличающиеся от них механизмами образования, размерами, масштабами, частотой излияний, продуктами извержений и пр. Как справедливо отмечает Панахи Б.М.-О. [14], такие образования являются следствием «выдавливания на поверхность земли грязи и песка с образованием песчаных фонтанов и характерных разливов водопесчаных смесей и др. в результате землетрясения преимущественно в областях с отсутствием грязевых вулканов». Так называемые сейсмовулканоиды не являются собственно грязевыми вулканами, но относятся наряду с последними к одной и той же аккумулятивной подгруппе флюидогенных структур [6].

При выполнении буровых работ могут возникнуть техногенные грифоны в случае неконтролируемого выброса флюидов (blowout) из пластов, когда пластовое давление значительно превышает гидростатическое давление бурового раствора, что может привести к разрушению оборудования, пожару, взрыву, загрязнению окружающей среды и гибели людей [15]. Неконтролируемые выбросы из скважин являются наиболее опасными источниками загрязнений морской среды [16]. Риск возникновения техногенных грифонов возникает также в случае, когда внутрискважинное давление превышает давление гидроразрыва горных пород [17].

В терминологическом словаре [18] дано следующее определение этого термина: грифоны – это «фонтанные газо-, нефте- и водопроявления вскрытых пластов, выходящие на поверхность за пределами устья скважины по трещинам, высокопроницаемым пластам или контакту цемент-порода». Под влиянием проходящего через осадочный чехол потока газа (газонасыщенных пластовых вод) в морях часто благодаря процессу псевдооживления образуются кратеры (техногенные покмарки), диаметр которых иногда достигает несколько десятков и даже сотен метров. Особую опасность они представляют для сооружений стационарного типа, опирающихся на дно. Образование больших кратеров вблизи опорных блоков, свайных оснований может привести к опрокидыванию и гибели платформ.

### Краткое описание истории развития шкал интенсивности землетрясений ▶

Становление сейсмического районирования, как и инженерной сейсмологии, можно отнести к концу XIX – началу XX века. В России геологические основы этой области научных знаний заложили И.В. Мушкетов и А.Н. Орлов. Стал классическим их труд «Каталог землетрясений Российской империи» с подробным описанием последствий землетрясений и извержений вулканов, в том числе грязевых (Апшеронский и Таманский полуострова) [19].

В указанное время уже была разработана первая макросейсмическая шкала (10-балльная шкала Росси – Фореля), позволяющая оценивать интенсивность землетрясений. Позже в России один из основоположников отечественной сейсмологии академик Б.Б. Голицын разработал оригинальную макросейсмическую шкалу, в которой ускорение и сила землетрясения определялась по опрокидыванию стоявших параллелепипедов разных размеров. Он впервые обосновал задачу использования записей ускорений для расчета сейсмических нагрузок на сооружения и для разработки конструктивных решений, повышающие их сейсмостойкость. Б.Б. Голицын отмечал сильное влияние свойств подпочвенных грунтов на записи приборов и предположил возможность триггерных эффектов землетрясений [20].

В дореволюционной России в начале прошлого века было выполнено приближенное определение сейсмической опасности некоторых регионов [2]. Оценки силы землетрясений на земной

поверхности первоначально осуществлялась с использованием шкалы Росси – Фореля, а с 1933 года – 12-балльной международной шкалы MCS (шкалы МКЗ-17 – Меркалли, Канкани, Зиберга). Эту шкалу взяли за основу Г. Вуд и Ф. Ньюман (1931 г.) для разработки модернизированной шкалы Меркалли (ММ-31). Госпланом СССР в 1933 году в качестве общесоюзного стандарта был принят усовершенствованный вариант шкалы ММ-31 в соответствии с ОСТ ВКС-4537 «Единые нормы строительного проектирования. Шкала для определения силы землетрясения». В 1952 году в Геофизическом институте АН СССР С.В. Медведевым было закончено составление новой макросейсмической шкалы, первоначально получившей название ГЕОФИАН, а позже – «шкала Института физики Земли» («шкала ИФЗ АН СССР»). В качестве государственного стандарта (по ГОСТ 6249-52) наиболее важный для практики диапазон этой шкалы от 6 до 9 баллов был утвержден Госстроем СССР для обязательного применения. В 1964 году в результате проведения специальных исследований в области инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства была создана международная шкала сейсмической интенсивности MSK-64, а «Шкала для определения силы землетрясения в пределах от 6 до 9 баллов» была отменена [21]. В 1973 году шкала MSK-64 была уточнена. В это же время В.П. Солоненко создал первую, по существу региональную, шкалу балльности по сейсмодислокациям для интервала событий от 8 до 12 баллов по шкале MSK-64 [22].

Позднее С.В. Медведев разработал шкалу MSK-78, а в 1986 году при участии Ф.Ф. Аптикаева была подготовлена модернизированная шкала MSK – MMSK-86. Впоследствии и она с учетом новых данных была усовершенствована и названа MMSK-92 [23]. Эта шкала легла в основу региональной шкалы сейсмической интенсивности (РШСИ) [24]. Зона действия этой региональной шкалы охватывает Прибайкалье и Забайкалье. Исходя из условий указанных регионов предусмотрено принимать во внимание четыре вида экзогенных процессов: карстовый, оползневый, просадочный и мерзлотный. В 1998 году шкала MSK-64 была заменена Европейской макросейсмической шкалой EMS-98, а EMS-98, в свою очередь, – Европейской шкалой интенсивности ESI-2007.

Наиболее полно вторичные опасности землетрясений на суше отражают

новая шкала интенсивности землетрясений ЕЕЕ (Earthquake Environmental Effects), разработанная А. Микетти, Р.Э. Татевосяном, Е.А. Рогожиным и др. [25] и упомянутые выше ГОСТ Р 57546-2017. «Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности» и ГОСТ 34511-2018 «Макросейсмическая шкала интенсивности землетрясений». При обосновании проекта создания последнего из упомянутых выше документов его авторы отмечали, что макросейсмическая шкала необходима для:

- «назначения интенсивности произошедшего землетрясения;
- районирования территорий по сейсмической опасности;
- определения расчетной сейсмичности и назначения сейсмических нагрузок;
- разработки сценариев вероятных последствий землетрясений, задаваемых интенсивностью, и соответствующих оценок сейсмического риска» [26].

Объектом стандартизации вышеупомянутых ГОСТ Р 57546-2017 и ГОСТ 34511-2018, по замыслу их авторов, является сила землетрясения, измеряемая его интенсивностью по макросейсмическим данным, а базовыми аспектами стандартизации являются сенсоры. Наибольший интерес для нас в контексте данной статьи представляет категория-сенсор «Природные явления» и наблюдаемые в ней эффекты землетрясения. В частности, в приложении Д этого документа отмечается, что уже при 6-балльном землетрясении возможны разжижение грунтов и выброс водонасыщенных песков, а при 8-балльном – наблюдается выброс водонасыщенных песков с образованием грязевых и песчаных фонтанчиков (грифонов).

Согласно первой из упомянутых шкал так называемые вибрационные сейсмодислокации (грязевые сопки, грифоны, покровы разжиженного песка и грязи, кластические дайки) также характерны для эпицентральных зон сильных землетрясений (7–8 баллов и более). В частности, при 9-балльном землетрясении образуются песчаные грифоны до 3 м в диаметре, возникают просадки (осадки) величиной более 30 см. Эмпирически установлено, что первичные сейсмодислокации (например, поверхностное разрывообразование) возникают при землетрясениях с магнитудой  $M_w=5$ , а вторичные (например, оползни в рыхлых грунтах) – начиная с  $M_w=4$  [27].

## Реакция геофлюидных систем на сильные сейсмические воздействия ▶

С учетом цели настоящей статьи особый интерес представляет макросейсмическая составляющая шкал. Так, согласно шкале ММ-31 при разрушительном сейсмическом воздействии наблюдаются «выбросы в небольших количествах песка и глинистых масс». В случае опустошительного землетрясения отмечается разжижение грунтов. При более сильном землетрясении (уничтожающем) фиксируются оползни и обвалы на склонах. В приложении к этой шкале (в разделе II «Остаточные явления в грунтах, изменение режима грунтовых и наземных вод») даны следующие признаки землетрясений в зависимости от их силы в баллах (выборочно):

- 6 баллов: в горных районах – единичные случаи оползней и осыпания грунтов;
- 7 баллов: большое количество трещин в сырых грунтах; в горных районах – небольшие оползни и осыпание грунтов;
- 8 баллов: большие осыпания, оползни и горные обвалы;
- 9 баллов: горные обвалы, много оползней, небольшие грязевые извержения.

Рассмотрим несколько сейсмических событий, при которых происходило разжижение грунтов и образование флюидогенных форм. С.В. Медведев в своей работе [2] описывал грифоны, возникшие при 9-балльном землетрясении. Они представляли собой «весьма распластанные конусообразные наносы тонкозернистого песка с одним или несколькими кратерами. Диаметр кратера равен 10–15 см, диаметр конуса – 2–5 м, высота конуса – 20–50 см». При Олекминском землетрясении с магнитудой  $M_s=6,5$ , произошедшем 14.09.1958 в среднем течении реки Олекма на юге Якутии, на расстоянии 180 км от эпицентра в районе с горячими источниками образовался грифон высотой до 25 м (эта величина вызывает у автора настоящей статьи сомнения, поскольку согласно классификации грязевулканических проявлений [28] характерная высота грифонов составляет 1–3 м), что, как предполагают авторы книги [29], связано с гидрогеологическими особенностями района.

В монографии Е.А. Рогожина [30] приведено множество примеров возникновения сейсмодислокаций, причиной образования которых были землетрясения различной интенсивности:

- Ашхабадское землетрясение 1948 года ( $M=7,3$ ): грязевые вулканы диаметром до 20 м и высотой 0,5 м (названные размеры вызывают у автора настоящей статьи сомнения, поскольку высота наземных грязевых вулканов, как правило, составляет 10–400 м, а диаметр – 100–3500 м [28]) с небольшими кратерами;

- Бурунское землетрясение 1984 года, эпицентр которого располагался в районе бывшего дна Каспийского моря ( $M=6,0$ ): следы выбросов разжиженного песка, воронки, осадки грунта;

- Зайсанское землетрясение 1990 года ( $M_{\text{ЛН}}=6,9-7,0$ ): грязевые и водно-песчаные выбросы из трещин и грязевых вулканов (последний термин вызывает у автора настоящей статьи сомнения);

- Газлийское землетрясение 1984 года ( $M=7,2$ ): грифоны, структуры разжижения грунта.

Сейсмодислокации возникли при Чуйском землетрясении 27.09.2003 ( $M=7,5$ ). Оно также сопровождалось возникновением трещин в рыхлом чехле долины реки Чуя, выбросами разжиженного песка и грязи в виде так называемых грязевых вулканчиков [31], а также по простиранию трещин – своеобразных воронок всасывания, образовавшихся после грязевых излияний из бугров пучения глубиной до 1–1,5 м и диаметром не более 1,5 м [32].

При Нефтегорском землетрясении 27.05.1995 ( $M=7,5$ ) в местах излияния обводненных песчано-глинистых масс на земной поверхности образовались многочисленные кратерообразные провалы диаметром до 25–30 м и блюдцеобразные впадины [33]. Отмечалось, что вторичные проявления этого землетрясения (трещины, осадки грунтов и др.), в том числе и за пределами эпицентральной зоны, еще до конца не изучены [34].

Как показал анализ результатов макросейсмических обследований на территории юга Сибири и Монголии, во время землетрясений с  $M_s=4,1-8,1$  наиболее часто проявляются склоновые процессы, сейсмопросадки, разрывообразование и разжижение грунтов [35].

При Бурунском землетрясении 1984 года в Туркменистане ( $M=6$ ) в локальных понижениях микрорельефа происходил интенсивный выброс водопесчаных масс с крупным щебнем, возникали грязевые вулканы [36].

Большой интерес с точки зрения вторичных эффектов представляют результаты макросейсмического обследования последствий Олюторского землетрясе-

ния ( $M_w=7,6$ ), произошедшего 20 (или 21) апреля 2006 года на Корякском нагорье. В плейстосейстовой зоне этого события наблюдались: разжижение грунта, сейсмогенные трещины, трещинные излияния воднопесчаной смеси, протяженные валы песчаного грунта, грифоны, грязевые фонтаны [37, 38]. Последние наблюдались и в береговой зоне. Расстояние от эпицентра, на котором максимально проявился процесс разжижения грунтов, составило 105 км. Разжижение грунтов сопровождалось фонтанированием и выбросом из трещин песка, мелкой гальки, щебня.

Следует подчеркнуть, что береговые зоны водоемов, характеризующиеся чрезвычайно контрастными инженерно-геологическими условиями, специфическим напряженно-деформированным состоянием, являются участками повышенной сейсмической опасности [39]. В такой обстановке при прохождении продольных и поперечных волн возникают дополнительные нормальные и касательные напряжения, изменяющиеся во времени. Наиболее значительны эти изменения «на контактах пород с различными деформационными свойствами, вблизи разрывных нарушений или поверхности склона...» [40]. Анализ последствий значительного количества землетрясений показал, что повреждения трубопроводов чаще всего возникают именно на участках, которые отличаются резкими изменениями природных условий [41, 42]. Например, в береговой зоне острова Сахалин после сильных землетрясений наблюдались следующие остаточные деформации: трещины шириной более 20 см и длиной до 100 м, выбросы разжиженного грунта с образованием грифонов, оползни и обвалы грунта [43]. С точки зрения возникновения сейсмогенных обвалов и других видов оползней особенно опасны береговые зоны с высокими крутыми клифами, широко развитыми, например, на Черноморском побережье Кавказа. Показано [44], что при сейсмическом воздействии интенсивностью 7 баллов на склон с наклоном поверхности  $50^\circ$ , сложенный выветрелыми трещиноватыми аргиллитами, вероятность развития оползневого процесса ( $K_{\text{уст}} < 1$ ) составляет 100%.

В пределах аккумулятивных берегов в случае повышенной мощности песков (более 5 м) в сухопутной части береговой зоны возрастает опасность сейсмического разжижения. В таких условиях происходит полное разжижение даже крупнозернистых песков [45].

В береговых зонах морей и в долинах рек во время сильных землетрясений не раз наблюдались косейсмические поднятия и опускания отдельных участков местности. Например, во время новомадридских землетрясений 1811–1812 гг. ( $M \approx 7,2-8,2$ ) вдоль долины реки Миссисипи отмечались обширные поднятия и погружения отдельных участков местами более чем на 6 м, а также разжижение и выбросы песка из трещин. Такое еще слабо изученное явление имело место и при Невельском землетрясении 02.08.2007 ( $M=6,8$ ). Это сейсмическое событие вызвало поднятие дна в зоне протяженностью не менее 5,5 км и интенсивные выходы газа. Максимальная амплитуда поднятия составила около 1–1,5 м [46]. При Среднебайкальском землетрясении 29.08.1959 ( $M=6,8$ ) дно Байкала в эпицентре опустилось на 10–15 м [47]. Признаки нескольких эпизодов косейсмических опусканий и поднятий были выявлены на южном побережье Камчатки. В частности, Камчатское землетрясение 1952 года ( $M_w \approx 9,0$ ) сопровождалось опусканием берега примерно на 1–1,5 м. А при землетрясении, которое произошло там около 600 г. н. э., берег опустился на 1,5–2,0 м. Все обнаруженные опускания на побережьях сопровождались волнами цунами [48].

### **Требования по учету вторичных сейсмических опасностей при детальном сейсмическом районировании (ДСР) и сейсмическом микрорайонировании (СМР) ►**

Помимо использования данных о вторичных эффектах землетрясений в эпицентральной области для экспертной оценки их максимальной силы стандартами по ДСР предписано учитывать эти эффекты для выделения зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ) и для выбора районов, пунктов размещения и площадок строительства зданий и сооружений.

Так, в документе 50-SG-S1 «Руководство по безопасности. Учет землетрясений и связанных с ними явлений при выборе площадок для атомных станций» (МАГАТЭ, 1981) указано, что при проектировании АЭС, определяя пригодность площадки для размещения объекта, необходимо изучить: сейсмогенные разрывы, карстовые явления, неустойчивость склонов, разжижение и просадки грунта.

В РСМ-73 «Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию» рекомендовано по завершению СМР под-



готовить геоморфологическую карту с выделением участков развития процессов, «активизирующихся в результате сейсмических воздействий, – участков повышенной просадочности, активного карста, заболоченных участков, обвалов, осypей, оползней, территорий, расположенных над активными тектоническими нарушениями и др.».

В «Рекомендациях по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства» (М., ПНИИИС. 1985), предлагается особое внимание при СМР уделять изучению динамически неустойчивым грунтам (лессам, илам, водонасыщенным пескам и т. д.), а также склоновым процессам (обвалам, оползням, оседанию поверхности и провалам над карстовыми пустотами, подземными выработками).

Исследования вторичных природных явлений и воздействий при ДСР и СМР в настоящее время предписаны целым рядом сводов правил, подготовленных в основном специалистами Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта, АО «ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева», ООО «ПОЙСК» и др.

В СП 269.1325800.2016 «Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила уточнения исходной сейсмичности и сейсмического микрорайонирования» (п. 4.11) указано, что материалы работ по оценке опасности землетрясений должны содержать информацию о «возможных сейсморазрывах, обвалах, оползнях, селях, лавинах, водно-песчаных потоках, разжижении грунта и других явлениях, обусловленных подземными толчками расчетной силы». В данном документе приведено определение термина «водно-песчаные потоки»: это «потоки донных отложений, образующиеся на подводных склонах при землетрясении. Могут возникать также на береговых склонах рек, озер, водохранилищ, сложенных слабыми водонасыщенными песками».

В СП 286.1325800.2016 «Свод правил. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования» отмечается: «К опасным явлениям относятся: собственно сейсмические сотрясения; вторичные эффекты (порожденные землетрясением гравитационные и вибрационные трещины, оползни, обвалы, осypи, каменные лавины, выбросы разжиженных грунтов и проседания земной поверхности)». Кроме того, к опасным явлениям отнесены возникающие при сильных землетрясениях

косейсмические площадные опускания и поднятия обширных участков земной поверхности.

На необходимость учета первичных и вторичных палеосейсмодислокаций (сейсмогенных оползней, обвалов, осypей, каменных лавин, выбросов разжиженных грунтов и проседаний земной поверхности) при ДСР и СМР для целей территориального планирования имеются указания в СП 408.1325800.2018 «Детальное сейсмическое районирование и сейсмомикрорайонирование для территориального планирования» (2019 г.).

В СП 369.1325800.2017 «Платформы морские стационарные. Правила проектирования» (п. 7.6.3) имеется важное требование относительно составления сеймотектонической модели сейсмического района расположения морских платформ. Эта модель должна включать в себя карту и характеристики основных зон ВОЗ, а также сведения о наличии или отсутствии активных разломов, о возможности склоновых смещений большого объема и об их параметрах. Аналогичное требование содержится в СП 504.1325800.2021 «Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования» (п. 6.1.19.3): «Для площадок (трасс) размещения сооружений должны быть приведены сведения о наличии или отсутствии на площадке (трассе) активных разломов, подвижки по которым могут непосредственно затронуть сооружение, а также о возможности образования сейсмогенных подводных оползней и мутьевых потоков, угрожающих сооружениям».

Пожалуй, наиболее полный на сегодня список сейсмогенных природных процессов содержится в нормативно-методических документах, разработанных для проектирования и строительства атомных электростанций. Среди них:

- НП-064-05 «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии» (Ростехнадзор, М., 2005. 23 с.);
- РБ-019-01 «Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационно-опасных объектов на основании геодинамических данных» (утв. постановлением Госатомнадзора России № 16 от 28.12.2001);
- РБ-019-18 «Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка исходной сейсмично-

сти района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях» (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 90 от 02.03.2018).

В этих документах кроме широко распространенных учитывается ряд природных процессов с очень малой вероятностью (частотой) проявлений. И это вполне объяснимо, поскольку согласно рекомендациям Международного агентства по атомной энергии (IAEA Safety Standards Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Specific Safety Guide № SSG-9. IAEA, 2010) при вероятностном анализе безопасности АЭС может потребоваться учет очень редких сейсмических событий [49]. К числу таких событий можно отнести также возникновение вторичных сейсмических опасностей в форме следующего каскада процессов и явлений: сильное землетрясение → крупный оползень (обвал, каменная лавина) → завальное озеро → прорывной паводок → сель (рис. 2.). Именно по такому сценарию развивались природные процессы в долинах рек Баксан, Сулак и др. [30].

Среди подобных процессов и явлений наибольшую опасность представляют те, которые имеют синергетический эффект (примеры таких сценариев приведены в работах [43, 50]). И хотя вероятность таких процессов и явлений мала, их необходимо учитывать при размещении зданий и сооружений повышенной уровня ответственности.

### **Требования по учету вторичных процессов и явлений при оценке сейсмической опасности дна акваторий ▶**

Проблема оценки сейсмической опасности морского дна возникла в связи с разработкой проектов освоения месторождений углеводородов в Каспийском, Охотском, Печорском, Баренцевом, Карском, Охотском морях и со строительством подводных трубопроводов, например «Голубого потока». Технико-экономическое обоснование (ТЭО) строительства указанного трубопровода было выполнено на основе норвежских «Правил для морских трубопроводных систем» (DNV 1981 и DNV 1996 “Rules for Submarine Pipeline System”, Det Norske Veritas, 1996). В указанных и принятых позже документах (DNV-OS-F101 “Offshore standard. Submarine pipeline systems”, Det Norske Veritas, January 2000; СТО Газ-



**Рис. 2.** Завальное озеро в 60 км к северо-востоку от Катманду (Непал). Образовалось 2 августа 2015 года в результате перекрытия долины реки Санкоши грандиозным оползнем объемом около 50 млн м<sup>3</sup> (фото С.Г. Миронюка, 2016 г.)

пром 2-3.7-050-2006 «Морской стандарт DNV-OS-F101. Подводные трубопроводные системы», 2006 г.) предписано рассмотреть опасность землетрясений в районе строительства и «вероятность сдвигов грунта или разжижения в результате повторного действия нагрузок».

Наиболее общим отечественным документом, где обозначается требование выполнения в составе инженерных изысканий СМР, является СП 47.13330.2016 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП 11-7-81\*». В этом документе имеется указание на необходимость учета при СМР грунтов, склонных к разжижению при сейсмических воздействиях (грунтов IV категории по сейсмическим свойствам по таблице 4.1 данного СП). Площадки строительства, сложенные динамически неустойчивыми грунтами, а также с оползнями, обвалами, карстовыми проявлениями и т. д. являются согласно рассматриваемому своду правил неблагоприятными в сейсмическом отношении. В данном СП есть также указание на необходимость учета возможности «сейсмогенных подвижек по разломам и проявления вторичных эффектов, связанных с сейсмичностью, таких как активизация оползневых процессов и разжижение грунтов» (п. 6.3.3.14).

В СП 504.1325800.2021 «Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие тре-

бования» в качестве подлежащих изучению сейсмогенных событий упомянуты смещения по активным разломам, подводные оползни, мутьевые потоки. В этом своде правил содержится указание о необходимости характеристики развития грязевулканических процессов и явлений, динамической устойчивости грунтов.

Более конкретные указания на необходимость учета при оценке сейсмической опасности опосредованных последствий землетрясений содержатся также в ГОСТ Р 57123-2016 (ИСО 19901-2:2004) «Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Проектирование с учетом сейсмических условий» (2019 г.) и в СП 504.1325800.2021 «Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования». В указанном ГОСТ к таким последствиям отнесены: разжижение грунта, оползни, смещения вдоль разломов, цунами, грязевые вулканы. В отношении последних там сказано: «В местах ранее существовавших разломов могут быть грязевые вулканы. Данные геологические объекты не являются прямым следствием землетрясений, скорее они используют зону разлома для выноса газа, воды и грязи на поверхность морского дна, таким образом создавая вулканоподобный рельеф. Лучший способ предупреждения подобных опасностей – располагать мор-

ские сооружения вне указанных зон». Здесь следует отметить, что вынос флюидов может осуществляться как по уже существующим разрывным нарушениям (зонам повышенной трещиноватости), так и по разрывным смещениям, возникающим в результате движения диапировых структур или в результате флюидоразрыва. Последний механизм особенно характерен для закрытых флюидодинамических систем компрессионного типа. Такая система характеризуется, как правило, аномально высоким пластовым давлением флюидов.

Что касается размещения морских сооружений вне грязевулканических областей, порой это требование, особенно в отношении линейных сооружений, трудновыполнимо. Грязевые вулканы, как правило, группируются в грязевулканические провинции, поля разной площади. Обходить районы сосредоточения грязевых вулканов значительных размеров экономически нецелесообразно. Более того, грязевые вулканы, как известно, являются индикаторами нефтегазоносности недр [51]. Например, свыше 70% всех месторождений нефти и газа в Южно-Каспийском нефтегазоносном бассейне, в том числе все гигантские из них, пространственно совпадают с грязевулканическими полями. В этой связи точки бурения поисково-разведочных скважин нередко закладываются вблизи грязевых вулканов. Однако бурение на таких площадках и последующая разработка месторождений должны учитывать высокую флюидогеодинимическую неустойчивость недр грязевулканических областей. В этом случае в связи с риском аварии в процессе бурения возникает задача оценки размеров опасной зоны вокруг грязевулканического аппарата.

### **Подходы к оценке радиуса потенциально опасных воздействий флюидогенных процессов и явлений** ▶

Анализ литературных источников, а также результаты инженерно-геологических изысканий для строительства морских сооружений в Черном и Каспийском морях показали, что трещины, газовые факелы могут образовываться на расстоянии до 4 км от жерла вулкана, а длина потоков сопочной (грязевулканической) брекчии при взрывных извержениях составляет 1–4 км при ширине от нескольких сотен метров до 1,5 км [12].

Оценить безопасное расстояние от грязевого вулкана в случае планов раз-

мещения вблизи него стационарных буровых платформ, трубопроводов, подводных добычных комплексов и т. д. можно только выполнив специальные исследования с последующими расчетами. В зависимости от морфологических особенностей, степени активности грязевых вулканов, длины потоков грязевулканической брекчии и др., а также уровня ответственности сооружений это расстояние может составлять 0,5–1,5 км. Например, Локбатанское месторождение было открыто при бурении скважины, которая была заложена на расстоянии 1,5 км от кратера активного Локбатанского грязевого вулкана. В турецком секторе Черного моря точка бурения поисково-разведочной скважины «Лиманкой-2» была заложена на расстоянии приблизительно 1,1 км от ближайших грязевых сопок (рис. 3).

Области развития грязевого вулканизма характеризуются также повышенной сейсмической опасностью [52]. В случае возникновения землетрясения возможна активизация грязевулканической деятельности [53]. Анализ связи грязевулканических явлений с сейсмичностью был детально изучен Б.М. Панахи [14]. Им было установлено: в областях развития грязевых вулканов извержения могут сопровождать только те из удаленных сейсмических событий, магнитуда которых  $M$  превышает 6,5; грязевулканические проявления сопровождают преимущественно сильные местные землетрясения с магнитудой  $M > 5,4$  и интенсивностью  $I > 7-8$  баллов; в свою очередь, значительная часть пароксизмальных извержений грязевых вулканов сопровождается грязевулканическими землетрясениями (с максимальной интенсивностью не выше 6 баллов по шкале MSK-64) и видимыми на поверхности крупными разрывными нарушениями.

В то же время есть и другие, пока слабо изученные, факторы, влияющие на динамику извержений грязевых вулканов. Так, на примере изучения грязевых вулканов Азербайджана показано [54], что нередко после землетрясений извергается только часть из них.

В ряде работ отмечается высокая чувствительность флюидодинамических систем к сеймотектоническим процессам, в частности к землетрясениям [11, 34, 55–57]. В работе С.М. Астахова [58] приведены примеры влияния интенсивности землетрясений на увеличение дебитов скважин. Установлено, что даже слабые землетрясения вызывают заметное усиление вертикальной миграции флюидов в приповерхностных отложе-

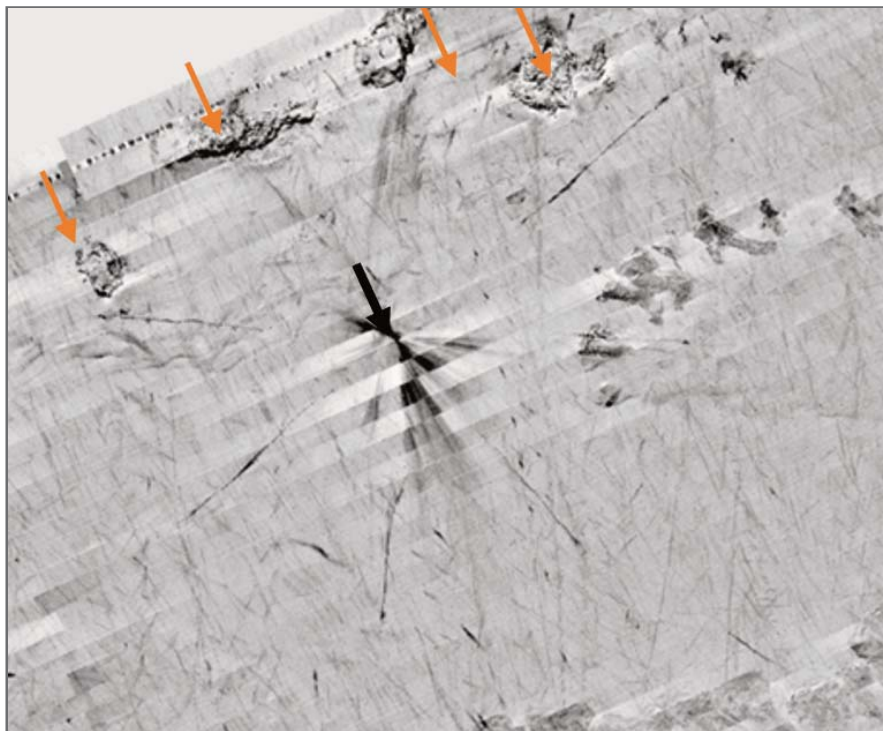


Рис 3. Точка бурения поисково-разведочной скважины «Лиманкой-2» в глубоководной зоне турецкого сектора Черного моря (отмечена черной стрелкой). Красные стрелки указывают на грязевые сопки

ниях. Отмечается, что в периоды сеймотектонической активизации блоков земной коры происходит увеличение проницаемости пород после землетрясений с различной магнитудой вследствие развития приповерхностной области трещинной дилатансии, которая по своим латеральным линейным размерам может значительно превышать область очага землетрясения.

На острове Сахалин впервые инструментально установлен аналогичный эффект. После землетрясений происходило: увеличение дебита свободных газов (в основном метана) в 3–5 раз, изменение температуры водогрязевой смеси и химического состава свободных газов в грифонах юга Сахалина [59]. Аналогичные явления были зафиксированы в Японском море [60].

Согласно работе [61] отклик флюидодинамических систем на землетрясения обусловлен действием двух факторов – квазистатическими изменениями напряженного состояния среды, вызванными сейсморазрывом, и динамическими изменениями напряжения, вызванными прохождением сейсмических волн. При этом первый фактор эффективно действует только в ближней зоне землетрясения – на расстояниях, сопоставимых с размером очага. В работе [62] приведена эмпирическая формула  $\lg R_{\max} = (0,45M - 0,95)$ , позволяющая в зависимости от магнитуды землетрясе-

ния  $M$  оценить максимальное эпицентральное расстояние  $R_{\max}$  (км) для различных возможных флюидодинамических проявлений этого землетрясения – извержений грязевых и магматических вулканов, разжижений грунта, изменений температурного режима термальных источников и др. Похожая формула (с небольшими отличиями в числовых коэффициентах) приводится в работе [63]:  $\lg R_{\max} = (0,44M - 0,79)$ .

Существуют и иные функциональные взаимосвязи между  $M$  и  $R_{\max}$ . Для эффекта разжижения получена следующая эмпирическая формула:  $\lg R_{\max} = (2,05(\pm 0,10) + 0,45M)$  [64].

Важные результаты, в том числе для целей ДСР и СМР, в ходе исследований косейсмических деформаций в пределах юга Сибири были получены А.В. Андреевым и Луниной [65]. В работе [65] описаны региональные зависимости между параметрами землетрясений и пространственным распределением вызванных ими вторичных эффектов, в том числе разжижения грунтов.

#### Опыт оценки сейсмической опасности и макросейсмических обследований дна акваторий ►

На сегодняшний день накоплен определенный опыт ДСР отдельных частей акваторий и СМР трасс и площадок морских нефтегазовых сооружений

(МНГС), однако в целом изученность сейсмической опасности дна акваторий, в том числе вторичной сейсмической опасности, недостаточна [66]. Из публикаций, посвященных оценке сейсмической опасности, в том числе полностью или частично для акваторий, следует упомянуть работы [67–77], а также публикации, посвященные оценке вторичных эффектов в морях [12, 78–84].

Оценка сейсмической опасности шельфовых зон и тем более глубоководных зон морских бассейнов представляет более сложную задачу по сравнению с оценкой сейсмической опасности на суше в связи трудоемкостью и дороговизной проведения сеймотектонических и инструментальных исследований в акваториях. Проблемы и трудности оценки сейсмической опасности морских акваторий детально изложены в работах [85–87].

Основные проблемы, возникающие при оценке сейсмической опасности шельфовых зон, обусловлены труднодоступностью подводных участков для проведения крупномасштабных инженерно-геологических изысканий и геофизических исследований, а также сейсмологической регистрации землетрясений. В морских условиях ограничено применение метода сейсмических жесткостей в связи со значительными техническими сложностями определения скоростей поперечных волн в донных осадках. Проведение сейсмологических исследований в арктических и дальневосточных морях затруднено длительным периодом ледостава. Еще одна особенность сейсмологических наблюдений в морской среде – высокий фон штормовых помех. Весьма актуальна и сложна проблема изучения разрывных нарушений, скрытых под водной толщей и донными осадками, и не только сейсмогенерирующих нарушений, но и нетектонических (флюидогенных, оползневых, гляциотектонических и др.), проявляющихся как неоднородности в строении верхней части осадочного чехла и способных влиять на сейсмическое волновое поле. Слабо изучен вопрос оценки опасности флюидогенных неблагоприятных явлений, которые могут инициироваться землетрясениями, – прорывов из скоплений газов (газовых карманов, микрозалежей и др.) и грязевого вулканизма.

Ситуация усугубляется отсутствием до настоящего времени рекомендаций, регламентирующих порядок и правила выполнения СМР дна акваторий. Между тем имеются специфические задачи мор-

ской инженерной сейсмологии и морской инженерной геологии, обозначенные почти два десятилетия назад Институтом океанологии имени П.П. Ширшова РАН (частично решенные, но не потерявшие своей актуальности):

1) определение влияния давления водной толщи на интенсивность сотрясений дна;

2) оценка интенсивности гидравлического удара при различной интенсивности сотрясений дна (такой удар возможен при интенсивности сотрясений 8 баллов и выше);

3) оценка реакций слабokonсолидированных водонасыщенных песчаноглинистых грунтов, широко распространенных на дне морей, на сейсмические воздействия, оценка возможности их разжижения, а также определение условий возникновения подводных гравитационных потоков, грифонообразования и оползнеобразования (есть основания предполагать, что вследствие низких прочностных свойств современных донных грунтов, залегающих в верхней части геологического разреза, их оползание возможно и при слабых землетрясениях – менее 5 баллов [88]);

4) оценка опасности возникновения волн цунами при сильных подводных землетрясениях (или по причине других цунамигенных триггеров) и оценка максимальной высоты наката цунами на берег (в настоящее время при разработке проектов территориального планирования цунамиопасных районов, при оценке последствий вероятных цунами и при анализе цунами-риска следует применять СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования»).

Учитывая все более активное освоение месторождений углеводородов на шельфе, представляется актуальной также задача создания макросейсмической шкалы интенсивности подводных землетрясений. Возможно, на первом этапе надо решить данную проблему для наиболее хорошо изученных морей, то есть создать региональные или субрегиональные сейсмические шкалы (например, для Средиземноморско-Черноморского региона). Этот вопрос возник в связи с давно установленными фактами более масштабных сейсмогенных деформаций в морях по сравнению с сушей при одной и той же силе землетрясений.

Еще в начале 1970-х годов В.П. Солоненко обратил внимание на гипертрофические размеры сейсмодислокаций на дне морей и крупных озер. На примере землетрясений Канто 01.09.1923

(Япония,  $M=8,3$ ) и Среднебайкальского 29.08.1959 ( $M=6,75$ ) он показал, что амплитуды косейсмических опусканий и поднятий дна морей (озер) превосходят, порой значительно, величины смещений на прилегающей суше. При Аляскинском землетрясении 1964 года ( $M=8,6$ ) области поднятий и опусканий, разделенные фрагментарно вышедшим на поверхность разрывом, охватили площадь около 300 тыс. км<sup>2</sup>. При этом на суше вертикальные смещения составили от 4 до 10 м, а на дне моря – до 15 м.

Большой интерес для рассматриваемого вопроса представляют результаты исследований сейсмогравитационных деформаций в районе мыса Большой Утриш [89]. Здесь в результате сильного землетрясения на Анапском выступе ( $M_w \approx 6,9$ ), случившегося, по последним данным, в XII–XIII веках [90], произошли скальные оползни отрыва-скольжения, которые смешались от своего источника на расстояния до 3,5 км (вместо 50–100 м, как отметил В.П. Солоненко [47], возможных при обычном гравитационном обвале), из них – до 2 км в море. Нашими исследованиями [91] было показано, что кроме скальных оползней на шельфе присутствуют оползни разжижения, часто возникающие при сильных землетрясениях с  $M \geq 5-6$ . Типичный пример такого оползня разжижения шельфа приведен на рисунке 4. Возможно, скальные оползни и оползни разжижения являются синхронными образованиями.

Оползневые процессы, спровоцированные землетрясениями, происходят и в настоящее время. Косвенным свидетельством сейсмогенного обвала (или, возможно, другого типа оползня), произошедшего в период проведения инженерно-геологических изысканий на континентальном склоне Анапского выступа, является возникшее и долго не оседавшее облако взвеси, зафиксированное подводной видеосъемкой сразу же после Су-Псехского землетрясения 10.12.2012, произошедшего в Анапском сейсмоактивном районе ( $M_w=4,3$ ;  $I=5-6$  баллов) [92] (рис. 5).

Детальная площадная съемка с использованием телеуправляемых необитаемых и обитаемых подводных аппаратов в практике подводных сейсмологических исследований в настоящее время не являются распространенным методом. Тем не менее имеются примеры таких исследований, в том числе в Японском море [93]. Во время погружений глубоководного пилотируемого аппарата Shinkai 6500 в эпицентральной-

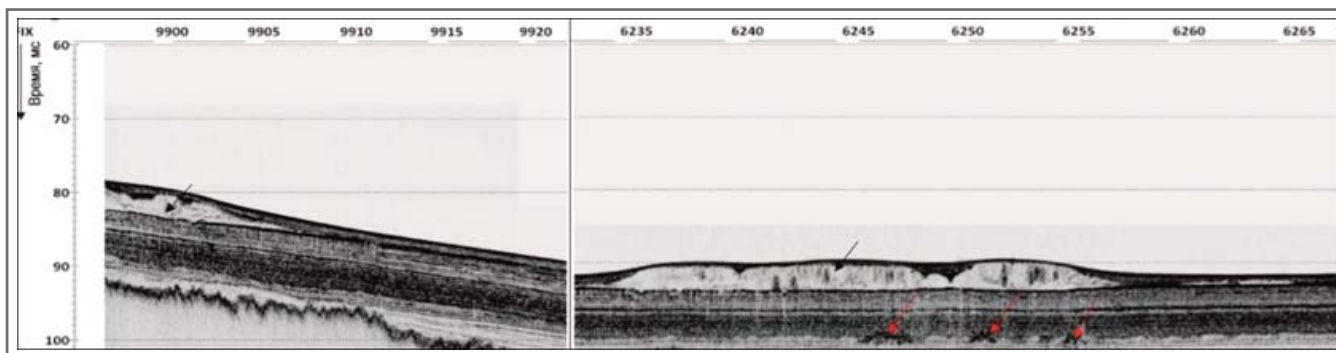


Рис. 4. Акустически прозрачное тело (на которое указывают черные стрелки вверх) на траверзе мыса Большой Утриш. Слева – фрагмент продольного профиля; справа – поперечный профиль. Красные стрелки внизу указывают на газонасыщенные отложения

ной зоне современных землетрясений японские исследователи наблюдали многочисленные трещины, следы обвалов, гидротермы. Такие проявления, как излияния флюидов и выходы газов, обусловленные сильным Измитским землетрясением 1999 года ( $M=7,6$ ), наблюдались в Мраморном море [93]. После землетрясения в Кобе (Япония) 1995 года ( $M=6,9$ ) на морском дне были обнаружены отложения, образовавшиеся в результате подводного песчаного выброса [94].

Интересно отметить, что обширные участки развития песчаных отложений среди поля илов были обнаружены в районе интенсивных газовыделений на шельфе моря Лаптевых, который, как известно, отличается повышенной сейсмичностью [95]. Кроме того, здесь в пределах очага разгрузки флюида наблюдалось увеличение содержания взвеси у дна по сравнению с прилегающими участками.

Не менее эффективным методом для обследования плейстосейстовых областей является многолучевое эхолотирование. С использованием этого метода были обнаружены покмарки в пределах ряда аванделъты рек после землетрясения 2001 года с  $M=6,8$  в южной части Пьюджет-Саунда (западное побережье США) [34].

Морская съемка с использованием сейсморазведки высокого разрешения и гидролокации бокового обзора в районе аванделъты реки Кламат после землетрясения 1980 года с  $M=7$  в северной части штата Калифорния показали, что это событие вызвало косейсмическое опускание большого участка дна (площадь 20 км<sup>2</sup>), разжижение осадков, об-

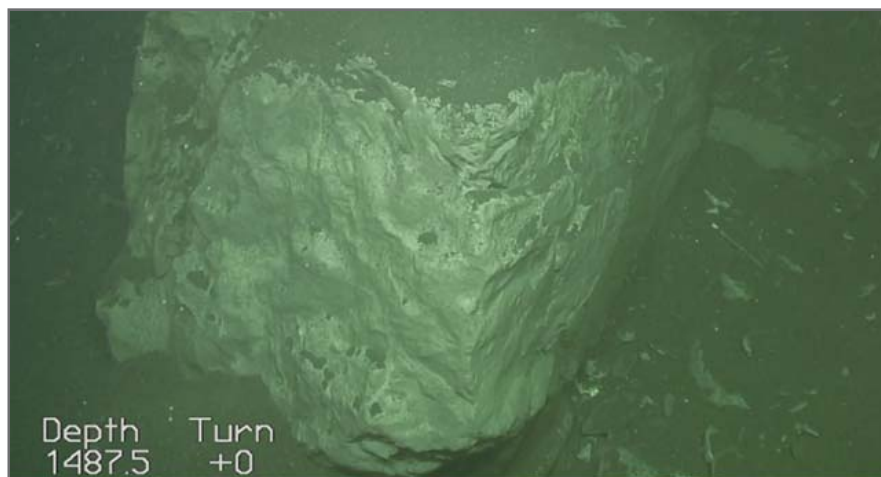


Рис. 5. Следы свежего обвала флишевых пород на континентальном склоне Анапского выступа спустя сутки после Су-Псехского землетрясения 10.12.2012

разование трещин, покмарков, появление газовых сипов в толще воды [96].

### Заключение

Подводя итоги краткому обзору проблемы учета вторичных процессов и явлений, обусловленных сейсмическими событиями (вторичной сейсмической опасности) в шкалах интенсивности землетрясений и в нормативно-методической литературе, необходимо отметить следующее.

В документах, регламентирующих порядок проведения ДСР и СМР в сейсмических районах, имеются четкие указания на необходимость изучения и прогноза вторичной сейсмической опасности.

Вторичные опасности землетрясений на суше всесторонне отражены в ГОСТ Р 57546-2017 «Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности» и ГОСТ 34511-2018 «Макросейсмическая шкала интенсивности землетрясений».

При проектировании зданий и сооружений в сейсмических районах, как правило, учитываются возможные сейсмогенные смещения по активным разломам, разжижение грунтов, склоновые процессы, цунами. Острой является проблема учета в проектах косейсмических поднятий и опусканий побережий и морского дна.

В проектах строительства морских сооружений недостаточно принимают во внимание последствия опасных воздействий флюидогенных процессов, в том числе грязевулканических эксплозивных извержений, землетрясений, сейсмодифлюидизации недр.

Учитывая специфику макросейсмических проявлений землетрясений с эпицентрами в пределах акваторий, представляется целесообразным, в том числе для оценки их цунамигенности, создание субрегиональной шкалы интенсивности подводных землетрясений. **h**

### Список литературы ▶

1. Вознесенский Е.А., Коваленко В.Г., Кушнарера Е.С., Фуникова В.В. Разжижение грунтов при циклических нагрузках. М.: Изд-во МГУ, 2005. 134 с.
2. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. М.: Госстройиздат, 1962. 284 с.

3. Шахраманьян М.А. Оценка сейсмического риска и прогноз последствий землетрясений в задачах спасения населения (теория и практика). М.: Изд-во ВНИИ ГОЧС, 2000. 192 с.
4. Кофф Г.Л., Рюмина Е.В. Сейсмический риск (виды, оценка, управление). М.: Полтекс, 2005. 108 с.
5. Никитин С.Н., Погребченко В.В., Никитина И.А. Первичные и вторичные сейсмогенные явления // Материалы докладов Общероссийской научно-практической конференции «Изучение опасных природных процессов и явлений при инженерных изысканиях». М.: ООО «Геомаркетинг», 2019. С. 92–98.
6. Миронюк С.Г. Флюидогенные образования: обоснование выделения новой генетической группы рельефа морского дна // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Рельеф и природопользование» (8-е Шукинские чтения), Москва, 28 сентября – 1 октября 2020 г. М.: Изд-во Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020. С. 37–43.
7. Максимович Г.А. О грязевых вулканах, образующихся при землетрясениях // Известия АН СССР. Серия: Геология. 1953. № 5. С. 146–147.
8. Кузнецов В.В. Сильные движения в эпицентре Чуйского землетрясения как результат выхода ударной волны на поверхность земли // Материалы научно-практической конференции «Алтайское (Чуйское) землетрясение: прогнозы, характеристики, последствия». Горно-Алтайск: Изд-во Горно-Алтайского государственного университета, 2004. URL: [https://e-lib.gasu.ru/konf/zemletr04/R\\_6.html](https://e-lib.gasu.ru/konf/zemletr04/R_6.html).
9. Формы геологических тел: терминологический справочник. М.: Недра, 1977. 246 с.
10. Youd L.T. et al. Liquefaction potential map of San Fernando, California, in seismic zonation in the San Francisco Bay Region. USGS Circular № 807. 1979. 20 p.
11. Голубов Б.Н., Иванов А.Ю. Активизация выбросов нефти из недр Северного и Среднего Каспия в апреле – июне 2012 г. по спутниковым и геолого-геофизическим данным // Исследования Земли из космоса. 2014. № 2. С. 67–81.
12. Миронюк С.Г. Грязевые вулканы Азово-Черноморского бассейна и прилегающей территории и оценка их опасности для зданий и сооружений // Геориск. 2010. № 3. С. 20–28.
13. Алиев А.А., Гулиев И.С., Дадашев Ф.Г., Рахманов Р.Р. Атлас грязевых вулканов мира. Баку: NaftaPress, 2015. 323 с.
14. Панахи Б.М.-О. Сейсмичность областей развития грязевых вулканов (Азербайджан и регион Каспия): автореф. дис... док. геол.-минер. наук. М., 1998. 281 с.
15. Караев Р.Н. Оценка аварийности морских нефтегазовых сооружений. Часть 1 // Морской вестник. 2016. № 3. С. 85–90.
16. Журавель В.И., Журавель И.В., Мансуров М.Н. Практические вопросы учета аварийности морских скважин // Вестник газовой науки. 2015. № 2. С. 133–141.
17. Миронюк С.Г., Винда А.А., Ионов В.Ю., Науменко Д.А., Чичеров А.Л. Опыт применения наклонно-направленного бурения при пересечении береговой зоны (на примере строительства газопровода на шельфе северо-восточной части Черного моря) // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2011. № 3. С. 35–42.
18. Нефть, газ, оборудование: терминологический словарь. М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. 311 с.
19. Мушкетов И., Орлов А. Каталог землетрясений Российской империи. Санкт-Петербург: Типография Императорской академии наук, 1893. 582 с.
20. Пономарев А.В., Сидорин А.Я. Основоположник современной сейсмологии Борис Борисович Голицын (1862–1916 гг.): к 150-летию со дня рождения // Вестник ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. № 6001. doi:10.2205/2012NZ000114.
21. Медведев С.В. Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 151–162.
22. Солоненко В.П. Шкала балльности по сейсмодислокациям // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М.: Наука, 1975. С. 121–131.
23. Шебалин Н.В., Аптикаев Ф.Ф. Развитие шкал типа MSK // Вычислительная сейсмология. 2003. Вып. 34. С. 210–253.
24. Шерман С.И., Бержинский Ю.А., Демьянович Н.И., Павленко В.А. Региональная шкала сейсмической интенсивности для Прибайкалья // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский, 1999. С. 135–137.
25. Tatevossian R.N., Rogozhin E.A., Arefiev S.S., Ovsyuchenko A.N. Earthquake intensity assessment based on environmental effects: principles and case studies // Geological Society London Special Publications. Vol. 316. № 1. P. 73–91. URL: <https://doi.org/10.1144/SP316.5>.
26. Клячко М.А., Шестоперов Г.С., Стром А.Л. Межгосударственный стандарт «Шкала макросейсмическая» // Материалы 8-й Международной научно-практической конференции «Проблемы снижения природных опасностей и рисков (Геориск-2012)». М.: Изд-во РУДН, 2012. Т. 2. С. 98–103.
27. Палеосейсмология (пер. с англ.). М.: Научный мир, 2011. Т. 1. 560 с.
28. Якубов А.А., Алиев А.А. Грязевые вулканы. М.: Знание, 1978. 56 с.
29. Солоненко В.П., Тресков А.А., Курушин Р.А. и др. Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья. М.: Наука, 1966. 231 с.
30. Рогожин Е.А. Очерки регионально сеймотектоники. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2012. 340 с.

31. Константинова Т.Г. Разжижение грунтов и разрушения при сильных землетрясениях // Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска», Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г. / под ред. Б.В. Левина, О.Н. Лихачевой. Владивосток: Дальнаука, 2015. Т. 1. С. 103–108.
32. Имаев В.С. Архитектура сейсмоопасных зон Алтая. Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2007. 232 с.
33. Стрельцов М.И. Нефтегорское землетрясение 27 (28) мая 1995 года на Сахалине. М.: Янус-К, 2005. 177 с.
34. Hovland M., Gardner J.V., Judd A.G. The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards // *Geofluids*. 2002. Vol. 2. № 2. P. 127–136. doi.org/10.1046/j.1468-8123.2002.00028.x.
35. Лунина О.В., Андреев А.В., Гладков А.А. Закономерности проявления и модели локализации опасных геологических процессов при сейсмогенной активизации разломов на юге Сибири и в Монголии // *Геология и геофизика*. 2014. № 8. С. 1294–1313.
36. Борисов Б.А. О неприемлемой тенденции к завышению магнитуд исторических землетрясений на примере Красноводского землетрясения // *Вопросы инженерной сейсмологии*. М.: Наука, 1992. Вып. 33. С. 28–39.
37. Левина В.И. и др. Олюторское землетрясение 20 апреля 2006 г. с  $M_w=7.6$ ,  $I_0=9-10$  (Коряжское нагорье) // *Землетрясения Северной Евразии*, 2006 год. Обнинск, 2012. С. 214–239.
38. Тараканов А.И., Пестриков Ю.А., Марычева А.В. Гидродинамические выбросы грунта при землетрясениях. На примере Камчатки // *ГеоИнфо*. 15.05.2019. URL: <https://geoinfo.ru/product/tarakanov-aleksandr-ivanovich/gidrodinamicheskie-vybrosy-grunta-pri-zemletryasenyah-na-primere-kamchatki-40737.shtml>
39. Миронюк С.Г. Береговые примыкания морских газопроводов: выбор технологии строительства с учетом оценки геологических опасностей // *Газотранспортные системы: настоящее и будущее*. М.: Изд-во Газпром ВНИИГАЗ, 2015. С. 31.
40. Калинин Э.В., Панастьян Л.Л., Широков В.Н., Артамонова Н.Б., Фоменко И.К. Моделирование полей напряжений в инженерно-геологических массивах. М.: Изд-во МГУ, 2003. 262 с.
41. Вальдман Н.А., Грудницкий Г.В., Егоров С.И. Некоторые вопросы повышения надежности морских подводных трубопроводов // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2012. № 66. С. 69–74.
42. Грудницкий Г.В., Мурадов К.В., Уланов Е.Ф. Заглубление морских подводных трубопроводов. М.: Изд-во ОАО «ЛУКОЙЛ», 2000. 85 с.
43. Кофф Г.Л., Левин Б.В., Морозов Е.Н., Борсукова О.В. Оценка риска цунами и сейсмического риска береговых зон Сахалинской области. Южно-Сахалинск, 2005. 61 с.
44. Кан К., Зеркаль О.В., Фоменко И.К., Павленко О.В. Вероятностный анализ устойчивости склонов при сейсмическом воздействии с использованием акселерограмм // *Основания, фундаменты и механика грунтов (ОФМГ)*. 2019. № 2. С. 2–8.
45. Штейнберг В.В. Колебания поверхности земли вблизи очагов сильных землетрясений: автореф. дис... док. физ.-мат. наук. М., 1985. 32 с.
46. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин / под ред. Б.В. Левина, И.Н. Тихонова. М.: Янус-К, 2009. С. 122–128.
47. Солоненко В.П. Землетрясения и рельеф // *Геоморфология*. 1973. № 4. С. 3–13.
48. Пинегина Т.К., Кожурин А.И. Опыт применения георадара при изучении сейсмоструктурных деформаций на Камчатке // Доклады научного симпозиума «Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири», 1–4 июня 2010 г., г. Хабаровск. С. 226–230.
49. Бугаев Е.Г., Кишкина С.Б. Оценка долговременной и текущей сейсмической опасности площадок объектов использования атомной энергии на основании материалов инженерных изысканий // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2018. № 3. С. 1–13.
50. Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф // *Вычислительная сейсмология*. М.: ГЕОС, 2007. Вып. 38. 240 с.
51. Мамедов П.З., Гулиев И.С. Субвертикальные геологические тела в осадочном чехле Южно-Каспийской впадины // *Известия АзАН. Науки о Земле*. 2003. № 3. С. 10–15.
52. Ковачев С.А., Казьмин В.Г., Кузин И.П., Лобковский Л.И. Новые данные по сейсмичности Среднего Каспия и их возможная тектоническая интерпретация // *Геотектоника*. 2006. № 5. С. 50–60.
53. Гулиев И.С., Керимов В.Ю., Етирмишли Г.Д., Юсубов Н.П., Мустаев Р.Н., Гусейнова А.Б. Современные геодинамические процессы и их значение в восполнении запасов углеводородов в Черноморско-Каспийском регионе // *Геотектоника*. 2021. № 3. С. 96–112.
54. Устюгов Г.В., Ершов В.В. Извержения грязевых вулканов Азербайджана и их корреляция с сильными землетрясениями // *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. 2019. № 4. С. 6–13.
55. Ершов В.В. Флюидодинамические процессы в грязевулканических структурах и их связь с региональной сейсмичностью (на примере о-ва Сахалин): автореф. дис... канд. геол.-мин. наук. М.: Изд-во Института динамики геосфер РАН, 2013. 214 с.
56. Ершов В.В. О некоторых особенностях и механизмах отклика флюидодинамических систем на сейсмические события // Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска», Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г. / под ред. Б.В. Левина, О.Н. Лихачевой. Владивосток: Дальнаука, 2015. Т. 2. С. 416–418.

57. Ковачев С.А., Крылов А.А. Возможные причины нефтегазовых высачиваний (грифонов) в северной части Каспийского моря // *Материалы 15-й Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2017)»*. М., 2017. Т. 1. С. 218–222.
58. Астахов С.М. Влияние сейсмотектонической напряженности недр на процессы вторичной миграции углеводородов // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2016. № 2. С. 14–21.
59. Доманский А.В., Ершов В.В. Оценка сейсмического воздействия на динамику грифонной деятельности грязевых вулканов // *Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кротопкина, «Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь», 18–22 октября 2010 г.* М.: ГЕОС, 2010. С. 150–153.
60. Холмогоров А.О. Сейсмическая активность и колебания концентраций метана в Японском море // *Тезисы докладов 4-й Всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы», г. Южно-Сахалинск, 6–10 сентября 2021 г.* Южно-Сахалинск: Изд-во Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2021. С. 59.
61. Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. Гидрогеологический отклик подземных коллекторов на сейсмические колебания // *Физика Земли*. 2011. № 12. С. 50–62.
62. Wang C.-Y., Wong A., Dreger D.S., Manga M. Liquefaction limit during earthquakes and underground explosions: implications on ground-motion attenuation // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2006. Vol. 96. P. 355–363.
63. Manga M., Brodsky E. Seismic triggering of eruptions in the far field: volcanoes and geysers // *Annual Review of Earth and Planetary Science*. 2006. Vol. 34. P. 263–291.
64. Manga M., Brumm M., Rudolph M.L. Earthquake triggering of mud volcanoes // *Marine and Petroleum Geology*. 2009. Vol. 26. P. 1785–1798.
65. Андреев А.В., Лунина О.В. Параметры землетрясений и пространственное распределение косейсмических эффектов на юге Сибири и в Монголии // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2012. Т. 39. № 2. С. 37–68.
66. Никонов А.А. Опасные сейсмообусловленные рельефообразующие процессы в приморской зоне и на шельфе – научные и прикладные аспекты // *Материалы Всероссийской научной конференции «Геоморфологические процессы и их прикладные аспекты»* (6-е Шукинские чтения). М.: Изд-во Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 2010. С. 331–333.
67. Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. М.: Светоч Плюс, 2010. 304 с.
68. Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: ООО «Наука и образование», 2012. 176 с.
69. Ассиновская Б.А., Овсов М.К. Оценка сейсмической опасности Восточно-Балтийского региона // *Геориск*. 2015. № 3. С. 21–27. URL: [http://www.geomark.ru/journals\\_list/zhurnal-georisk-32015](http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-georisk-32015).
70. Ассиновская Б.А., Панас Н.М., Овсов М.К., Антоновская Г.Н. Предварительная оценка сейсмической опасности района Арктического хребта Гаккеля и окрестностей // *Российский сейсмологический журнал*. 2019. Т. 1. № 1. С. 35–45.
71. Ковачев С.А., Кузин И.П., Лобковский Л.И. Первый опыт сейсмического микрорайонирования морского дна с помощью донных сейсмографов // *Вулканология и сейсмология*. 2002. № 4. С. 1–6.
72. Ковачев С.А., Кузин И.П., Лобковский Л.И. Детальные сейсмологические наблюдения на центральном участке шельфа и континентального склона северо-восточной части Черного моря с помощью донных станций // *Физика Земли*. 2003. № 1. С. 21–27.
73. Крылов А.А., Иващенко А.И., Ковачев С.А. Оценка сейсмической опасности нефтегазоносных шельфовых зон на примере Северного Каспия // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 6. С. 1006–1012.
74. Кузин И.П., Ковачев С.А., Лобковский Л.И. Об оценке сейсмической опасности и сейсмическом микрорайонировании участков строительства морских сооружений на слабосейсмичных акваториях // *Вулканология и сейсмология*, 2009. № 2. С. 67–80.
75. Лобковский Л.И., Кузин И.П., Ковачев С.А. Сейсмическое микрорайонирование шельфа, континентального склона и прилегающей части восточно-черноморской впадины // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря*. М.: Наука, 2002. С. 380–389.
76. Миндель И.Г., Трифонов Б.А., Кауркин М.Д., Несынов В.В. Оценка исходных сейсмических воздействий для северной части шельфа Баренцева моря (р-н Новой Земли) для решения задач сейсмического микрорайонирования территорий освоения перспективных участков добычи углеводородов // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2019. № 2. С. 38–47.
77. Павленко О.В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. М.: Научный мир, 2009. 260 с.
78. Куликов Е.А., Иващенко А.И., Миронюк С.Г. Оценка цунамиопасности на северо-восточном побережье о. Сахалин и уроки аварии на АЭС Фукусима-Дайичи // *Геориск*. 2015. № 1. С. 26–30.
79. Миронюк С.Г. Геологические опасности дна восточной части Черного моря и их учет при выборе трасс подводных газопроводов // *Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Д.Г. Панова, «Геология, география и экология океана», г. Ростов-на-Дону, 8–11 июня 2009 г.* Ростов на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. С. 230–233.



80. Миронюк С.Г. Оценка сейсмической опасности участков строительства морских трубопроводных и добычных сооружений на шельфе // Газовая промышленность. 2014. № 5 (712). С. 113–119.
81. Миронюк С.Г. Подход к количественной оценке опасности для трубопровода, пересекающего активный разлом (Баренцево море) // Материалы 16-й Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», г. Москва, 1–3 декабря 2021 г. С. 561–568.
82. Миронюк С.Г., Ионов В.Ю. Оценка сейсмической разжижаемости грунтов Баренцева моря // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Выпуск 23. Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. М., 2022. С. 202–207.
83. Миронюк С.Г., Кропоткин М.П., Ионов В.Ю. Оценка устойчивости обвальнo-оползневого склона Черноморского побережья с учетом возможных сейсмических воздействий // Материалы докладов Общероссийской научно-практической конференции «Изучение опасных природных процессов и явлений при инженерных изысканиях». М: Геомаркетинг, 2019. С. 99–113.
84. Миронюк С.Г., Росляков А.Г., Иванова А.А. и др. Выявление и подходы к анализу опасности и риска разрывных нарушений при инженерно-геологических изысканиях на акваториях // Инженерные изыскания. 2020. Т. 14, № 1. С. 24–38.
85. Ассиновская Б.А., Нахшина Л.П. Некоторые проблемы сейсмического районирования акваторий // Сейсмическое районирование шельфа. Владивосток: Изд-во ДВО АН СССР, 1990. С. 130–138.
86. Иващенко А.И., Ким Ч.У., Федоришин М.С. Определение сейсмической опасности на шельфе // Сейсмическое районирование шельфа. Владивосток: Изд-во ДВО АН СССР, 1990. С. 5–21.
87. Кузин И.П. О сейсмическом районировании шельфов (на примере Охотского моря) // Сейсмическое районирование шельфа. Владивосток: Изд-во ДВО АН СССР, 1990. С. 66–98.
88. Васильев Ю.И., Гвоздев А.А., Иванова Л.А. и др. Механические свойства мягкого грунта в интервале напряжений до  $(5\div 10)\times 10^5$  Па или 5–10 кг/см<sup>2</sup> и выбор модели грунта, описывающей его поведение при сильных землетрясениях // Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1977. С. 121–129.
89. Островский А.Б. Палеосеймотектонические дислокации на Черноморском побережье Северо-Западного Кавказа в связи с оценкой современной сейсмической опасности этой территории // Комплексные исследования Черноморской впадины. М.: Наука, 1970. С. 46–58.
90. Овсющенко А.Н., Новичихин А.М., Быхалова О.Н., Рогожин Е.А., Корженков А.М., Ларьков А.С., Бутанаев Ю.В., Лукашова Р.Н. Междисциплинарное датирование Утришских сейсмодислокаций: к локализации очага сильного исторического землетрясения на Западном Кавказе // Вопросы инженерной сейсмологии. 2019. Т. 46. № 3. С. 50–73.
91. Миронюк С.Г., Кропоткин М.П. Возможный механизм и причины образования утришских оползней суши и шельфа (полуостров Абрау) // Материалы 2-й Международной научной конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова, «Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов (Опасные явления II)». 2020. С. 52–57.
92. Габсатарова И.П., Малянова Л.С., Селиванова Е.А., Якушева В.Н. Су-Псехское землетрясение 10 декабря 2012 г. с  $K_p=11.5$ ,  $M_{w,рег}=4,3$ ,  $I_p=5-6$  (Анапский сейсмоактивный район) // Землетрясения Северной Евразии. Выпуск 21 (2012 г.). Обнинск: Изд-во ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 420–432.
93. Kuscu I., Okamura M., Matsuoka H., Gokasan E., Awata Y., Tur H., Simsek M., Kecer M. Seafloor gas seeps and sediment failures triggered by the August 17, 1999 earthquake in the Eastern part of the Gulf of Izmit, Sea of Marmara, NW Turkey // Marine Geology. 2005. Vol. 215. P. 193–214.
94. Kitamura A., Tominaga E., Sakai H. Subaqueous sand blow deposits induced by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Japan // Proceedings of the Paleoseismology Workshop, March 15, 1999, Tsukuba, Japan. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1440-1738.2002.00351.x>.
95. Дударев О.В. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России: автореферат дис... док. геол.-минер. наук. Владивосток, 2016. 49 с.
96. Field M.E., Jennings A.E. Seafloor gas seeps triggered by a northern California earthquake // Marine Geology. 1987. Vol. 77. P. 39–51.

## References ►

1. Voznesenskiy E.A., Kovalenko V.G., Kushnareva E.S., Funikova V.V. Razzhizhenine gruntov pri tsiklicheskih nagruzkah [Liquefaction of soils under cyclic loads]. М.: Изд-во MGU, 2005. 134 s. (in Rus.).
2. Medvedev S.V. Inzhenernaya seysmologiya [Engineering seismology]. М.: Gosstroyizdat, 1962. 284 s. (in Rus.).
3. Shahraman'yan M.A. Otsenka seysmicheskogo riska i prognoz posledstviy zemletryaseniya v zadachah spaseniya naseleniya (teoriya i praktika) [Seismic risk assessment and earthquake consequences prediction in the tasks of saving the population (theory and practice)]. М.: Изд-во VNI GOCHS, 2000. 192 s. (in Rus.).
4. Koff G.L., Ryumina E.V. Seismicheskiy risk (vidy, otsenka, upravleniye) [Seismic risk (types, assessment, management)]. М.: Polteks, 2005. 108 s. (in Rus.).

5. Nikitin S.N., Pogrebchenko V.V., Nikitina I.A. Pervichnyie i vtorichnyie seismogennyye yavleniya [Primary and secondary seismogenic phenomena] // Materialy dokladov Obshcherossiiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Izucheniye opasnykh prirodnykh protsessov i yavleniy pri inzhenernykh izyskaniyakh». M.: ООО «GeomarketinG», 2019. S. 92–98 (in Rus.).
6. Mironyuk S.G. Flyuidogennyye obrazovaniya: obosnovaniye vydeleniya novoy geneticheskoy gruppy rel'efa morskogo dna [Fluidogenic formations: substantiation of the identification of a new genetic group of the seabed relief] // Materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Rel'yef i prirodopol'zovaniye» (8-e Shchukinskiye chteniya), Moskva, 28 sentyabrya – 1 oktyabrya 2020 g. M.: Izd-vo Geograficheskogo fakul'teta MGU imeni M.V. Lomonosova, 2020. S. 37–43 (in Rus.).
7. Maksimovich G.A. O gryazevykh vulkanah, obrazuyushchihsya pri zemletryaseniyah [On mud volcanoes formed during earthquakes] // Izvestiya AN SSSR. Seriya: Geologiya. 1953. № 5. S. 146–147 (in Rus.).
8. Kuznetsov V.V. Sil'nyie dvizheniya v epitsentre Chuyskogo zemletryaseniya kak rezul'tat vyhoda udarnoy volny na poverkhnost' zemli [Strong movements in the epicenter of the Chuy earthquake as a result of the shock wave reaching the earth's surface] // Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Altayskoye (Chuyskoye) zemletryaseniye: prognozy, harakteristiki, posledstviya». Gorno-Altaysk: Izd-vo Gorno-Altayskogo gosudarstvennogo universiteta, 2004. URL: [https://e-lib.gasu.ru/konf/zemletr04/R\\_6.html](https://e-lib.gasu.ru/konf/zemletr04/R_6.html) (in Rus.).
9. Formy geologicheskikh tel: terminologicheskiy spravochnik [Forms of geological bodies: terminological reference book]. M.: Nedra, 1977. 246 s. (in Rus.).
10. Youd L.T. et al. Liquefaction potential map of San Fernando, California, in seismic zonation in the San Francisco Bay Region. USGS Circular № 807. 1979. 20 p.
11. Golubov B.N., Ivanov A.Yu. Aktivizatsiya vybrosov nefiti iz neдр Severnogo i Srednego Kaspiya v aprele – iyune 2012 g. po sputnikovym i geologo-geofizicheskim dannym [Activation of oil emissions from the bowels of the earth of the Northern and Middle Caspian in April and June 2012 according to satellite and geological and geophysical data] // Issledovaniya Zemli iz kosmosa. 2014. № 2. S. 67–81 (in Rus.).
12. Mironyuk S.G. Gryazevyie vulkany Azovo-Chernomorskogo basseyna i privileyushchey territorii i otsenka ih opasnosti dlya zdaniy i sooruzheniy [Mud volcanoes of the Azov – Black Sea basin and adjacent territory and assessment of their danger for buildings and structures] // Georisk. 2010. № 3. S. 20–28 (in Rus.).
13. Aliev A.A., Guliev I.S., Dadashev F.G., Rakhmanov R.R. Atlas gryazevykh vulkanov mira [Atlas of mud volcanoes of the world]. Baku: NaftaPress, 2015. 323 s. (in Rus.).
14. Panahi B.M.-O. Seismichnost' oblastey razvitiya gryazevykh vulkanov (Azerbaydzhan i region Kaspiya) [Seismicity of the areas of development of mud volcanoes (Azerbaijan and the Caspian region)]; avtoref. dis... dok. geol.-miner. nauk. M., 1998. 281 s. (in Rus.).
15. Karaev R.N. Otsenka avariynosti morskikh neftegazovykh sooruzheniy. Chast' 1 [Evaluation of the accident rate of offshore oil and gas facilities. Part 1] // Morskoy vestnik. 2016. № 3. S. 85–90 (in Rus.).
16. Zhuravel' V.I., Zhuravel' I.V., Mansurov M.N. Prakticheskiye voprosy ucheta avariynosti morskikh skvazhin [Practical issues of accounting for offshore well accidents] // Vestnik gazovoy nauki. 2015. № 2. S. 133–141 (in Rus.).
17. Mironyuk S.G., Vinda A.A., Ionov V.Yu., Naumenko D.A., Chicherov A.L. Opyt primeneniya naklonno-napravlennoogo bureniya pri peresechenii beregovoy zony (na primere stroitel'stva gazoprovoda na shel'fe severo-vostochnoy chasti Chernogo morya) [Experience in the use of directional drilling when crossing the coastal zone (on the example of the construction of a gas pipeline on the shelf of the north-eastern part of the Black Sea)] // Prirodnye i tekhnogennyye riski. Bezopasnost' sooruzheniy. 2011. № 3. S. 35–42 (in Rus.).
18. Neft', gaz, oborudovaniye: terminologicheskiy slovar' [Oil, gas, equipment: a terminological vocabulary]. M.: Nedra-Biznestsentr, 2004. 311 s. (in Rus.).
19. Mushketov I., Orlov A. Katalog zemletryasenyi Rossiyskoy imperii [Catalog of earthquakes in the Russian Empire]. Sankt-Peterburg: Tipografiya Imperatorskoy akademii nauk, 1893. 582 s. (in Rus.).
20. Ponomarev A.V., Sidorin A.Ya. Osnovopolozhnik sovremennoy seysmologii Boris Borisovich Golitsyn (1862–1916 gg.): k 150-letiyu so dnya rozhdeniya [The founder of modern seismology Boris Borisovich Golitsyn (1862–1916): on the occasion of his 150th birthday] // Vestnik ONZ RAN. 2012. T. 4. № 6001. doi:10.2205/2012NZ000114 (in Rus.).
21. Medvedev S.V. Mezhdunarodnaya shkala seysmicheskoy intensivnosti [International Scale of Seismic Intensity] // Seismicheskoye rayonirovaniye SSSR. M.: Nauka, 1968. S. 151–162 (in Rus.).
22. Solonenko V.P. Shkala ball'nosti po seismodislotsiyam [Intensity grade scale for seismic dislocations] // Seismicheskaya shkala i metody izmereniya seysmicheskoy intensivnosti. M.: Nauka, 1975. S. 121–131 (in Rus.).
23. Shebalin N.V., Aptikaev F.F. Razvitiye shkal tipa MSK [Development of MSK-type scales] // Vychislitel'naya seysmologiya. 2003. Vyp. 34. S. 210–253 (in Rus.).
24. Sherman S.I., Berzhinskiy Yu.A., Dem'yanovich N.I., Pavlenko V.A. Regional'naya shkala seysmicheskoy intensivnosti dlya Pribaykal'ya [Regional scale of seismic intensity for the Baikal region] // Problemy seysmichnosti Dal'nego Vostoka. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 1999. S. 135–137 (in Rus.).
25. Tatevossian R.N., Rogozhin E.A., Arefiev S.S., Ovsyuchenko A.N. Earthquake intensity assessment based on environmental effects: principles and case studies. Geological Society, London, Special Publications, 2009. Vol. 316. P. 73–91. URL: <https://doi.org/10.1144/SP316.5>.
26. Klyachko M.A., Shestoperov G.S., Strom A.L. Mezhgosudarstvennyi standart «Shkala makroseysmicheskaya» [Interstate standard “Macroseismic Scale”] // Materialy 8-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy snizheniya prirodnykh opasnostey i riskov (Georisk-2012)». M.: Izd-vo RUDN, 2012. T. 2. S. 98–103 (in Rus.).

27. Paleoseismologiya (per. s angl.) [Paleoseismology (translated from English)]. M.: Nauchnyi mir, 2011. T. 1. 560 s. (in Rus.).
28. Yakubov A.A., Aliev A.A. Gryazevyie vulkany [Mud volcanoes]. M.: Znaniye, 1978. 56 s. (in Rus.).
29. Solonenko V.P., Treskov A.A., Kurushin R.A. i dr. Zhivaya tektonika, vulkany i seismichnost' Stanovogo nagor'ya [Living tectonics, volcanoes and seismicity of the Stanovoy Upland]. M.: Nauka, 1966. 231 s. (in Rus.).
30. Rogozhin E.A. Ocherki regional'noy seismotektoniki [Essays on regional seismotectonics]. M.: Izd-vo IFZ RAN, 2012. 340 s. (in Rus.).
31. Konstantinova T.G. Razzhizheniye gruntov i razrusheniya pri sil'nyh zemletryaseniayah [Soil liquefaction and destruction during strong earthquakes] // Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Geodinamicheskiye protsessy i prirodnyie katastrofy. Opyt Neftegorskaya», Yuzhno-Sahalinsk, 26–30 maya 2015 g. / pod red. B.V. Levina, O.N. Likhachevoi. Vladivostok: Dal'nauka, 2015. T. 1. C. 103–108 (in Rus.).
32. Imaev V.S. Arkhitektura seysmopasnykh zon Altaya [Architecture of seismic zones of Altai]. Barnaul: Izd-vo Altayskogo gos. un-ta, 2007. 232 s. (in Rus.).
33. Strel'tsov M.I. Neftegorskoye zemletryaseniye 27 (28) maya 1995 goda na Sahaline [Neftegorsk earthquake on May 27 (28), 1995 on Sakhalin]. M.: Yanus-K, 2005. 177 s. (in Rus.).
34. Hovland M., Gardner J.V., Judd A.G. The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards. *Geofluids*, 2002, 2 (2): 127–136. URL: doi.org/10.1046/j.1468-8123.2002.00028.x.
35. Lunina O.V., Andreev A.V., Gladkov A.A. Zakonomernosti proyavleniya i modeli lokalizatsii opasnykh geologicheskikh protsessov pri seysmogennoy aktivizatsii razlomov na yuge Sibiri i v Mongolii [Patterns of manifestation and localization models of dangerous geological processes during seismogenic activation of faults in the south of Siberia and Mongolia] // *Geologiya i geofizika*. 2014. № 8. S. 1294–1313 (in Rus.).
36. Borisov B.A. O nepriyemlivoi tendentsii k zavysheyniyu magnitud istoricheskikh zemletryaseniya na primere Krasnovodskogo zemletryaseniya [On the unacceptable tendency to overestimate the magnitudes of historical earthquakes on the example of the Krasnovodsk earthquake] // *Voprosy inzhenernoy seysmologii*. M.: Nauka, 1992. Vyp. 33. S. 28–39 (in Rus.).
37. Levina V.I. i dr. Olyutorskoye zemletryaseniye 20 aprelya 2006 g. s  $M_w=7.6$ ,  $I_0=9-10$  (Koryakskoye nagor'ye) [April 20, 2006 Olyutorskoe earthquake with  $M_w=7.6$ ,  $I_0=9-10$  (Koryak Highlands)] // *Zemletryaseniya Severnoy Evrazii*, 2006 god. Obninsk, 2012. S. 214–239 (in Rus.).
38. Tarakanov A.I., Pestrikov Yu.A., Marycheva A.V. Gidrodinamicheskiye vybrosy grunta pri zemletryaseniayah. Na primere Kamchatki [Hydrodynamic ejections of soil during earthquakes. On the example of Kamchatka] // *GeoInfo*. 15.05.2019. URL: <https://geoinfo.ru/product/tarakanov-aleksandr-ivanovich/gidrodinamicheskie-vybrosy-grunta-pri-zemletryaseniayah-na-primere-kamchatki-40737.shtml> (in Rus.).
39. Mironyuk S.G. Beregovyye primykaniya morskikh gazoprovodov: vybor tekhnologii stroitel'stva s uchetom otsenki geologicheskikh opasnostey [Landfalls (pipeline abutments) of offshore gas pipelines: the choice of construction technology taking into account the assessment of geological hazards] // *Gazotransportnyie sistemy: nastoyashchee i budushchee*. M.: Izd-vo Gazprom VNIIGAZ, 2015. C. 31 (in Rus.).
40. Kalinin E.V., Panas'yan L.L., Shirokov V.N., Artamonova N.B., Fomenko I.K. Modelirovaniye poley napryazheniy v inzhenerno-geologicheskikh massivah [Modeling of stress fields in engineering geological soil bodies (masses)]. M.: Izd-vo MGU, 2003. 262 s. (in Rus.).
41. Val'dman N.A., Grudnitskiy G.V., Egorov S.I. Nekotoryie voprosy povysheniya nadezhnosti morskikh podvodnykh truboprovodov [Some issues of improving the reliability of offshore underwater pipelines] // *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. 2012. № 66. S. 69–74 (in Rus.).
42. Grudnitskiy G.V., Muradov K.V., Ulanov E.F. Zaglubleniye morskikh podvodnykh truboprovodov [Deepening of offshore underwater pipelines]. M.: Izd-vo OAO «LUKOIL», 2000. 85 s. (in Rus.).
43. Koff G.L., Levin B.V., Morozov E.N., Borsukova O.V. Otsenka riska tsunami i seismicheskogo riska beregovykh zon Sahalinskoy oblasti [Assessment of tsunami risk and seismic risk of the coastal zones of the Sakhalin region]. Yuzhno-Sahalinsk, 2005. 61 s. (in Rus.).
44. Kan K., Zerkal' O.V., Fomenko I.K., Pavlenko O.V. Veroyatnostnyy analiz ustoychivosti sklonov pri seismicheskoy vozdeystvii s ispol'zovaniyem akselerogramm [Probabilistic analysis of slope stability under seismic impact using accelerograms] // *Osnovaniya, fundamente i mehanika gruntov (OFMG)*. 2019. № 2. S. 2–8. (in Rus.).
45. Shteinberg V.V. Kolebaniya poverhnosti zemli vblizi ochagov sil'nykh zemletryaseniya [Oscillations of the Earth's surface near the sources of strong earthquakes]: avtoref. dis... dok. fiz.-mat. nauk. M., 1985. 32 s. (in Rus.).
46. Nevel'skoye zemletryaseniye i tsunami 2 avgusta 2007 goda, o. Sahalin [Nevelsk earthquake and tsunami on August 2, 2007, Sakhalin Island] / pod red. B.V. Levina, I.N. Tikhonova. M.: Yanus-K, 2009. S. 122–128 (in Rus.).
47. Solonenko V.P. Zemletryaseniya i rel'yef [Earthquakes and relief] // *Geomorfologiya*. 1973. № 4. S. 3–13 (in Rus.).
48. Pinezina T.K., Kozhurin A.I. Opyt primeneniya georadara pri izuchenii seysmotektonicheskikh deformatsiy na Kamchatke [Experience in the use of georadar in the study of seismotectonic deformations in Kamchatka] // *Doklady nauchnogo simpoziuma «Problemy seysmichnosti i sovremennoy geodinamiki Dal'nego Vostoka i Vostochnoy Sibiri»*, 1–4 iyunya 2010 g., g. Habarovsk. S. 226–230 (in Rus.).
49. Bugaev E.G., Kishkina S.B. Otsenka dolgovremennoy i tekushchey seysmicheskoy opasnosti ploshchadok ob'yektov ispol'zovaniya atomnoy energii na osnovanii materialov inzhenernykh izyskaniy [Estimation of long-term and current seismic hazard of sites of nuclear facilities based on engineering survey materials] // *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2018. № 3. S. 1–13 (in Rus.).

50. Pisarenko V.F., Rodkin M.V. Raspredeleniya s tyazhelymi hvostami: prilozheniya k analizu katastrof [Distributions having heavy-tails: applications to catastrophe analysis] // Vychislitel'naya seysmologiya. M.: GEOS, 2007. Vyp. 38. 240 s. (in Rus.).
51. Mamedov P.Z., Guliev I.S. Subvertikal'nyie geologicheskiye tela v osadochnom chehle Yuzhno-Kaspiyskoy vpadiny [Subvertical geological bodies in the sedimentary cover of the South Caspian depression] // Izvestiya AZAN. Nauki o Zemle. 2003. № 3. S. 10–15 (in Rus.).
52. Kovachev C.A., Kaz'min V.G., Kuzin I.P., Lobkovskiy L.I. Novyye dannyye po seysmichnosti Srednego Kaspiya i ih vozmozhnaya tektonicheskaya interpretatsiya [New data on the seismicity of the Middle Caspian and their possible tectonic interpretation] // Geotektonika. 2006. № 5. S. 50–60 (in Rus.).
53. Guliev I.S., Kerimov V.Yu., Etirmishli G.D., Yusubov N.P., Mustaev R.N., Guseinova A.B. Sovremennyye geodinamicheskiye protsessy i ih znachenie v vospolnenii zapasov uglevodorodov v Chernomorsko-Kaspiyskom regione [Modern geodynamic processes and their significance in the replenishment of hydrocarbon reserves in the Black Sea and Caspian region] // Geotektonika. 2021. № 3. S. 96–112 (in Rus.).
54. Ustyugov G.V., Ershov V.V. Izverzheniya gryazevykh vulkanov Azerbaydzhana i ih korrelyatsiya s sil'nymi zemletryasenyami [Mud volcano eruptions in Azerbaijan and their correlation with strong earthquakes] // Vestnik VGU. Seriya: Geologiya. 2019. № 4. S. 6–13 (in Rus.).
55. Ershov V.V. Flyuidodinamicheskiye protsessy v gryazevulkanicheskikh strukturah i ih svyaz' s regional'noy seysmichnost'yu (na primere o-va Sahalin [Fluid-dynamic processes in mud volcanic structures and their connection with regional seismicity (on the example of Sakhalin Island)]: avtoref. dis... kand. geol.-min. nauk. M.: Izd-vo Instituta dinamiki geosfer RAN, 2013. 214 c. (in Rus.).
56. Ershov V.V. O nekotorykh osobennostyakh i mekhanizmah otklika fluidodinamicheskikh sistem na seysmicheskiye sobytiya [On some features and mechanisms of the response of fluid-dynamic systems to seismic events] // Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Geodinamicheskiye protsessy i prirodnyie katastrofy. Opyt Neftegorsk», Yuzhno-Sahalinsk, 26–30 maya 2015 g. / pod red. B.V. Levina, O.N. Likhachevoy. Vladivostok: Dal'nauka, 2015. T. 2. S. 416–418 (in Rus.).
57. Kovachev S.A., Krylov A.A. Vozmozhnyie prichiny neftegazovykh vysachivaniy (grifonov) v severnoy chasti Kaspiyskogo morya [Possible causes of oil and gas seeps (gryphons) in the northern part of the Caspian Sea] // Materialy 15-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennyye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy (MSOI-2017)». M., 2017. T. 1. S. 218–222 (in Rus.).
58. Astahov S.M. Vliyaniye seysmotektonicheskoy napryazhennosti nedra na protsessy vtorichnoy migratsii uglevodorodov [Influence of seismotectonic intensity of the bowels of the earth on the processes of secondary migration of hydrocarbons] // Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy. 2016. № 2. S. 14–21 (in Rus.).
59. Domanskiy A.V., Ershov V.V. Otsenka seysmicheskogo vozdeystviya na dinamiku grifonnoy deyatel'nosti gryazevykh vulkanov [Estimation of seismic impact on the dynamics of griffon activity of mud volcanoes] // Materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika P.N. Kropotkina, «Degazatsiya Zemli: geotektonika, geodinamika, geoflyuidy; nef' i gaz; uglevodorody i zhizn'», 18–22 oktyabrya 2010 g. M.: GEOS, 2010. S. 150–153 (in Rus.).
60. Holmogorov A.O. Seysmicheskaya aktivnost' i kolebaniya kontsentratsii metana v Yaponskom more [Seismic activity and fluctuations in methane concentrations in the Sea of Japan] // Tezisy dokladov 4-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Geodinamicheskiye protsessy i prirodnyie katastrofy», g. Yuzhno-Sahalinsk, 6–10 sentyabrya 2021 g. Yuzhno-Sahalinsk: Izd-vo Instituta morskoy geologii i geofiziki DVO RAN, 2021. S. 59 (in Rus.).
61. Kocharyan G.G., Vinogradov E.A., Gorbunova E.M., Markov V.K., Markov D.V., Pernik L.M. Gidrogeologicheskyy otklik podzemnykh kollektorov na seysmicheskiye kolebaniya // Fizika Zemli. 2011. № 12. S. 50–62 (in Rus.).
62. Wang C.-Y., Wong A., Dreger D.S., Manga M. Liquefaction limit during earthquakes and underground explosions: implications on ground-motion attenuation. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96: 355–363.
63. Manga M., Brodsky E. Seismic triggering of eruptions in the far field: volcanoes and geysers. Annual Review of Earth and Planetary Science, 2006, 34: 263–291.
64. Manga M., Brumm M., Rudolph M.L. Earthquake triggering of mud volcanoes. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26: 1785–1798.
65. Andreev A.V., Lunina O.V. Parametry zemletryaseny i prostranstvennoye raspredeleniye koseysmicheskikh effektov na yuge Sibiri i v Mongolii [Earthquake parameters and spatial distribution of coseismic effects in the south of Siberia and Mongolia] // Voprosy inzhenernoy seysmologii. 2012. T. 39. № 2. S. 37–68 (in Rus.).
66. Nikonov A.A. Opasnyie seysmoobuslovlennyye rel'yefoobrazuyushchiye protsessy v primorskoy zone i na shel'fe – nauchnyie i prikladnyie aspekty [Dangerous seismic relief-forming processes in the coastal zone and on the shelf – scientific and applied aspects] // Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Geomorfologicheskyye protsessy i ih prikladnyie aspekty» (6-ye Shchukinskiye chteniya). M.: Izd-vo Geograficheskogo fakul'teta MGU imeni M.V. Lomonosova, 2010. S. 331–333 (in Rus.).
67. Aleshin A.S. Seysmicheskoye mikrorayonirovaniye osobo otvetstvennykh ob'yektov [Seismic microzoning of especially critical objects]. M.: Svetoch Plyus, 2010. 304 s. (in Rus.).
68. Aptikaev F.F. Instrumental'naya shkala seysmicheskoy intensivnosti [Instrumental scale of seismic intensity]. M.: OOO «Nauka i obrazovanie», 2012. 176 s. (in Rus.).

69. Assinovskaya B.A., Ovsov M.K. Otsenka seismicheskoy opasnosti Vostochno-Baltiyskogo regiona [Seismic hazard assessment of the East-Baltic Region] // Georisk. 2015. № 3. S. 21–27. URL: [http://www.geomark.ru/journals\\_list/zhurnal-georisk-32015](http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-georisk-32015) (in Rus.).
70. Assinovskaya B.A., Panas N.M., Ovsov M.K., Antonovskaya G.N. Predvaritel'naya otsenka seismicheskoy opasnosti rayona Arkticheskogo hrebta Gakkelya i okrestnostey [Preliminary assessment of seismic hazard in the area of the Arctic Gakkel Ridge and its environs] // Rossiyskiy seismologicheskiy zhurnal. 2019. T. 1. № 1. S. 35–45 (in Rus.).
71. Kovachev S.A., Kuzin I.P., Lobkovskiy L.I. Perviy opyt seismicheskogo mikrorayonirovaniya morskogo dna s pomoshch'yu donnykh seismografov [The first experience of seismic microzoning of the seabed using bottom seismographs] // Vulkanologiya i seismologiya. 2002. № 4. S. 1–6 (in Rus.).
72. Kovachev S.A., Kuzin I.P., Lobkovskiy L.I. Detal'nyie seismologicheskiye nablyudeniya na tsentral'nom uchastke shel'fa i kontinental'nogo sklona severo-vostochnoy chasti Chernogo morya s pomoshch'yu donnykh stantsiy [Detailed seismological observations in the central area of the shelf and continental slope of the northeastern part of the Black Sea using bottom stations] // Fizika Zemli. 2003. № 1. S. 21–27 (in Rus.).
73. Krylov A.A., Ivashchenko A.I., Kovachev S.A. Otsenka seismicheskoy opasnosti neftegazonosnykh shel'fovyykh zon na primere Severnogo Kaspiya [Estimation of seismic hazard of oil-and-gas-bearing shelf zones on the example of the Northern Caspian] // Okeanologiya. 2015. T. 55. № 6. S. 1006–1012 (in Rus.).
74. Kuzin I.P., Kovachev S.A., Lobkovskiy L.I. Ob otsenke seismicheskoy opasnosti i seismicheskoy mikrorayonirovaniy uchastkov stroitel'stva morskikh sooruzheniy na slaboseismichnykh akvatoriyyah [On the assessment of seismic hazard and seismic microzoning of construction sites for offshore structures in low seismic water areas] // Vulkanologiya i seismologiya. 2009. № 2. S. 67–80.
75. Lobkovskiy L.I., Kuzin I.P., Kovachev S.A. Seismicheskoye mikrorayonirovaniye shel'fa, kontinental'nogo sklona i prilgayushchey chasti vostochno-chernomorskoy vpadiny [Seismic microzoning of the shelf, continental slope and adjacent part of the Eastern Black Sea depression] // Kompleksnyie issledovaniya severo-vostochnoy chasti Chernogo morya. M.: Nauka, 2002. S. 380–389 (in Rus.).
76. Mindel' I.G., Trifonov B.A., Kaurkin M.D., Nesynov V.V. Otsenka ishodnykh seismicheskikh vozdeystviy dlya severnoy chasti shel'fa Barentseva morya (r-n Novoy Zemli) dlya resheniya zadach seismicheskogo mikrorayonirovaniya territorii osvoyeniya perspektivnykh uchastkov dobychi uglevodorodov [Estimation of initial seismic impacts for the northern part of the shelf of the Barents Sea (Novaya Zemlya region) for solving the problems of seismic microzoning of territories for the development of promising hydrocarbon production areas] // Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. 2019. № 2. S. 38–47 (in Rus.).
77. Pavlenko O.V. Seismicheskoye volny v gruntovykh sloyakh: nelineynoye povedeniye grunta pri sil'nykh zemletrasenyiyah poslednykh let [Seismic waves in soil layers: nonlinear behavior of soil during strong earthquakes in recent years]. M.: Nauchnyi mir, 2009. 260 s. (in Rus.).
78. Kulikov E.A., Ivashchenko A.I., Mironyuk S.G. Otsenka tsunamiopasnosti na severo-vostochnom poberezh'ye o. Sahalin i uroki avarii na AES Fukushima-Dayichi [Assessment of tsunami hazard on the northeast coast of the Sakhalin island and the lessons of the accident at the Fukushima-Daiichi nuclear power plant] // Georisk. 2015. № 1. S. 26–30 (in Rus.).
79. Mironyuk S.G. Geologicheskiye opasnosti dna vostochnoy chasti Chernogo morya i ih uchet pri vybore trass podvodnykh gazoprovodov [Geological hazards of the bottom of the eastern part of the Black Sea and their consideration when choosing the routes of underwater gas pipelines] // Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya D.G. Panova, «Geologiya, geografiya i ekologiya okeana», g. Rostov-na-Donu, 8–11 iyunya 2009 g. Rostov na-Donu: Izd-vo YuNTs RAN, 2009. S. 230–233 (in Rus.).
80. Mironyuk S.G. Otsenka seismicheskoy opasnosti uchastkov stroitel'stva morskikh truboprovodnykh i dobychnykh sooruzheniy na shel'fe [Seismic hazard assessment of construction sites for offshore pipeline and production facilities on the shelf] // Gazovaya promyshlennost'. 2014. № S (712). S. 113–119 (in Rus.).
81. Mironyuk S.G. Podhod k kolichestvennoy otsenke opasnosti dlya truboprovoda, peresekayushchego aktivnyi razlom (Barentsevo more) [Approach to quantitative risk assessment for a pipeline crossing an active fault (Barents Sea)] // Materialy 16-y Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiyskoy Federatsii», g. Moskva, 1–3 dekabrya 2021 g. S. 561–568 (in Rus.).
82. Mironyuk S.G., Ionov V.Yu. Otsenka seismicheskoy razzhizhaemosti gruntov Barentseva morya [Assessment of seismic liquefaction of soils in the Barents Sea] // Materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii. Vypusk 23. Sergeyevskiy chteniye. Fundamental'nyie i prikladnyie voprosy sovremennogo gruntovedeniya Sergeyevskiy chteniye. Fundamental'nyie i prikladnyie voprosy sovremennogo gruntovedeniya. M., 2022. S. 202–207 (in Rus.).
83. Mironyuk S.G., Kropotkin M.P., Ionov V.Yu. Otsenka ustoychivosti obval'no-opolznevoy sklona Chernomorskogo poberezh'ya s uchetom vozmozhnykh seismicheskikh vozdeystviy [Assessment of the stability of the landslide slope of the Black Sea coast, taking into account possible seismic effects] // Materialy dokladov Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Izucheniye opasnykh prirodnykh protsessov i yavleniy pri inzhenernykh izyskaniyakh». M: Geomarketing, 2019. S. 99–113 (in Rus.).
84. Mironyuk S.G., Roslyakov A.G., Ivanova A.A. i dr. Vyiavleniye i podhody k analizu opasnosti i riska razryvnykh narusheniy pri inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh na akvatoriyyah [Identification and approaches to the analysis of the danger and risk of faults in engineering-geological surveys in water areas] // Inzhenernyie izyskaniya. 2020. T. 14, № 1. S. 24–38 (in Rus.).
85. Assinovskaya B.A., Nahshina L.P. Nekotorye problemy seismicheskogo rayonirovaniya akvatoriyy [Some problems of seismic zoning of water areas] // Seismicheskoe raionirovaniye shel'fa. Vladivostok: Izd-vo DVO AN SSSR, 1990. S. 130–138 (in Rus.).

86. Ivashchenko A.I., Kim Ch.U., Fedorishin M.S. Opredeleniye seysmicheskoy opasnosti na shel'fe [Determination of seismic hazard on the shelf] // Seysmicheskoye rayonirovaniye shel'fa. Vladivostok: Izd-vo DVO AN SSSR, 1990. S. 5–21.
87. Kuzin I.P. O seysmicheskom rayonirovanii shel'fov (na primere Ohotskogo morya) [On seismic zoning of shelves (on the example of the Sea of Okhotsk)] // Seysmicheskoye rayonirovaniye shel'fa. Vladivostok: Izd-vo DVO AN SSSR, 1990. S. 66–98 (in Rus.).
88. Vasil'ev Yu.I., Gvozdev A.A., Ivanova L.A. i dr. Mehanicheskiye svoystva myagkogo grunta v intervale napryazheniy do  $(5\div 10)\times 10^5$  Pa ili 5–10 kg/sm<sup>2</sup> i vybor modeli grunta, opisyvayushchey yego povedeniye pri sil'nyh zemletryaseniyyah [Mechanical properties of soft soil in the stress range up to  $(5\div 10)\times 10^5$  Pa or 5–10 kg/cm<sup>2</sup> and the choice of a soil model that describes its behavior during strong earthquakes] // Seysmicheskoye mikroyonirovaniye. M.: Nauka, 1977. S. 121–129 (in Rus.).
89. Ostrovskiy A.B. Paleoseysmotektonicheskiye dislokatsii na Chernomorskom poberezh'ye Severo-Zapadnogo Kavkaza v svyazi s otsenkoy sovremennoy seysmicheskoy opasnosti etoy territorii [Paleoseismotectonic dislocations on the Black Sea coast of the Northwestern Caucasus in connection with the assessment of the current seismic hazard of this territory] // Kompleksnyie issledovaniya Chernomorskoy vpadiny. M.: Nauka, 1970. S. 46–58 (in Rus.).
90. Ovsyuchenko A.N., Novichihin A.M., Byhalova O.N., Rogozhin E.A., Korzhenkov A.M., Lar'kov A.S., Butanaev Yu.V., Lukashova R.N. Mezhdistsiplinarnoye datirovaniye Utrishskikh seysmodislokatsiy: k lokalizatsii ochaga sil'nogo istoricheskogo zemletryaseniya na Zapadnom Kavkaze [Interdisciplinary dating of the Utrish seismic dislocations: to the localization of the source of a strong historical earthquake in the Western Caucasus] // Voprosy inzhenernoy seismologii. 2019. T. 46. № 3. S. 50–73 (in Rus.).
91. Mironyuk S.G., Kropotkin M.P. Vozmozhnyi mekhanizm i prichiny obrazovaniya utrishskikh opolzney sushi i shel'fa (poluostrov Abrau) [Possible mechanism and reasons for the formation of Utrish land and shelf landslides (Abrau Peninsula)] // Materialy 2-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati chlena-korrespondenta RAN D.G. Matishova, «Zakonomernosti formirovaniya i vozdeystviya morskikh, atmosferynykh opasnykh yavleniy i katastrof na pribrezhnuyu zonu RF v usloviyakh global'nykh klimaticheskikh i industrial'nykh vyzovov (Opasnyie yavleniya II)». 2020. S. 52–57 (in Rus.).
92. Gabsatarova I.P., Malyanova L.S., Selivanova E.A., Yakusheva V.N. Su-Psehskeye zemletryaseniye 10 dekabrya 2012 g. s  $K_p=11.5$ ,  $M_{Wreg}=4.3$ ,  $I_{op}=5-6$  (Anapskiy seysmoaktivnyi rayon) [Su-Psekh earthquake on December 10, 2012 with  $K_p=11.5$ ,  $M_{Wreg}=4.3$ ,  $I_{op}=5-6$  (Anapa seismically active region)] // Zemletryaseniya Severnoy Evrazii. Vypusk 21 (2012 g.). Obninsk: Izd-vo FITs EGS RAN, 2018. S. 420–432 (in Rus.).
93. Kucsu I., Okamura M., Matsuoka H., Gokasan E., Awata Y., Tur H., Simsek M., Kecer M. Seafloor gas seeps and sediment failures triggered by the August 17, 1999 earthquake in the Eastern part of the Gulf of Izmit, Sea of Marmara, NW Turkey. Marine Geology, 2005, 215: 193–214.
94. Kitamura A., Tominaga E., Sakai H. Subaqueous sand blow deposits induced by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Japan. Proceedings of the Paleoseismology Workshop, March 15, 1999, Tsukuba, Japan. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1440-1738.2002.00351.x>.
95. Dudarev O.V. Sovremenniy litomorfogenez na vostochno-arkticheskom shel'fe Rossii [Modern lithomorphogenesis on the East Arctic shelf of Russia]: avtoreferat dis... dok. geol.-miner. nauk. Vladivostok, 2016. 49 s. (in Rus.).
96. Field M.E., Jennings A.E. Seafloor gas seeps triggered by a northern California earthquake. Marine Geology, 1987, 77: 39–51.

### Информация об авторе

#### МИРОНЮК СЕРГЕЙ ГРИГОРЬЕВИЧ

Старший научный сотрудник лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к. г.-м. н., доцент (инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение), г. Москва, Россия

### Information about the author

#### SERGEY G. MIRONYUK

PhD (Geology and Mineralogy), assistant professor, senior researcher (Engineering Geology, Permafrost Studies and Ground Science) at the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Telegram-канал журнала

Независимый электронный журнал  
**ГеоИнфо**

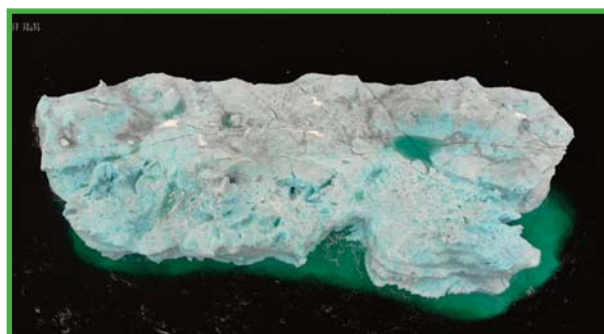
- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfoweb>



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**

**АЛЬВЬОЛИ М.**

Научно-исследовательский институт гидрогеологической защиты Национального исследовательского совета (IRPI-CNR), г. Перуджа, Италия, massimiliano.alvioli@irpi.cnr.it  
Адрес: Италия, I-06128, г. Перуджа, ул. Мадонна Альта, д. 126

**САНТАНДЖЕЛО М.**

Научно-исследовательский институт гидрогеологической защиты Национального исследовательского совета Италии (IRPI-CNR), г. Перуджа, Италия

Адрес: Италия, I-06128, г. Перуджа, ул. Мадонна Альта, д. 126

**ФЬОРУЧЧИ Ф.**

Научно-исследовательский институт гидрогеологической защиты Национального исследовательского совета (IRPI-CNR), г. Перуджа, Италия

Адрес: Италия, I-06128, г. Перуджа, ул. Мадонна Альта, д. 126

**КАРДИНАЛИ М.,**

Научно-исследовательский институт гидрогеологической защиты Национального исследовательского совета (IRPI-CNR), г. Перуджа, Италия

Адрес: Италия, I-06128, г. Перуджа, ул. Мадонна Альта, д. 126

**МАРКЕЗИНИ И.**

Научно-исследовательский институт гидрогеологической защиты Национального исследовательского совета (IRPI-CNR), г. Перуджа, Италия

Адрес: Италия, I-06128, г. Перуджа, ул. Мадонна Альта, д. 126

**РАЙХЕНБАХ П.**

Научно-исследовательский институт гидрогеологической защиты Национального исследовательского совета (IRPI-CNR), г. Перуджа, Италия

Адрес: Италия, I-06128, г. Перуджа, ул. Мадонна Альта, д. 126

**РОССИ М.**

Научно-исследовательский институт гидрогеологической защиты Национального исследовательского совета (IRPI-CNR), г. Перуджа, Италия

Адрес: Италия, I-06128, г. Перуджа, ул. Мадонна Альта, д. 126

**ГУЦЦЕТТИ Ф.**

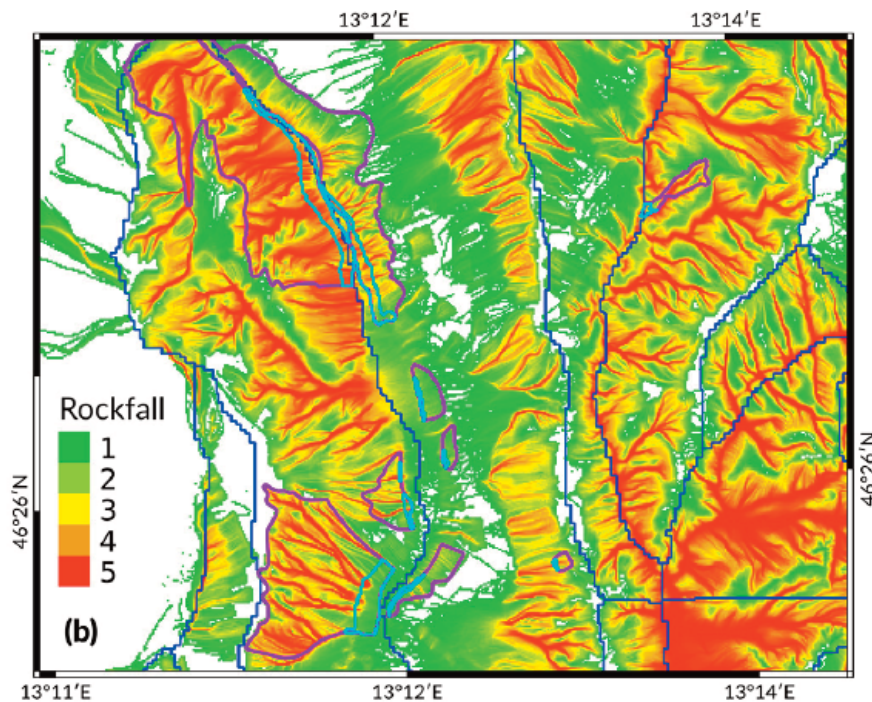
Научно-исследовательский институт гидрогеологической защиты Национального исследовательского совета (IRPI-CNR), г. Перуджа, Италия

Адрес: Италия, I-06128, г. Перуджа, ул. Мадонна Альта, д. 126

**ПЕРУККАЧЧИ С.**

Научно-исследовательский институт гидрогеологической защиты Национального исследовательского совета (IRPI-CNR), г. Перуджа, Италия

Адрес: Италия, I-06128, г. Перуджа, ул. Мадонна Альта, д. 126



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

## РАНЖИРОВАНИЕ ИТАЛЬЯНСКОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ ПО ПОДВЕРЖЕННОСТИ КАМНЕПАДАМ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К НИМ

Обзорная статья. Перевод с английского  
Поступила в редакцию 19.12.2022. Принята к публикации 13.02.2023.  
© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2023

**АННОТАЦИЯ**

Представляем вниманию читателей адаптированный и немного сокращенный перевод статьи «Ранжирование итальянской железнодорожной сети по подверженности камнепадам и чувствительности к ним» [1], которая была опубликована издательством Elsevier в 2021 году на английском языке в журнале Engineering Geology и находится в открытом доступе (онлайн) по лицензии CC-BY-4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Эта лицензия позволяет копировать, адаптировать, переделывать и использовать материал для любых целей, даже коммерческих, при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на первоисточник [1] приведена в конце перевода. Авторами указанной статьи являются специалисты из Научно-исследовательского института гидрогеологической защиты Национального исследовательского совета Италии – Массимилиано Альвьоли, Микеле Сантанджело, Федерика Фьоруччи, Мауро Кардинали, Иван Маркезини, Паола Райхенбах, Мауро Росси, Фаусто Гуццетти и Сильвия Перуккаччи.

Камнепады представляют значительную угрозу для наземного транспорта из-за их быстроты, разрушительного потенциала и высокой вероятности возникновения на крутых склонах, которые часто встречаются вдоль автомобильных и железных дорог. Подходы к оценке подверженности камнепадам варьируют от чисто феноменологических и статистических методов, пригодных для моделирования больших территорий, до чисто



детерминистских методов, которые обычно проще использовать для локального анализа. Общим требованием является необходимость определения потенциальных мест отрыва каменного материала, часто встречающихся наверху склонов или обрывов, и последующая оценка зон транзита камнепадов.

Авторы работы [1] выполнили физически обоснованный анализ подверженности камнепадам железнодорожной сети Италии на площади 25 400 км<sup>2</sup>. Выборка источников камнепадов, нанесенная на карту экспертами, помогла разработать вероятностную идентификацию потенциальных источников на основе цифровой модели рельефа и углов наклона поверхности. Расположение источников было ключевым исходным материалом для трехмерного моделирования зон транзита камнепадов из любого возможного источника в программе STONE. Сегменты железнодорожной сети были разделены на классы по подверженности камнепадам и на классы по их значимости для работы всей сети. В результате была разработана совместная классификация сегментов (и соответствующая карта) как на основе подверженности камнепадам, так и на основе значимости каждого сегмента в сети.

Эти карты могут быть полезны для последующей оценки рисков и определения приоритетов повышения безопасности участков итальянской железнодорожной сети в национальном масштабе.

Перевод статьи подготовлен при поддержке компании «ГАБИОНЫ МАККАФЕРРИ СНГ» – партнера и одного из генеральных спонсоров журнала «ГеоИнфо».

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

камнепад; транспортная сеть; физически обоснованное компьютерное моделирование; подверженность камнепадам.

#### ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Альвиоли М., Сантанджело М., Фьоруччи Ф., Кардинали М., Маркезини И., Райхенбах П., Росси М., Гуццетти Ф., Перуккаччи С. Ранжирование итальянской железнодорожной сети по подверженности камнепадам и чувствительности к ним (пер. с англ.) // ГеоИнфо. 2023. № 1. С. 48–71 doi:10.58339/2949-0677-2023-5-1-48-71

## ROCKFALL SUSCEPTIBILITY AND NETWORK-RANKED SUSCEPTIBILITY ALONG THE ITALIAN RAILWAY

*Review paper. Translated from English*

*Received 19.12.2022. Accepted 12.02.2023.*

© Independent electronic journal "GeoInfo", 2023

#### MASSIMILIANO ALVIOLI

Research Institute for Hydrogeological Protection, National Research Council, Perugia, Italy,  
massimiliano.alvioli@irpi.cnr.it  
Address: 126 Madonna Alta st., Perugia, I-06128, Italy

#### MICHELE SANTANGELO

Research Institute for Hydrogeological Protection, National Research Council, Perugia, Italy  
Address: 126 Madonna Alta st., Perugia, I-06128, Italy

#### FEDERICA FIORUCCI

Research Institute for Hydrogeological Protection, National Research Council, Perugia, Italy  
Address: 126 Madonna Alta st., Perugia, I-06128, Italy

#### MAURO CARDINALI

Research Institute for Hydrogeological Protection, National Research Council, Perugia, Italy  
Address: 126 Madonna Alta st., Perugia, I-06128, Italy

#### IVAN MARCHESINI

Research Institute for Hydrogeological Protection, National Research Council, Perugia, Italy  
Address: 126 Madonna Alta st., Perugia, I-06128, Italy

#### ABSTRACT

We present to the readers of the GeoInfo journal an adapted and slightly abridged translation of the paper "Rockfall susceptibility and network-ranked susceptibility along the Italian railway" [1], which was published by the Elsevier publisher in 2021 in English in the Engineering Geology journal and is in open access (online) under the CC-BY-4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). This license allows to copy, adapt, alter and use the material for any purpose (even commercial) provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original source [1] is given at the end of the translation. The authors of this article are specialists from the Research Institute of Hydrogeological Protection of the National Research Council of Italy. They are: Massimiliano Alvioli, Michele Santangelo, Federica Fiorucci, Mauro Cardinali, Ivan Marchesini, Paola Reichenbach, Mauro Rossi, Fausto Guzzetti, Silvia Peruccacci.

Rockfalls pose a substantial threat to ground transportation, due to their rapidity, destructive potential and high probability of occurrence on steep topographies, often found along roads and railway routes. Approaches for the assessment of rockfall susceptibility range from purely phenomenological methods and statistical methods, suitable for modeling large areas, to purely deterministic ones, usually easier to use in local analyses. A common requirement is the need to locate potential detachment points, often found uphill on cliffs, and the subsequent assessment of the runout areas of rockfalls stemming from such points.

The authors of the original paper [1] performed a physically based analysis of the susceptibility to rockfalls of the Italian railway network in an area of 25,400 km<sup>2</sup>. A sample of rockfall sources, which had been mapped by experts, helped to develop a probabilistic identification of potential sources based on a digital elevation model and angles of inclination of the surface. The location of the sources was a key information for three-dimensional modeling of rockfall

**PAOLA REICHENBACH**

Research Institute for Hydrogeological Protection, National Research Council, Perugia, Italy  
Address: 126 Madonna Alta st., Perugia, I-06128, Italy

**MAURO ROSSI**

Research Institute for Hydrogeological Protection, National Research Council, Perugia, Italy  
Address: 126 Madonna Alta st., Perugia, I-06128, Italy

**FAUSTO GUZZETTI**

Research Institute for Hydrogeological Protection, National Research Council, Perugia, Italy  
Address: 126 Madonna Alta st., Perugia, I-06128, Italy

**SILVIA PERUCCACCI**

Research Institute for Hydrogeological Protection, National Research Council, Perugia, Italy  
Address: 126 Madonna Alta st., Perugia, I-06128, Italy

transit zones from any possible source in the STONE program. The segments of the railway network were divided into classes according to rockfall susceptibility and into classes according to their significance for the operation of the entire network. As a result, a joint classification of the segments (and a corresponding map) was developed both on the basis of rockfall susceptibility and on the basis of significance of each segment in the network.

These maps can be useful for further risk assessment and prioritization of improving the safety of the Italian railways on a national scale.

The translation of the paper was prepared with the support of the "MACCAFERRI GABIONS CIS" company, which is a partner and one of the general sponsors of the "GeoInfo" journal.

**KEYWORDS:**

rockfall; transportation network; physically based simulation; rockfall susceptibility.

**FOR CITATION:**

Alvioli M., Santangelo M., Fiorucci F., Cardinali M., Marchesini I., Reichenbach P., Rossi M., Guzzetti F., Peruccacci S. Ranzhironvaniye ital'yanskoj zheleznodorozhnoy seti po podverzhennosti kamnepadam i chuvstvitel'nosti k nim (per. s angl.) [Rockfall susceptibility and network-ranked susceptibility along the Italian railway (translated from English)]. *GeoInfo*, 2023, 1: 48–71 doi:10.58339/2949-0677-2023-5-1-48-71 (in Rus.).

**ВВЕДЕНИЕ** ▶

Подверженность камнепадам участков вдоль транспортного коридора является постоянной темой в исследованиях оползневых процессов. Выводы, основанные на количественных исследованиях, актуальны для практических целей, поскольку они предоставляют ключевую информацию для снижения рисков и могут помочь в быстрой оценке возможных критических для транспортной сети мест, в планировании и проектировании защитных барьеров в таких местах.

Карта подверженности камнепадам не содержит информации ни о величине таких возможных событий, ни об их ожидаемой частоте. Стремление к такому полному описанию (то есть составление карты опасностей или рисков) потребовало бы знаний о процессах, ведущих к мобилизации отдельных блоков или массивов скальных пород в локальном масштабе.

К входным данным для составления карты подверженности камнепадам меньше требований, хотя собрать их для большой площади все же не так просто. Минимальными требованиями здесь являются: информация о местах начала камнепадов, о лежащей в основе этого топографии и наличие модели для описания транзита каменного материала. В большинстве исследований камнепадов, имеющих к моменту публикации данной статьи, использовались физически обоснованные модели, поскольку они дают более точное описание все-

го процесса, но есть и немного примеров статистических моделей подверженности камнепадам (Frattini et al., 2008).

Существуют феноменологические (более простые) способы соотнесения источников камнепадов с местами их остановки, например с использованием эмпирического угла так называемого сектора тени (максимальной поражаемой зоны) с вершиной в точке начала камнепада (Evans, Hungr, 1993). Здесь авторами настоящей статьи [1] было решено использовать модель STONE, разработанную ранее Гуццетти и др. (Guzzetti et al., 2002). Для этой модели требуются: цифровая модель рельефа (ЦМР), заранее определенные места источников камнепадов и численные параметры, описывающие реституцию (восстановление) энергии при отскоках в местах ударов камней о поверхность склона. Авторы работы [1] использовали количество траекторий на ячейку сетки в модели для расчетов подверженности территорий камнепадам.

Для достижения поставленных целей авторы данного исследования [1] сделали следующее:

1) применили новый метод установления зон источников камнепадов для определения их траекторий (Alvioli et al., 2020b), основанный на экспертном картировании выборки зон источников и на статистическом обобщении по всей исследуемой территории;

2) выполнили вероятностное моделирование для подсчета траекторий с использованием модели STONE, кото-

рую в конечном итоге классифицировали как карту подверженности камнепадам национальной железнодорожной сети Италии;

3) выполнили анализ с помощью регулярных сеток в рамках теории графов, пытаясь определить влияние возможных событий на функциональность сети в целом.

Подтвердить эти результаты помогла национальная инвентаризация оползней, для которой использовалось и используется более 70 000 камнепадных полигонов.

**ИСТОРИЯ ВОПРОСА** ▶**Физически обоснованное моделирование камнепадов** ▶

Камнепады имеют следующие стадии:

1) отрыв скального материала от поверхности склона (обычно крутого), как правило, путем скольжения, обрушения или падения;

2) последующее движение камней вниз по склону с различной динамикой.

Эти явления могут достаточно широко варьировать, причем двумя крайними случаями являются независимое падение отдельных скальных фрагментов без взаимодействия друг с другом и поток массы камней с взаимодействием или без взаимодействия с поверхностью склона (Bourgier et al., 2013). Явления, которые не подпадают строго под эти два предельных случая, содержат элементы обоих, и их труднее всего моделировать.

В данной работе [1] авторы не использовали физически обоснованную модель процесса отрыва. Насколько им было известно к моменту написания статьи [1], не существует модели, которая полностью бы охватывала весь многосторонний механизм инициирования камнепада (Collins, Stock, 2016; Matasci et al., 2018). Одной из возможностей избежать подробного описания этой стадии было бы прямое картирование по результатам наблюдений за скальными склонами, например с помощью лазерных сканеров (Jaboyedoff et al., 2012; Riquelme et al., 2014; Li et al., 2019), фотogramметрии (Buyer et al., 2020) и аналогичных подходов в сочетании с использованием беспилотных летательных аппаратов (Perez-Rey et al., 2019; Santangelo et al., 2019; Giordan et al., 2020). Такие измерения и алгоритмы могут предоставить подробную информацию о трещиноватости и/или нарушениях сплошности скальных грунтов, ориентации блоков и распределении трещин, что даст возможность сделать выводы о местоположении возможных зон отрыва каменного материала (Tuganboy et al., 2018; Menegoni et al., 2021; Mavrouli, Corominas, 2020).

Описанные выше методы выявления потенциальных источников камнепадов применимы только на небольших площадях и, возможно, на отдельных склонах.

Еще один подход, который может быть очень эффективным и применяться к относительно большим территориям, представляет собой экспертное картирование возможных зон источников с помощью дешифрирования фотоснимков (аэрофотоснимков, космических снимков и др.) (Santangelo et al., 2019, 2020).

В своей работе [1] авторы стремились к оценке очень большой площади, поэтому ни один из этих методов не мог быть ими применен. Для достижения поставленных ими целей многообещающим мог бы быть такой метод многомерного статистического анализа, как регрессионный анализ (Rossi et al., 2021), но он не был использован, поскольку авторы исследования [1] выбрали метод, основанный на данных (Alvioli et al., 2020b), который будет описан позже.

Авторы статьи [1] имели дело только с отдельными падающими камнями, движущимися по независимым траекториям. Их можно описать с помощью баллистической динамики во время свободного падения, а также отскоков или качения по поверхности. В частности, в

использованной авторами модели STONE принимается наличие «точечных» камней, перемещающихся только под действием силы тяжести и ограничений, обусловленных топографией и геологией. Компьютерная программа STONE трехмерно моделирует три возможных типа движения камня вдоль его траектории за ряд временных шагов до тех пор, пока движение не прекратится из-за исчерпания начальной кинетической энергии за счет трения.

Типы движения масс скальных фрагментов с траекториями, отличными от баллистических, то есть прерываемыми соударениями с поверхностью и отскоками или качением, не рассматривались в этой работе [1], поскольку для них требуются модели, подходящие для описания снежных и каменных лавин и каменных потоков, в то время как в модели STONE не учитываются взаимодействия между камнями и их фрагментация. Недавно Матас и др. (Matas et al., 2020) и Руис-Каррулла и др. (Ruiz-Carulla et al., 2020) подробно изучили механизм фрагментации больших скальных обломков и валунов, непосредственно наблюдая за их обломками после ударов о поверхность склона. Данные об угловом распределении этих обломков помогли откалибровать параметры модели RockGIS (Matas et al., 2017), реализующей фрактальную модель массы фрагментов, отсутствующую в STONE.

Чтобы выйти за рамки оценки пространственной подверженности, следует учитывать величину и периодичность возможных камнепадов (Guzzetti et al., 2003, 2004) на рассматриваемом участке. Их величина может варьировать в широком диапазоне объемов – от кубических дециметров до миллионов кубических метров (Hung et al., 1999). Мельзнер и др. (Melzner et al., 2020) также исследовали частотно-размерные распределения, обнаружив зависимость от метода, используемого для картирования камнепадов, и, как и Короминас и др. (Corominas et al., 2018), рекомендовали проявлять осторожность при рассмотрении больших территорий. Авторы настоящей статьи [1] не рассматривали величины камнепадов, так как модель STONE не учитывает их напрямую.

Авторы работы [1] также не учитывали конкретные триггеры. В действительности камнепады могут быть спровоцированы разными явлениями, чаще всего интенсивными дождевыми осадками и сейсмической активностью, но при этом на их возникновение влияют

самые разные факторы (Macciotta et al., 2015). Статические факторы – это крутой склон и его строение, а динамические факторы – это термические деформации и/или циклы замерзания-оттаивания скальных грунтов. Существуют исследования корреляций между камнепадами и дождями, например с помощью вероятностных порогов атмосферных осадков (Melillo et al., 2020), и исследования связи между камнепадами и дождями, периодами заморозков и сильными колебаниями температуры (Delonca et al., 2014). Авторы работы [1] не включили в использованный ими метод описание, зависящее от триггера или времени, поскольку оно также выходит за рамки модели STONE.

### Анализ железнодорожной сети в рамках теории графов ▶

Теория графов – это математическое представление попарных взаимосвязей в совокупности объектов. Существует целая наука о графах с примерами в широком спектре теоретических и прикладных исследований (Chartrand et al., 1993). Одной из основных областей применения теории графов является представление физически существующей сети. Литература по науке о сетях и/или графах обширна и посвящена множеству явлений. Примерами физических сетей являются биологические и социальные сети, электросети, телекоммуникации, транспортные сети и даже «всемирная паутина» (Barthelemy, 2011). Исследования, связанные с транспортными сетями, часто охватывают городские условия, включая взаимозависимые и/или мультимодальные сети различных транспортных средств, а также коммуникационные сети (Alvioli, 2020).

В литературе также встречаются описания исследований эффектов от разрушения ряда вершин (узлов) или ребер. В работе Маттссона и Дженелиуса (Mattsson, Jenelius, 2015) имеется обзор устойчивости транспортных сетей. Несколько общих результатов, полученных ими, заключаются в том, что избыточность в сложной сети недостаточна для устойчивости к нарушениям и разрушениям, в то время как устойчивость намного выше для сетей, обладающих масштабной инвариантностью (Albert et al., 2000), как и для «всемирной паутины» (Cohen et al., 2000). С другой стороны, безмасштабные сети подвержены нарушениям при удалении нескольких соответствующих вершин. Особенностью сетей, важной для их устойчивости, является наличие петель (Katifori

et al., 2010) и уязвимых мест (Bassolas et al., 2020).

В этой работе [1] используются основные понятия теории графов, полезные для понимания значимости конкретного ребра во всем графе. Сетью здесь называется набор физических связей (перегонов, или звеньев, железных дорог) и узлов (станций или пересечений путей), а графом – эквивалентное представление сети с помощью ребер и вершин. Элементы физической сети связаны с определенными географическими позициями, в то время как соответствующий ей граф представляет собой абстракцию, которая сохраняет только топологию физической сети и (необязательно) еще несколько величин.

Далее в работе [1] также говорится о центральности по промежуточности (степени посредничества) для вершин и ребер (Freeman, 1978, Lu, Zhang, 2013) – мере их значимости для функционирования всей соответствующей физической сети. Степень посредничества вершины/ребра определяется количеством кратчайших путей, проходящих через эту вершину/ребро, из общего множества кратчайших путей, соединяющих любые две пары вершин в графе (пути «все ко всем»). Центральность по промежуточности вершин/ребер зависит и от весов ребер в графе. Поскольку граф, рассматриваемый в статье [1], связан с физической сетью, вес ребер оценивается по фактической длине железнодорожных сегментов.

Авторы исследования [1] разработали новый (простой) показатель центральности по промежуточности, предназначенный для количественной оценки воздействия на сеть в результате удаления одного ребра, что имитирует прерывание функционирования соответствующего сегмента железной дороги из-за какого-либо внешнего события. Этот новый показатель позволяет проводить комбинированную классификацию участков железных дорог, основанную одновременно на их степени посредничества (значимости) и на подверженности камнепадам. В статье [1] авторы называют такую новую классификацию сети «ранжированной по подверженности и чувствительности к камнепадам». Схожий подход, а именно оценка рисков сети, сочетающая определение подверженности связующих сегментов отказам и их важности, был предложен Кэтсом и др. (Cats et al., 2016) для мультимодальной сети общественного транспорта в Нидерландах.

## Доступные данные ►

В представленном исследовании [1] использовались как уже имеющиеся материалы, так и вновь построенные карты (последние включали общенациональную карту склоновых систем и карту выборок зон источников камнепадов). Перечислим и кратко опишем такие фрагменты информации.

1. *Необходимая для всей последовательности обработки информации цифровая модель рельефа TINITALY с самым высоким разрешением, бесплатно доступная для всей Италии* (Tarquini et al., 2007). Ячейки ее сетки соответствуют размерам 10 м x 10 м в системе координат EPSG:32633. На рисунке 1, а показана карта рельефа, основанная на модели EU-DEM («Склоновые единицы на ЦМР») с разрешением 25 м (ее использование в данной работе [1] ограничено этой цифрой).

2. *Материалы общенациональной инвентаризации камнепадов*. Итальянская база данных по оползням (IFFI) (Trigila et al., 2010; ISPRA, 2018) содержит более 620 000 оползневых полигонов, из которых 70 576 относятся к камнепадным, а 4051 расположены в непосредственной близости от железнодорожных путей. Последние и использовались в данной работе [1] (камнепадными полигонами авторы статьи [1] называют территории, охватывающие зоны источников, движения и отложения камнепадов).

3. *Мелкомасштабная (масштаба 1:100 000) литологическая карта Италии* (Fongo, 2018; Vucci et al., 2021). На рисунке 1, б показана карта с 19-ю литологическими классами (расшифрованными в таблице 1).

4. *Кадастровая карта Италии с отображением рельефа* (Guzzetti, Reichenbach, 1994).

5. *Общенациональная карта склоновых единиц (склоновых систем)* (Alvioli et al., 2020a), в том числе опубликованная 21 августа 2018 года в отчете об исследовании P-05-1 (Unita territoriali di riferimento – «Территориальные единицы») проекта RFI-SERVICE Научно-исследовательского института гидрогеологической защиты Национального исследовательского совета Италии (IRPI-CNR). Карта содержит более 300 000 полигонов склоновых систем различных форм и размеров.

6. *Векторная карта (векторный слой) железнодорожной сети*. В таблице 2 показано распределение по высоте различных звеньев сети, а на рисунке 1, в отражены склоновые системы

вдоль железнодорожных путей. На этом рисунке также показаны железнодорожные трассы на равнинных участках, где склоновые единицы не определены.

7. *Карта выборки потенциальных источников камнепадов в пределах Италии на основе экспертной интерпретации снимков, взятых на сервисе Google Earth*.

## МЕТОДЫ РАБОТЫ ►

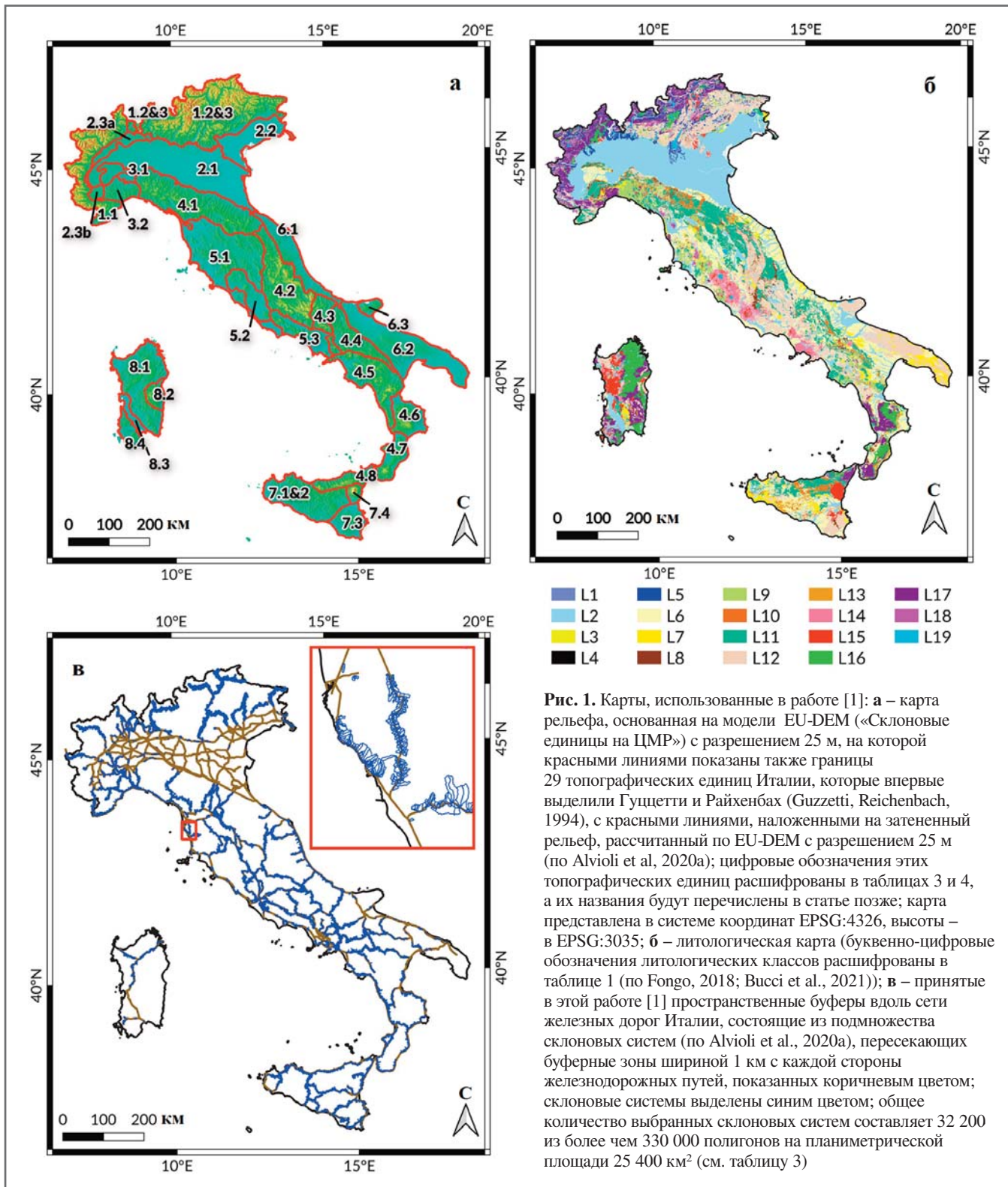
Выполнение общенациональной оценки подверженности камнепадам участков железнодорожной сети требовало тщательного планирования. Длинные цепочки действий (от выбора данных до подготовки окончательной карты) на самом деле склонны к распространению ошибок, возникших на ранних стадиях, непредсказуемым образом. Выбор STONE в качестве программного обеспечения для моделирования камнепадов (Guzzetti et al., 2002; Agliardi, Crosta, 2003) был продиктован необходимостью найти компромисс между четко определенной взаимосвязью источников с траекториями движения камнепадов и общей потребностью в вычислениях.

Чтобы создать карту подверженности камнепадам на основе результатов моделирования в STONE, авторы работы [1] предприняли следующие шаги (рис. 2):

- 1) подготовка данных;
- 2) выбор возможных зон источников, что, вероятно, является наиболее важной входной информацией для моделирования;
- 3) выполнение программы;
- 4) сбор и классификация результатов анализа подверженности камнепадам сегментов железных дорог с точки зрения свойств железнодорожной сети.

## Подготовка данных ►

Авторы работы [1] приняли подразделение на топографические единицы (ТЕ), которое ранее выполнили Гуццетти и Райхенбах (Guzzetti, Reichenbach, 1994), но немного модифицированное для разграничения склоновых единиц (Alvioli et al., 2020a). Исходное подразделение содержало 30 ТЕ, полученных путем количественного анализа и визуальной интерпретации морфометрических переменных, полученных по цифровой модели рельефа. В модифицированной версии авторы статьи [1] пренебрегли топографическими единицами, которые были намного меньше окружающих, а одну из исходных разделили на две. В итоге было получено



**Рис. 1.** Карты, использованные в работе [1]: а – карта рельефа, основанная на модели EU-DEM («Склоновые единицы на ЦМР») с разрешением 25 м, на которой красными линиями показаны также границы 29 топографических единиц Италии, которые впервые выделили Гуццетти и Райхенбах (Guzzetti, Reichenbach, 1994), с красными линиями, наложенными на затененный рельеф, рассчитанный по EU-DEM с разрешением 25 м (по Alvioli et al., 2020a); цифровые обозначения этих топографических единиц расшифрованы в таблицах 3 и 4, а их названия будут перечислены в статье позже; карта представлена в системе координат EPSG:4326, высоты – в EPSG:3035; б – литологическая карта (буквенно-цифровые обозначения литологических классов расшифрованы в таблице 1 (по Fongo, 2018; Vucci et al., 2021)); в – принятые в этой работе [1] пространственные буферы вдоль сети железных дорог Италии, состоящие из подмножества склоновых систем (по Alvioli et al., 2020a), пересекающих буферные зоны шириной 1 км с каждой стороны железнодорожных путей, показанных коричневым цветом; склоновые системы выделены синим цветом; общее количество выбранных склоновых систем составляет 32 200 из более чем 330 000 полигонов на планиметрической площади 25 400 км<sup>2</sup> (см. таблицу 3)

29 ТЕ (см. рис. 1, а). Применение топографических единиц было продиктовано потребностью в выделении сходных типов рельефа, позволяющих использовать для численного моделирования одни и те же параметры грунта в каждой ТЕ.

Использование топографических доменов также позволило определить потенциальные источники камнепадов с помощью статистического обобщения, предложенного в этой работе [1] и вы-

полнявшегося отдельно для каждой из 29 топографических единиц, соответствующих 29 различным типам рельефа. Литологическая карта Италии в масштабе 1:100 000 предоставила необходимую информацию для определения разных наборов входных параметров различных литологических классов. Эти параметры определяют поведение камней во время качения или ударов о поверхность грунта и отскоков вдоль смодели-

рованных траекторий их движения. Окончательные значения параметров были получены с использованием результатов предыдущих исследований.

Было принято гораздо более мелкое деление территории для тех склоновых единиц, которые пересекались железнодорожными путями. Использование склоновых единиц было, с одной стороны, вполне естественным выбором, поскольку они являются картографическими единицами, хорошо подходящи-

**Таблица 1. Значения параметров, используемых в модели STONE**

Обознач. класса	Литологический класс	Динамический коэффициент трения	Коэффициент нормальной релаксации	Коэффициент тангенциальной релаксации
L1	Антропогенные отложения	0,65	35	55
L2	Аллювиальные, озерные, морские, элювиальные и коллювиальные отложения	0,80	15	40
L3	Береговые (морского побережья) отложения, не связанные с речными процессами	0,65	35	55
L4	Оползни	0,65	35	55
L5	Ледниковые отложения	0,65	35	55
L6	Неплотно залегающие обломочные отложения	0,35	45	55
L7	Уплотненные обломочные отложения	0,40	55	65
L8	Мергель	0,40	55	65
L9	Чередование карбонатно-кремнистообломочных отложений и мергелей	0,35	60	70
L10	Хаотично залегающие скальные грунты, меланж (тектоническая смесь пород хаотического строения и состава)	0,35	45	55
L11	Флиш	0,40	55	65
L12	Карбонатные породы	0,30	65	75
L13	Эвапориты	0,35	45	55
L14	Пирокластические породы и игнимбриты	0,40	55	65
L15	Эффузивные породы, базальты	0,30	65	75
L16	Интрузивные магматические породы	0,30	65	75
L17	Сланцы	0,35	60	70
L18	Несланцеватые метаморфические породы	0,30	65	75
L19	Озера, ледники	0,95	10	10

*Примечания:* на рисунке 1, б показана соответствующая литологическая карта (Fongo, 2018; Vucci et al., 2021); программа STONE делает случайную выборку величин параметров в диапазоне  $\pm 5$  от перечисленных здесь номинальных значений.

ми для изучения оползней (Alvioli et al., 2016; Camilo et al., 2017; Schlogel et al., 2018; Bornaetxea et al., 2018; Tanyas et al., 2019a, 2019b; Jacobs et al., 2020; Amato et al., 2020; Chen et al., 2020; Li, Lan, 2020), а с другой стороны, это было решением технической проблемы определения значимых участков для параллельного выполнения моделирования.

Более конкретно, авторы приняли склоновые единицы вместо геометрической буферной зоны по бокам железно-дорожной трассы, потому что траектории камнепадов, инициированные в данной склоновой единице, будут ею же и ограничены с достаточной степенью уверенности. Использованный здесь набор склоновых единиц был специально рассчитан и оптимизирован для всей Италии (Alvioli et al., 2020a) как для этой ра-

**Таблица 2. Распределение сети железных дорог по интервалам высот**

Интервал высот, м	Количество сегментов	Общая длина, км	Доля, %
[0,100)	1746	8671	45,0
[100,500)	1447	7814	46,5
[500,1000)	188	1034	7,5
[1000,2000)	24	141	0,8
[2000,3000]	2	7	0,0
N/A	12	59	0,2

*Примечания:* общая протяженность железных дорог Италии составляет 17 727 км; некоторые 1-километровые сегменты находятся за пределами цифровой модели рельефа TINITALY и обозначаются в таблице как N/A; общее количество сегментов составляет 3419; число сегментов, перекрывающихся хотя бы с одной склоновой единицей, составляет 2427, а общая длина последних равна 13 747 км.

боты [1], так и для ряда дополнительных обломочного материала (Marchesini et al., 2020) и участков, подверженных ополз-

ням дисперсных грунтов (еще не опубликовано) вдоль сети железных дорог. Набор склоновых единиц, выбранный для этой работы, показан на рисунке 1 в. Общая площадь выбранных полигонов составляет 25 400 км<sup>2</sup>.

Авторы статьи [1] подготовили все данные, разбив исследуемые области на подобласти и проведя для последних параллельные расчеты. В частности, для каждой группы склоновых единиц было подготовлено независимое моделирование в STONE. Этот шаг требует выбора соответствующей части цифровой модели рельефа, зон источников камнепадов и сеток, содержащих численные значения параметров, необходимых для STONE (см. таблицу 1).

### Выявление зон источников камнепадов ►

Определение потенциальных источников камнепадов является ключевым этапом физически обоснованного моделирования зон транзита камней (поскольку источники существенно влияют на движение).

Детальное изучение мест расположения потенциальных источников камнепадов требует экспертного анализа крутых склонов в районе исследования (Guzzetti et al., 2004; Santangelo et al., 2019, 2020), что обычно является трудоемкой и дорогостоящей процедурой. Это делает выявление потенциальных источников ограничивающим фактором для систематических исследований камнепадов на больших территориях. Картирование всех потенциальных источников с помощью интерпретации аэрофотоснимков по всей сети железных дорог Италии было бы невозможно в разумные сроки. Более того, после обнаружения на ЦМР потенциального источника надо определить вероятность того, что это место может стать началом камнепада.

Простой способ выбора зон источников для STONE заключается в установлении порогового угла наклона поверхности, при превышении которого любая ячейка сетки действует как потенциальный источник камнепада (Guzzetti et al., 2003). Другие критерии основаны либо на сочетании геоморфологического анализа и анализа закартированных источников (Agliardi, Crosta, 2003), либо на сочетании анализа пороговых углов наклона поверхности и геоморфологического анализа (Sarro et al., 2020), либо на многофакторном статистическом анализе (Rossi et al., 2021).

Авторы работы [1] определили места расположения источников камнепадов

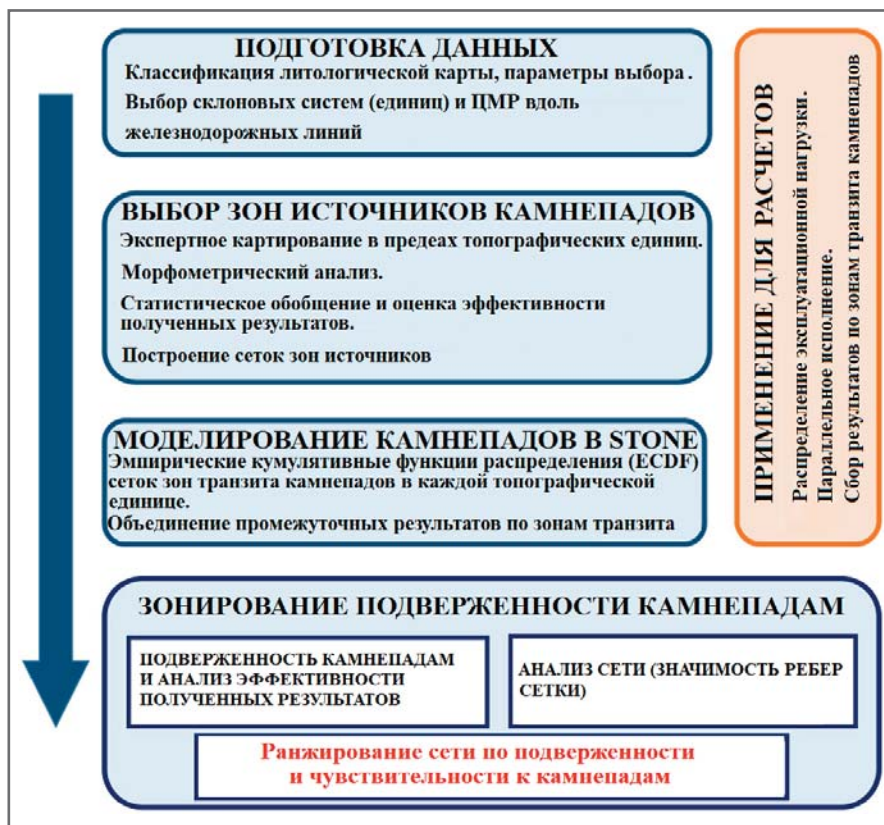


Рис. 2. Блок-схема процедуры, использованной в данной работе [1] для получения карты ранжирования сети по подверженности и чувствительности к камнепадам

и величины вероятности разрушения для большой площади по TINITALY – цифровой модели рельефа Италии с разрешением 10 м (Tarquini et al., 2007), для чего выполнили следующие этапы работ:

1а) выбор буферной зоны шириной 1 км с каждой стороны от трассы железнодорожного пути;

2а) выбор подмножества склоновых единиц, пересекающихся с буферной зоной, из всего их набора, включающего в Италии около 330 000 склоновых единиц по расчетам Альвиоли и др. (Alvioli et al., 2020a);

3а) экспертное картирование зон потенциальных источников камнепадов в пределах выбранных склоновых единиц для выборки мест, которые были сочтены репрезентативными по условиям, способным спровоцировать камнепады в отдельной топографической единице (Guzzetti, Reichenbach, 1994);

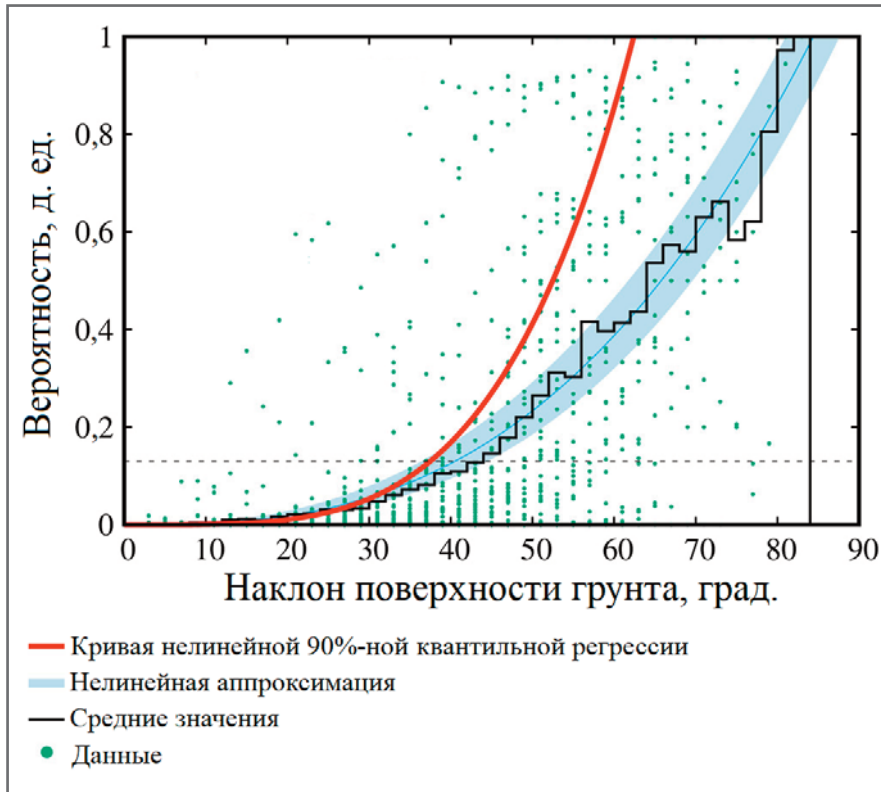
4а) разработка процедуры, основанной на данных, для идентификации зон источников в разных ячейках сетки среди закартированных зон (рис. 3, а) в пределах одной и той же топографической единицы с использованием статистического обобщения;

5а) визуальный анализ карты источников камнепадов, полученной в результате выполнения пункта 4а, и включение

в нее дополнительных источников, выявленных экспертным путем.

Выбор склоновых единиц, пересекающихся с 1-километровой буферной зоной с каждой стороны от трассы железнодорожного пути (см. выше пункт 1а), гарантирует, что в моделировании будут учтены все потенциальные источники, в которых могут возникнуть камнепады, способные навредить железнодорожной сети (в этой работе [1] не учитываются какие-либо антропогенные смещения грунтовых масс вблизи железнодорожных путей).

Экспертное картирование было выполнено на основе изображений, полученных на сервисе Google Earth™, которые были выбраны потому, что они одновременно предоставляют и морфологическую (по высотам), и оптическую информацию, в результате чего получают 2,5D изображения. Они менее точны, чем стереоскопические оптические изображения, но их преимуществами являются полнота и свободный доступ к ним в национальном масштабе. Это гораздо лучше, чем использование 2D изображений из геоинформационных систем (ГИС), также находящихся в свободном доступе, но не содержащих морфологической информации. Инструмент редактирования в векторном формате позволяет непосред-



**Рис. 3.** Пример результата статистической оценки вероятности того, что ячейка сетки с данным уклоном представляет собой зону источника камнепадов. Данные (зеленые точки) и численные модели (кривые) соответствуют топографической единице 1.2&1.3 (см. рис. 1, а). Принятой моделью является кривая нелинейной 90%-ной квантильной регрессии, соответствующая уравнению (2), которая показана красным цветом. Горизонтальная линия представляет собой предел, ниже которого вероятность устанавливается равной нулю

ственно выполнять картирование на интерпретированных изображениях и экспортировать полученные полигоны.

Чтобы нанести на карту зоны потенциальных источников камнепадов, геоморфологи решили, что они соответствуют субвертикальным скальным склонам, под которыми видны осыпи или отложения камнепадов. Обычно они кажутся не покрытыми растительностью, даже если в некоторых местах высокая растительность может скрывать потенциальные участки отрыва каменного материала от поверхности. Для каждой топографической единицы геоморфологи нанесли на карту все зоны потенциальных источников камнепадов в пределах каждой склоновой единицы в значительном подмножестве склоновых единиц, которые считались репрезентативными для основных структурно-литологических и морфологических условий.

В работе [1] использовалась информация об источниках, нанесенных на карту экспертами, для расчета вероятности того, что та или иная ячейка сетки является источником, следующим образом. Для топографической единицы выбирались склоновые единицы, со-

держащие нанесенные на карту полигоны. Были рассчитаны гистограммы распределения значений угла наклона поверхности в ячейках внутри полигонов и в пределах всей склоновой единицы. Для каждого столбика гистограммы шириной 2 град. (интервала увеличения наклона поверхности величиной 2 град.) бралось отношение двух гистограмм – значений углов наклона в пределах зон источников к их значениям в пределах целых склоновых единиц. В каждом указанном интервале значения числителя были меньше значений знаменателя (количество ячеек из зон источников, попавших в каждый 2-градусный интервал, было меньше или равно числу ячеек из целой склоновой единицы в том же интервале). Поскольку авторы статьи [1] позаботились о том, чтобы разграничить все зоны возможных источников камнепадов в пределах каждой из рассматриваемых склоновых единиц, они были уверены, что это отношение представляет собой вероятность того, что та или иная ячейка с углом наклона поверхности, характерным для соответствующего интервала величиной 2 град., является источником камнепадов в этой конкретной

склоновой единице. Таким образом, имелась точка вероятности для каждого 2-градусного интервала наклона. Рассмотрев все выбранные склоновые единицы в данной топографической единице, авторы работы [1] в итоге получили набор вероятностей, показанных зелеными точками на рисунке 3, для топографической единицы 1.2&1.3 (см. рис. 1, а), выбранной в качестве иллюстративного примера.

Целью этой процедуры было получение зависимостей «вероятность – наклон», которые можно было бы распространить на все множество выбранных склоновых единиц в каждой топографической единице. На рисунке 3 зеленые точки соответствуют вероятностям из экспертного картирования, а кривые представляют три возможных подхода к определению функциональной зависимости между вероятностью и наклоном. Черная гистограмма показывает простые средние значения наблюдаемых значений вероятности для каждого 2-градусного интервала наклона. Синяя кривая представляет собой нелинейную аппроксимацию значений вероятности, оцененных по наблюдаемым данным, которую описывает следующая функция:

$$P_{FT}(S) = a \left( \frac{S}{90} \right)^b, \quad (1)$$

где  $S$  – наклон поверхности в градусах;  $a, b$  – параметры аппроксимации.

Голубая полоса вокруг синей кривой аппроксимации на рисунке 3 представляет собой зону между минимальной и максимальной кривыми, полученными с использованием параметров аппроксимации  $a \pm \sigma_a$  и  $b \pm \sigma_b$  (где  $\sigma_a, \sigma_b$  – стандартные отклонения, полученные путем минимизации методом наименьших квадратов). Эта полоса показана для иллюстрации качества аппроксимации. Красным цветом на рисунке 3 показана кривая нелинейной квантильной регрессии для 90-го перцентиля (квантиля), которая описывается следующей функцией, содержащей один параметр  $c$ :

$$P_{QR}(S) = c \left( \frac{S}{90} \right)^4. \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает кривую, делающую наблюдаемую выборку таким образом, что 10% зеленых точек на рисунке 3 оказываются выше этой кривой.

Было решено использовать метод квантильной регрессии (формулу (2)),



чтобы назначить *вероятность того, что та или иная ячейка сетки представляет собой зону источника камнепадов* (см. пункт 4а в списке этапов работ, приведенном ранее). С точки зрения авторов работы [1], это максимизирует информацию, извлеченную из наблюдаемых данных, по отношению к среднему значению и аппроксимации по уравнению (1). Кроме того, авторы использовали функцию с фиксированным показателем степени для  $(S/90)$ , равным 4, поскольку при использовании параметрического показателя степени  $b$ , как в уравнении (1), полученные кривые систематически занижали вероятность присутствия источника камнепадов при больших наклонах поверхности. Принятая процедура обеспечивает индивидуальную кривую  $P_{QR}(S)$  для каждой топографической единицы, полученную с помощью экспертного картирования зон потенциальных источников камнепадов и нелинейной квантильной регрессии вероятностей, наблюдаемых в одной и той же топографической единице.

В каждой топографической единице «поячеечные» (cell-by-cell) значения вероятности, полученные из уравнения (2), были напрямую связаны с количеством смоделированных траекторий при рассмотрении ячейки как начальной точки падения камня. Авторы работы [1] ввели более низкую пороговую вероятность, при которой ячейка не рассматривалась как источник. Этот порог представляет собой минимум между значением  $P_{QR}$  для карты зон источников, охватывающей не менее 80% источников, нанесенных на карту с помощью визуальной интерпретации, и значением  $P_{QR}=10\%$ . Авторы моделировали для каждой ячейки-источника ряд траекторий, соответствующих численному значению  $P_{QR}$  в процентах (например, ячейка с вероятностью  $X\%$  вызвала бы инициацию  $X$  смоделированных траекторий). Это позволяет использовать возможности STONE для моделирования различных количеств падающих камней на основе вероятности того, что данная ячейка является источником. Этот метод увеличивает степень рандомизации (случайности) в моделях (вместе со случайным выбором значений входных параметров в пределах заданного процента вокруг среднего значения).

В конце концов, авторы статьи [1] оценили степень соответствия между моделью и реальностью, используя частоту совпадений (hit gate), то есть долю

достоверных результатов моделирования, определяемую формулой  $HR=TP/(TP+FN)$ , где  $TP$  – количество достоверных результатов (true positives),  $FN$  – число ложных результатов (false negatives). С учетом того, что  $TP+FN=P$  (где  $P$  – общее количество попыток сделать прогноз), значение  $HR$  – это доля случаев, когда прогноз был удачным, от общего числа попыток.

### Моделирование траекторий камнепадов с помощью STONE ►

После выбора зон источников были предприняты следующие шаги для расчета подверженности территорий камнепадам в пределах полигональной буферной зоны вокруг всей сети итальянских железных дорог с использованием программы STONE и цифровой модели рельефа с разрешением 10 м, использованной для определения источников камнепадов:

1б) присвоение значений коэффициентов динамического трения, коэффициентов нормальной и тангенциальной реституции, необходимых для работы в программе STONE (этот шаг был выполнен путем экспертного присвоения значений коэффициентов, взятых из литературы для каждого литологического класса);

2б) подготовка сеток данных, необходимых для работы STONE в пределах каждой топографической единицы, с последующим разделением на прямоугольные домены, содержащие смежные полигоны склоновых единиц, выбранных на этапе 2а, описанном в предыдущем подразделе);

3б) создание актуальных моделей с помощью STONE (в работе [1] параллельно были выполнены имитации, распределенные в 921 подобластях, описанных в пункте 2б);

4б) сбор данных по различным расчлененным картам, содержащим информацию о количестве траекторий падающих камней на ячейку сетки (counter – «счетчик»), в каждой из подобластей каждой из 29 топографических единиц;

5б) преобразование (классификация) «карты-счетчика» в вероятностную карту.

Для работы в программе STONE необходимы значения коэффициентов динамического трения, тангенциальной и нормальной реституции (см. пункт 1б). Они были выбраны следующим образом. Была рассмотрена литологическая карта масштаба 1:100 000, полученная из цифровой (электронной) карты в векторном формате. Исходная карта

Итальянской геологической службы (ISPRA) (Tacchia, 2004; Battaglini et al., 2012) содержала более 5000 уникальных описаний геологических формаций (Fongo, 2018; Bucci et al., 2021). Исходное уникальное описание было разделено (классифицировано) на 19 литологических классов с использованием экспертных критериев и примерно 400 листов геологической карты (цифровых фотографий из того же источника) в более крупном масштабе. Значения вышеуказанных коэффициентов для работы в программе STONE были получены с использованием предыдущих оценок для аналогичных литологических условий, приведенных в литературе (Guzzetti et al., 2002, 2003, 2004; Agliardi, Crosta, 2003; Santangelo et al., 2019). Выбранные значения коэффициентов перечислены в таблице 1.

Шаги 2б, 3б и 4б были выполнены для 921 подобласти, выделенной путем отдельного рассмотрения для групп смежных склоновых единиц, на основе:

1) цифровой модели рельефа исследуемой подобласти;

2) сетки, содержащей положения зон источников камнепадов с указанием количества траекторий камней, которые необходимо смоделировать;

3) трех сеток, содержащих значения коэффициентов динамического трения, нормальной и тангенциальной реституции для каждой ячейки сетки ЦМР.

Программа STONE создает в качестве выходных данных три сетки, содержащие для каждой ячейки:

а) подсчет количества траекторий, которые пересекли ячейку во время моделирования;

б) максимальную высоту траекторий относительно местной высотной отметки;

в) максимальную скорость моделируемого движения камней.

В принципе, эти три сетки можно использовать совместно для оценки опасности камнепадов в каждой ячейке. На самом деле, для заданных зон источников пункт (а) можно интерпретировать как относительную вероятность того, что та или иная траектория пересечет каждую ячейку сетки, а пункты (б) и (в) можно совместно рассматривать как показатель величины ожидаемых камнепадов в каждой ячейке. Вместо этого для оценки частоты камнепадов (во времени) требуется дополнительная информация (Guzzetti et al., 2003, 2004). В этой работе [1] авторы использовали только выходные данные из пункта (а) – в качестве оценки относительной пространственной вероятности камнепадов.

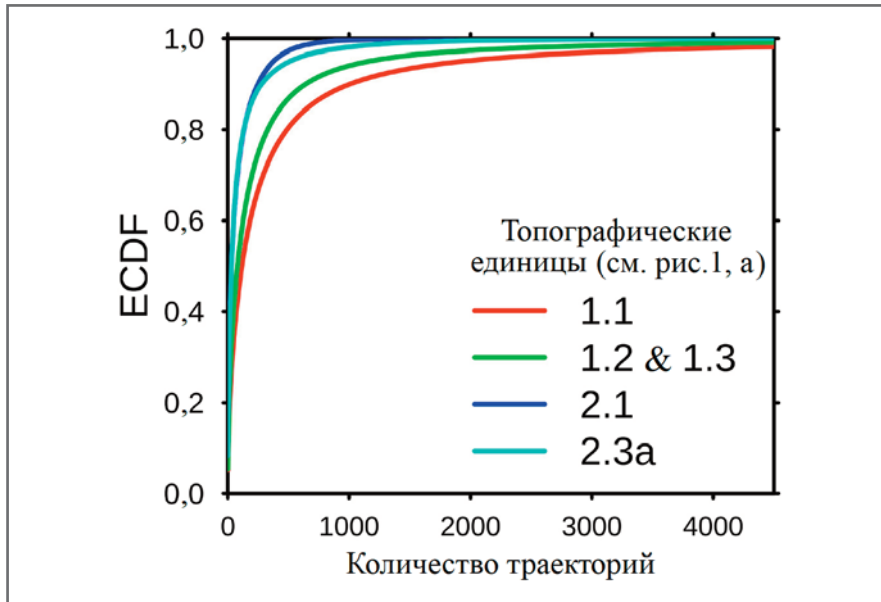


Рис. 4. Примеры эмпирических кумулятивных функций распределения (ECDF), полученных для четырех топографических единиц [1]

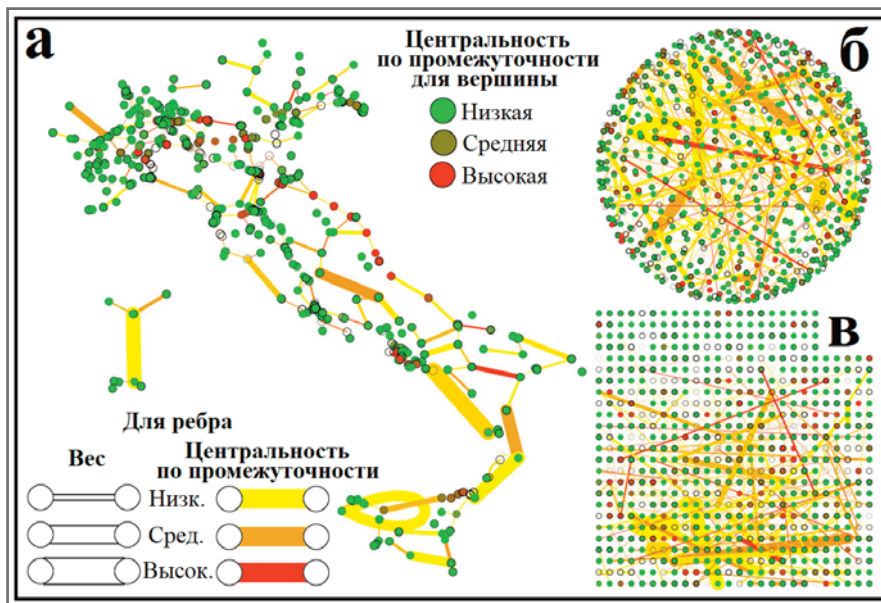


Рис. 5. Три представления железнодорожной сети Италии в виде графов с одинаковой информативностью: а – пространственное распределение вершин (кружков) соответствует их географическому положению, звенья (перегоны) сети условно представлены в виде прямых линий (ребер), соединяющих вершины; б, в – два альтернативных представления одного и того же графа: б – узлы равномерно распределены по поверхности сферы; в – узлы расположены по квадратной сетке (видно, что узлы в большинстве своем являются скорее периферийными). Разных представлений одного и того же графа, в принципе, может быть сколько угодно, но при этом какое-либо конкретное представление может помочь выделить какие-то особые аспекты

Чтобы преобразовать количество траекторий на ячейку в показатель вероятности (см. шаг 5б), авторы статьи [1] использовали следующее обоснование. Они рассмотрели реестр национальной инвентаризации оползней Италии IFFI (ISPRA, 2018; Trigila et al., 2010) и «извлекли» полигоны, помеченные как «камнепады» или как «большие территории, содержащие камнепады». Далее были рассчитаны эмпирические

кумулятивные функции распределения (ECDF) количеств траекторий в пределах ячеек сетки, принадлежащих полигонам, извлеченным из вышеуказанного реестра. Значимыми считались только те ячейки, о которых было известно, что они действительно содержат камнепад/камнепады. Авторы работы [1] использовали ECDF (в интервале [0, 1]) для подсчета траекторий с ненулевым значением для картирования всех ячеек

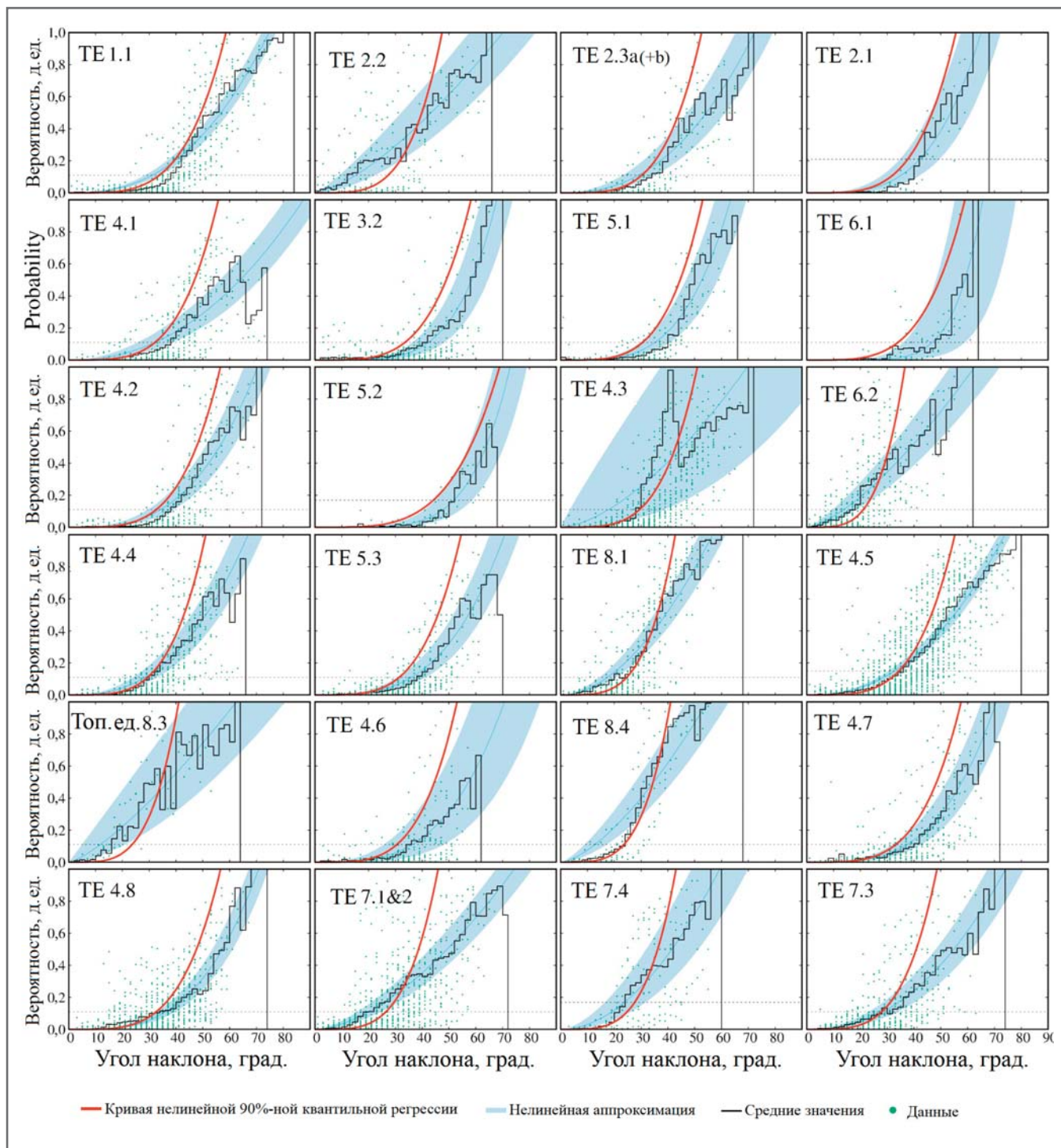
сетки, что позволило выполнить вероятностную интерпретацию, необходимую для создания карты подверженности камнепадам.

Использование ECDF вместо простого нормирования количеств траекторий имеет два преимущества. Во-первых, это позволяет приписать меньшую значимость ячейкам с небольшим числом траекторий, учитывая огромную дисперсию их количеств в сетках на выходе. Во-вторых, применение ECDF делает результаты независимыми от абсолютных количеств смоделированных траекторий на исходную ячейку сетки и делает значимыми только относительные величины в соответствии с методом присвоения этих чисел, использованным авторами статьи [1] (см. подраздел «Выявление зон источников камнепадов»). Отдельно для каждой из 29 топографических единиц (см. рис. 1, а; таблицу 1) было выполнено преобразование подсчитанной вероятности в относительную. На рисунке 4 показаны примеры ECDF, полученные для четырех топографических единиц.

#### Анализ железнодорожной сети в рамках теории графов ▶

Железнодорожную сеть можно рассматривать как набор отдельных пунктов (узлов, пересечений) и связывающих смежные пункты перегонов (звеньев), не имеющих пересечений. От узлов может отходить несколько звеньев. Этот набор представляет собой географическую сеть. Ее описание можно дополнительно уподобить графу, вершины которого являются узлами сети, а ребра – ее звеньями.

Авторы статьи [1] выполнили простой предварительный анализ графа, соответствующего железнодорожной сети Италии, рассчитав центральность по промежуточности (степень посредничества) для всех вершин и ребер. Такой анализ описывает топологию графа и является отправной точкой для обсуждения чувствительности железнодорожной сети к камнепадам в связи с интенсивностью ее работы. Его графическое представление показано на рисунке 5, где вершины соединены прямыми линиями – ребрами графа. Цвета точек и ребер соответствуют низкой средней или высокой степени посредничества. А толщина ребер примерно пропорциональна физическому расстоянию между узлами, которые они соединяют. Известно, что центральность ребер по промежуточности во взвешенном графе является одной



**Рис. 6.** Зависимости вероятностей камнепадов от наклона поверхности почти для всех топографических единиц (ТЕ, см. рис. 1, а). Графики для топографической единицы 1.2&1.3 показаны на рисунке 3. Данные, касающиеся зон источников, для ТЕ 2.3а и 2.3б сгруппированы на одной панели. Для топографической единицы 3.1 нет данных по закартированным зонам источников, а для 6.3 и 8.2 нет пересечений между железной дорогой и склоновыми единицами, поэтому соответствующие три панели отсутствуют на данном рисунке

из наиболее важных переменных в сетях (Barthelemy, 2011), поэтому авторы работы [1] использовали ее в последующем анализе.

Чтобы в рамках теории графов понять влияние возможных камнепадов на перебои в работе железнодорожной сети, авторы статьи [1] провели два отдельных анализа. Во-первых, было рассмотрено влияние на граф (и, соответ-

ственно, на реальную сеть) удаления из сети одного за другим ребер (то есть железнодорожных перегонов, состоящих из переменного числа 1-километровых сегментов). Во-вторых, совместно с этим было рассмотрено подразделение (классификация) перегонов железной дороги на классы по их подверженности камнепадам и по их значимости в эквивалентном графе.

При удалении одного ребра из графа для всех оставшихся ребер немного изменяются величины их центральности по промежуточности. Для каждого ребра в графе была рассчитана полная вариация (изменение) между исходным графом и графом, полученным при удалении одного ребра, и ее значение присваивалось в качестве атрибута удаленному ребру в исходном

**Таблица 3. Результаты статистического обобщения для определения вероятностей того, что ячейки сетки иницируют траектории камнепадов**

Топографич. единица (см. рис. 1, а) (Guzzetti, Reichenbach, 1994)	Общ. площадь топогр. единицы, км <sup>2</sup>	Общ. площадь выбранных склоновых единиц, км <sup>2</sup> (Alvioli et al., 2020a)	Количество полигонов из закартированных зон источников камнепадов	Общ. площадь полигонов из закартированных зон источников камнепадов, км <sup>2</sup>	Доля совпадений модельных и закартированных результатов HR, %		Доля совпадений результатов по модели и по базе данных IFFI (HR, %) (Trigila et al., 2010)	
					при любой модельной вероятности камнепадов	при модельной вероятности камнепадов >80%	при любой модельной вероятности камнепадов	при модельной вероятности камнепадов >80%
1.1	16,274	1590	152	3.2	77	13	86	23
1.2&1.3	35,735	2620	78	2.2	80	19	76	10
2.1	32,702	373	11	0.039	80	27	63	8
2.2	9426	164	38	0.58	11	6	72	11
2.3a	3103	458	58	0.34	75	16	87	12
2.3b	1298	88	2	0.001	–	–	–	–
3.1	2322	332	39	0.027	16	0	100	100
3.2	3991	1778	225	0.84	51	4	29	1
4.1	22,393	2067	151	0.84	78	7	60	15
4.2	16,835	1894	105	1.5	79	9	55	5
4.3	4920	457	89	1.9	77	13	77	13
4.4	8097	1585	102	1.6	75	14	46	6
4.5	12,890	1379	200	7.2	79	18	62	11
4.6	6203	383	62	0.34	50	3	44	1
4.7	5337	598	70	0.57	59	9	46	3
4.8	4262	511	127	1.6	48	3	30	7
5.1	25,346	2086	80	0.19	58	12	44	6
5.2	6136	972	11	0.013	79	5	16	1
5.3	6375	859	81	0.081	62	4	59	6
6.1	9023	930	46	0.035	78	10	42	100
6.2	20,236	706	107	1.2	44	11	38	11
6.3	1731	–	0	–	–	–	–	–
7.1&7.2	14,285	2195	121	3.5	56	12	33	6
7.3	5321	691	561	0.97	46	9	34	5
7.4	1499	210	31	0.37	80	28	100	100
8.1	16,404	428	80	1.4	63	14	25	2
8.2	258	–	–	–	–	–	–	–
8.3	1946	4	6	0.061	58	21	41	18
8.4	2844	42	11	0.66	76	22	63	13

Примечания: HR – доля достоверных результатов, или степень совпадений (Hit Rate),  $HR=TP/P=TP/(TP+FN)$ , где TP – количество достоверных (совпавших) результатов (True Positives), FN – число ложных (не совпавших) результатов (False Negatives), P – общее количество попыток сделать прогноз; IFFI – относится к ячейкам в 90-м процентиле камнепадных полигонов из национальной базы инвентаризации оползней IFFI.

графе. Авторы статьи [1] «перебрали» таким образом весь набор ребер, получив в итоге их новое ранжирование в соответствии с их вновь вычисленными атрибутами. Эти атрибуты использовались в качестве дополнительных показателей для комбинированной классификации железнодорожной сети, основанной как на подверженности, так и на чувствительности к камнепадам.

**Вычислительная реализация** ▶

Моделирование для большой территории с помощью STONE имеет следующее ограничение. Эта программа серийно вычисляет заданное пользователем число траекторий. Несмотря на то что каждый расчет выполняется относительно быстро, большое количество траекторий, необходимых для этого исследования, сделало бы невозможным выполнение всех вычислений за один этап. Для решения этой проблемы авторы работы [1] приняли простую стратегию, разделив изучаемые области на множество подобластей (на группы смежных склоновых единиц) и параллельно запустив в работу несколько экземпляров STONE (см. подраздел «Моделирование траекторий камнепадов с помощью STONE»).

Для каждой подобласти автоматически были подготовлены растровые сетки с помощью геоинформационной системы для обработки пространственной информации GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) (Neteler, Mitasova, 2007; Casagrande et al., 2007). Авторы данной статьи [1] использовали многоядерный процессор, имеющий 48 вычислительных ядер и 330 ГБ оперативной памяти, для параллельного выполнения ГИС-операций, необходимых для подготовки сеток, выполнения самой программы и сбора 921 субрезультата (см. соответственно пункты 26, 36 и 46 в подразделе «Моделирование траекторий камнепадов с помощью STONE»). Общее время выполнения каждого полного «прогона» составило около двух дней при использовании схемы «главный – подчиненный», или «ведущий – ведомый» (схемы взаимодействия в вычислительных комплексах, информационных и телекоммуникационных системах, в которой одно главное (ведущее) устройство, процесс или их группа осуществляет однонаправленное управление подчиненным (ведомым) устройством, процессом или их группой. – *Ред.*). Такая схема могла наилучшим образом сбалансировать рабочую нагрузку.

**ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ** ▶

**Результаты определения зон источников камнепадов** ▶

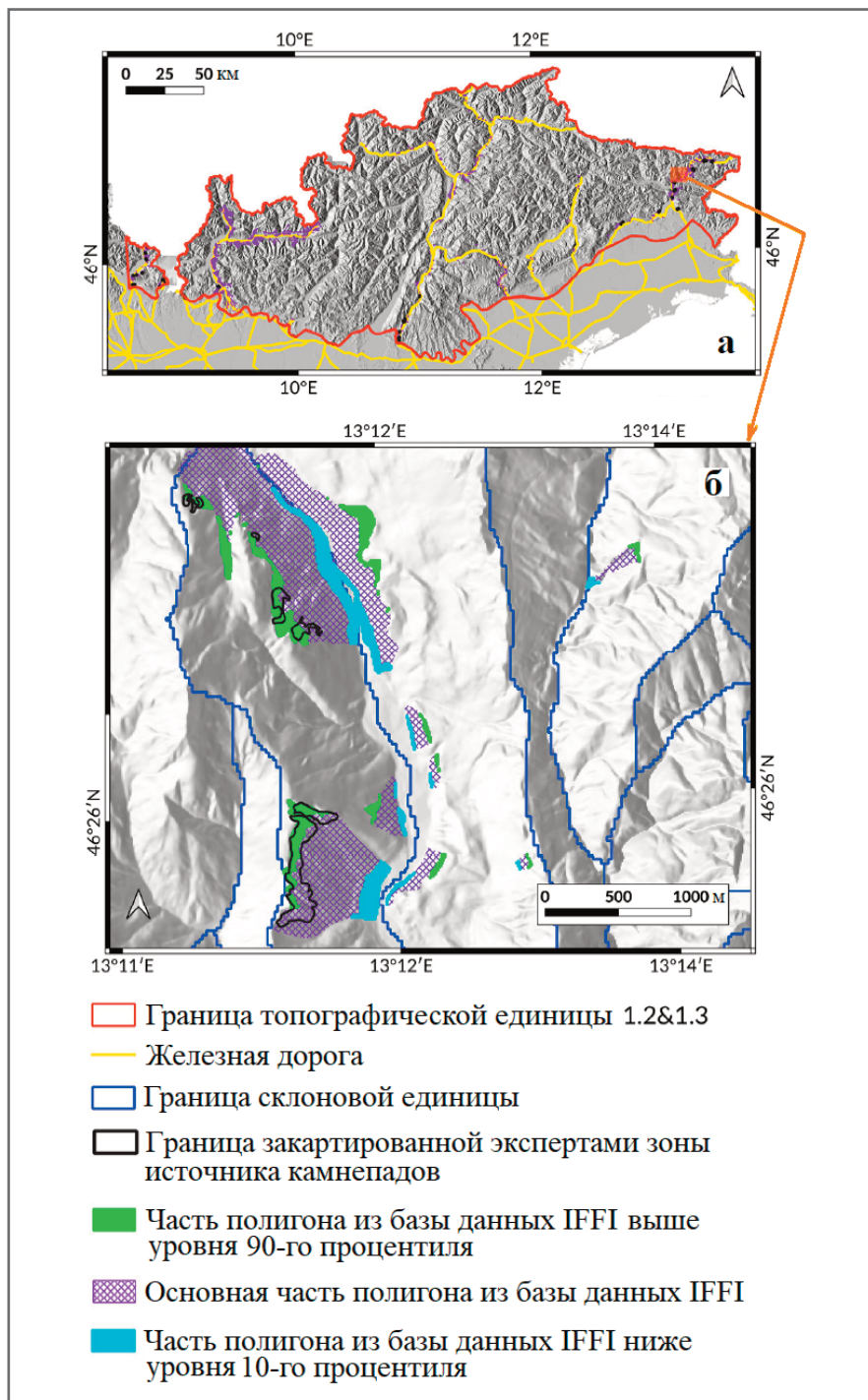
Процедура, описанная в подразделе «Выявление зон источников камнепадов», применялась к каждой из топографических единиц, принятых в этой работе в качестве однородных доменов для моделирования с помощью STONE. На рисунке 6 показаны зависимости вероятностей камнепадов от наклона поверхности почти для всех топографических единиц (графики для топографической единицы 1.2&1.3 были показаны на рисунке 3). После оценки зон источников и связанных с ними вероятностей камнепадов авторы работы [1] визуально проверили отсутствие явных ошибок для территорий вдоль всех железнодорожных линий. Систематически проверялись результаты статистической классификации источников вдоль всей железнодорожной сети с помощью экспертного визуального анализа. В нескольких выбранных местах, в которых, как сочли опытные геоморфологи, инфраструктура потенциально подвержена явному риску, были оконтурены дополнительные зоны источников. В таблице 3 для каждой топографической единицы указаны: общая площадь, пло-

щадь рассматриваемых склоновых единиц, количество и общая площадь закартированных экспертами полигонов из ячеек сетки с потенциальными источниками камнепадов.

Из-за большой площади исследуемой территории авторы статьи [1] в иллюстративных целях показывают детали процедуры экспертного картирования, выбора источников камнепадов и их сравнения для одной конкретной топографической единицы 1.2&1.3 (состоящей из объединенных топографических единиц 1.2 и 1.3 – Центрально-Восточных Альп и карстового плато Карсо) (Guzzetti, Reichenbach, 1994). На рисунке 7, а показан общий вид ТЕ 1.2&1.3, трасса железнодорожного пути, полигоны в пределах этой единицы, нанесенные на карту экспертами, а также часть камнепадных полигонов по национальной базе данных IFFI, перекрывающихся с набором склоновых единиц в ТЕ 1.2&1.3. Подобные условия были обнаружены на всей исследованной территории площадью около 25 000 км<sup>2</sup>.

На рисунке 7, б в увеличенном масштабе показан участок (соответствующий маленькому оранжевому квадратику в правой части рисунка 7, а), содержащий несколько склоновых единиц, расположенных на северо-востоке топографической единицы 1.2&1.3, в которых присутствуют как полигоны, нанесенные на карту экспертами, так и полигоны из базы данных IFFI. Полигоны из базы данных IFFI разделены по высотным отметкам на: основную часть; часть ниже уровня 10-го перцентиля и часть выше уровня 90-го перцентиля. Перцентили помогают показать, что большинство камнепадных полигонов из базы данных IFFI фактически содержат как зоны источников, так и зоны транзита и отложения камнепадного материала. Отсюда авторы работы [1] заключают, что верхний перцентиль относится к верху склоновых единиц и примерно соответствует источникам, закартированным экспертами, а нижний перцентиль относится к подножиям склонов и тянется вниз к долине для больших полигонов. Эти характеристики были общими для всех камнепадных полигонов из базы данных IFFI, которые авторы проверяли визуально. Они использовали верхний и нижний перцентили, чтобы иметь общее представление о результативности как выбора источника, так и итогов моделирования в последующем.

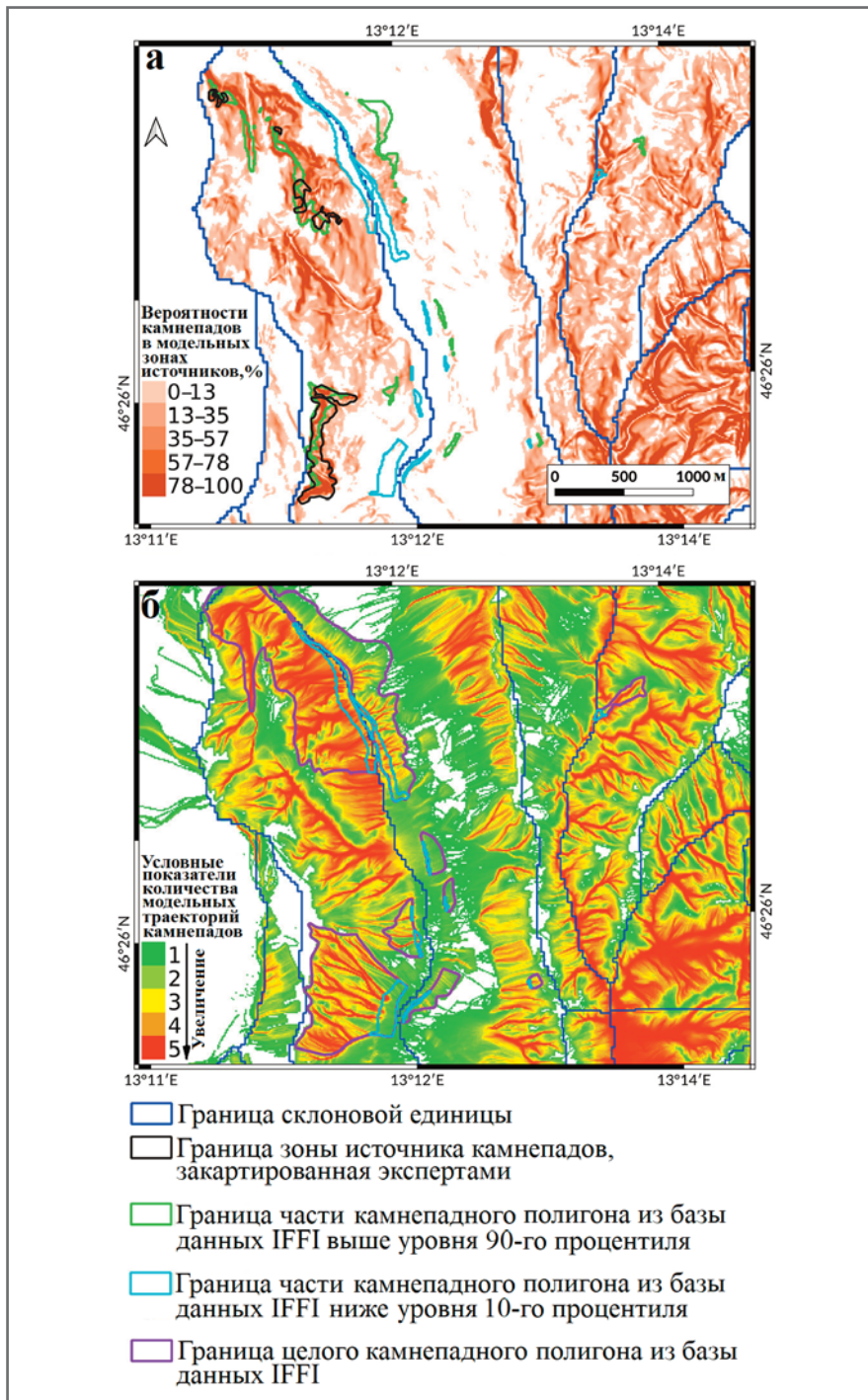
Результатом обобщения является карта с сеткой 10 м x 10 м, совмещен-



**Рис. 7.** Иллюстрация взаимосвязи между зонами источников камнепадов, нанесенными на карту экспертами, и информацией из национальной базы данных IFFI в пределах буферных зон с каждой стороны от трассы железнодорожного пути: а – общий вид топографической единицы 1.2&1.3; б – фрагмент, выделенный на рисунке 7, а оранжевым квадратиком, в увеличенном масштабе, показывающий несколько участков склона, на которых присутствуют как закартированные экспертами зоны источников камнепадов, так и камнепадные полигоны из базы данных IFFI (видно, что закартированные экспертами зоны источников примерно совпадают с частями полигонов из IFFI выше уровня 90-го перцентиля и что части полигонов ниже уровня 10-го простираются вниз до дна долин)

ная с цифровой моделью рельефа TIN-TALY. Каждой ячейке присуще определенное значение вероятности того, что траектория камнепада исходит из этого конкретного места. Пример такой вероятностной карты источников камнепадов для топографической единицы 1.2&1.3 показан на рисунке 8, а.

Сравнение смоделированных вероятностей с зонами источников камнепадов, нанесенными на карту экспертами, представляет собой оценку эффективности этапа калибровки идентификации источника. Эта эффективность определяется количеством совпадений смоделированных вероятностей с реаль-



**Рис. 8.** Карты смоделированных зон источников камнепадов с отражением вероятностей начала в них камнепадов (а) и модельных зон с разным количеством траекторий камнепадов (б) в сопоставлении с целыми полигонами из базы данных IFFI и их частями выше уровня 90-го перцентиля и ниже уровня 10-го перцентиля, а также с выделенными склоновыми единицами

ными данными, представленными нанесенными на карту полигонами. Авторы работы [1] рассмотрели смоделированную вероятность двумя разными способами. Они либо выбрали все ячейки сетки, для которых статистическая процедура присвоила какую-либо ненулевую вероятность, и ячейки с вероятностями больше 0,8 (величина 0,8 была произвольно выбрана в качестве порога перехода к «высоким» вероятностям).

Авторы статьи [1] разработали и второе сравнение, используя для проверки правильности идентификации источников камнепадные полигоны из базы данных IFFI (Trigila et al., 2010). Для каждого полигона из IFFI путем расчетов была выделена часть, соответствующую верхним 90% высоты. Это было, с точки зрения авторов, наилучшее произвольное предположение о возможных источниках камнепадов, зарегистрированных в IFFI.

Результаты сравнений в каждой из топографических единиц с точки зрения частоты совпадений (*HR* – hit rate), то есть доли достоверных результатов моделирования, перечислены в таблице 3. Авторы исследования [1] не оценивали частоту истинных несовпадений, являющуюся аналогом частоты совпадений, или полную матрицу несоответствий, из-за того, что истинные несовпадения были неизвестны, потому что экспертное картирование было выполнено только в выбранном месте. К тому же авторы не знали, отражает ли база данных IFFI полную инвентаризацию оползней и в частности камнепадов. Доли совпадений были рассчитаны для склоновых единиц, выбранных в качестве участков исследований для этой работы.

Рассмотрим распределение величин частоты совпадений *HR*, представленных в таблице 3, для следующих комбинаций зон в 26 топографических единицах (ТЕ) (напомним, что три из первоначальных 29 ТЕ были исключены из-за отсутствия железной дороги или склонов с предрасположенностью к камнепадам).

1. *Смоделированные зоны источников с любыми ненулевыми значениями вероятности начала камнепада и закартированные экспертами зоны источников.* Значения *HR* оказались ниже 75% для 12 топографических единиц, таких как: 2.2 (равнина Венето), 3.1 (холмы Монферрато), 4.6 (горное плато Сицилия), 4.7 (национальный парк Аспромонте в южной части Апеннинских гор), 4.8 (Сицилийские Апеннины), 5.1 (горный пояс Тирренской границы Калабрии), 7.1&7.2 (Марсальская низменность и Сицилийские холмы), 7.3 (Иблейское плато (горы)), 8.1 (Сардинские холмы) и 8.3 (равнина Кампидано). Из них 5 ТЕ имели *HR*<50%, а из последних 2 ТЕ (2.2 и 3.1) имели *HR*<25%. Соответствующие топографические единицы имеют небольшую или очень маленькую общую площадь склоновых единиц, и многие из них расположены рядом с равнинами или морскими побережьями, которые, вероятно, труднее всего моделировать на региональном или национальном уровне, поскольку они больше всего отличаются от типичных условий, в которых авторы статьи [1] картировали источники камнепадов экспертным путем.

2. *Смоделированные зоны источников при включении лишь ячеек сетки с наибольшей (>80%) вероятностью начала камнепада и закартированные*

экспертами зоны источников. Обоснованность этого сопоставления, вероятно, труднее понять на общих основаниях. Для 4 топографических единиц оказалось, что  $HR > 20\%$ , 11 ТЕ имели  $HR < 10\%$  (причем 5 ТЕ из них имели  $HR < 5\%$ ).

3. Смоделированные зоны источников с любым ненулевым значением вероятности начала камнепада и части камнепадных полигонов из базы данных IFFI для уровня выше 90-го перцентиля по высоте (для верхних 90% высоты полигонов). Результаты показали более низкую степень совпадений по сравнению со случаем 1. Значения  $HR$  были меньше 75% для 20 топографических единиц, из которых 13 ТЕ имели  $HR < 50\%$ . А из последних 1 ТЕ имела  $HR < 25\%$ .

4. Смоделированные зоны источников с наибольшей (>80%) вероятностью начала камнепада и части камнепадных полигонов из базы данных IFFI для уровня выше 90-го перцентиля по высоте (верхних 90% высоты полигонов). Как и для комбинации 2, интерпретация сопоставления здесь менее очевидна, чем при любом значении ненулевой вероятности начала камнепада для закартированных зон источников, как в случае 3. Лишь 1 топографическая единица имела  $HR > 20\%$ , для 13 ТЕ оказалось, что  $HR < 10\%$ . А из последних 5 ТЕ имели  $HR < 5\%$ .

#### Результаты по определению подверженности железнодорожной сети Италии камнепадам с помощью модели STONE ▶

Конечным результатом этой работы является классификация железнодорожной сети Италии, разделенной на сегменты длиной по 1 км, по подверженности камнепадам. Для этого наиболее важными являются шаги 16–56, перечисленные в подразделе «Моделирование траекторий камнепадов с помощью STONE». Авторы статьи [1] создали карты расчетных количеств траекторий на ячейку с использованием модели STONE. Затем были классифицированы все ячейки, охваченные выбранными склоновыми единицами (см. этап 2а в подразделе «Выявление зон источников камнепадов»), при этом использовалась карта для расчета уникального значения подверженности камнепадам каждого 1-километрового сегмента железной дороги.

Карта количеств траекторий на ячейку сетки, содержащая сильно различаю-

**Таблица 4. Частота совпадений модельной вероятности камнепадов  $P_{QR}$  с зонами транзита и отложения полигонов из базы данных IFFI**

Топогр. единица	Доля достоверных результатов моделирования, то есть частота совпадений модельных результатов (вероятности $P_{QR}$ ) и информации из базы данных IFFI $HR, \%$					
	общая (соответств. любым ненулевым вероятностям камнепадов $P_{QR}$ )	парциальная (для интервалов вероятностей камнепадов $P_{QR}$ в д.ед.)				
		[0, 0,2)	[0,2, 0,4)	[0,4, 0,6)	[0,6, 0,8)	[0,8, 1,0]
1.1	95	33	19	17	13	13
1.2 & 1.3	95	19	16	19	20	22
2.1	100	3	14	22	19	41
2.2	98	3	4	18	27	46
2.3a	96	13	12	20	23	29
2.3b	–	–	–	–	–	–
3.1	2	0	0	0	1	1
3.2	74	23	14	12	10	15
4.1	91	13	11	21	22	23
4.2	81	16	13	5	25	22
4.3	96	37	15	9	21	14
4.4	85	15	10	10	17	33
4.5	97	9	8	11	19	49
4.6	60	13	8	12	11	16
4.7	75	14	15	18	16	13
4.8	93	13	14	20	22	24
5.1	71	33	20	14	3	2
5.2	43	8	7	5	5	18
5.3	79	21	15	12	15	16
6.1	59	14	10	14	14	6
6.2	85	52	14	7	10	3
6.3	–	–	–	–	–	–
7.1 & 7.2	76	16	13	13	19	15
7.3	77	9	12	9	11	35
7.4	8	3	2	1	1	1
8.1	52	13	9	9	11	11
8.2	–	–	–	–	–	–
8.3	81	17	17	9	21	17
8.4	97	38	28	11	8	12

щиеся значения, была преобразована в карту относительных вероятностей в долях единицы (в интервале [0, 1]), то есть в карту подверженности камнепадам. Это было сделано с использованием эмпирических кумулятивных функций распределения (ECDF) количеств траекторий в пределах ячеек сетки, откалиброванных в подмножестве ячеек, в которых происходили камнепады, указанные в национальной базе данных IFFI (Trigila et al., 2010). Эта база включает полигоны, нанесенные на карту как «камнепадные» или как «обширные территории, содержащие камнепады». Авторы работы [1] рассчитали конкретные ECDF в каждой топографической единице, показанной на рисунке 1, а. На рисунке 4 показано несколько выборочных ECDF, соответствующих первым четырем топографическим единицам в таблицах 3, 4 и 5. Остальные ECDF очень похожи (их кривые накладываются на графики, представленные на рисунке 4).

На рисунке 8, б показано окончательное классифицированное количество траекторий (подверженность) в выбранном для примера месте. Эта растровая карта раскрашена в цвета от зеленого до красного, то есть соответственно от низких до высоких значений подверженности камнепадам. На рисунке 8, б карта подверженности сопоставляется с камнепадными полигонами из базы данных IFFI (см. также рис. 7) для этого места. Авторы статьи [1] выполнили валидацию классифицированных результатов, отраженных на карте подверженности, следующим образом. Были выбраны все камнепадные полигоны из базы данных IFFI в пределах буферных зон склоновых единиц, а затем выбрали ячейки сетки ЦМР внизу полигонов и попали в самый низкий по высоте 10-й перцентиль, что также показано на рисунке 8. Авторы достаточно уверены в том, что эти ячейки в совокупности представляют собой зоны отложений камнепадного материала.

**Таблица 5. Частота совпадений модельной вероятности камнепадов  $P_{QR}$  с целыми камнепадными полигонами из базы данных IFFI**

Топогр. единица	Доля достоверных результатов моделирования, то есть частота совпадений модельных результатов (вероятности $P_{QR}$ ) и информации из базы данных IFFI $HR, \%$					
	общая (соответств. любым ненулевым вероятностям камнепадов $P_{QR}$ )	парциальная (для интервалов вероятностей камнепадов $P_{QR}$ в д.ед.)				
		[0, 0,2)	[0,2, 0,4)	[0,4, 0,6)	[0,6, 0,8)	[0,8, 1,0]
1.1	97	19	22	20	18	18
1.2 & 1.3	95	17	19	19	19	20
2.1	95	13	13	14	22	33
2.2	93	16	18	21	20	18
2.3a	93	18	19	19	19	19
2.3b	-	-	-	-	-	-
3.1	6	1	1	0	2	1
3.2	60	12	13	12	12	12
4.1	90	12	15	17	21	24
4.2	84	24	16	15	18	12
4.3	95	16	19	20	20	20
4.4	81	14	16	17	17	17
4.5	94	17	19	19	19	19
4.6	65	12	13	13	13	13
4.7	72	13	16	16	15	13
4.8	80	15	16	16	17	17
5.1	58	24	19	10	4	1
5.2	36	9	6	5	7	9
5.3	89	17	18	18	18	18
6.1	65	10	11	14	15	15
6.2	78	16	15	16	16	16
6.3	-	-	-	-	-	-
7.1 & 7.2	55	12	12	12	11	9
7.3	83	10	15	19	20	20
7.4	-	-	-	-	-	-
8.1	40	8	8	8	8	8
8.2	-	-	-	-	-	-
8.3	82	17	17	17	19	12
8.4	87	15	17	17	19	19

Сопоставление карт вероятности  $P_{QR}$  для разных топографических единиц с зонами отложения полигонов из базы данных IFFI и с целыми полигонами из IFFI дало частоты совпадений  $HR$ , перечисленные в таблице 4.

В таблице 5 перечислены результаты сравнения смоделированных зон источников камнепадов с целыми камнепадными полигонами из базы данных IFFI.

Отметим, что топографическая единица 2.3b не содержит зарегистрированных в IFFI камнепадов, имеющих отношение к железной дороге, а топографические единицы 6.3 и 8.2 не содержат пересечений железной дороги со склоновыми единицами, поэтому для этих трех зон значения  $HR$  в таблицах 4 и 5 не указаны (в оригинальной статье в таблице 5 по какой-то причине также нет значений  $HR$  для топографической единицы 7.4. – *Ред.*).

Следующим шагом была классификация железнодорожной сети, разделенной на 1-километровые сегменты. Для

каждого сегмента, охватывающего множество значений вероятности камнепадов, выбиралась наибольшая величина. Это консервативный и разумный выбор, поскольку, если одна точка сегмента будет поражена камнепадом, то и весь сегмент будет непригоден для эксплуатации. С другой стороны, разбиение всего перегона, соединяющего два узла, на небольшие сегменты одинаковой длины гарантирует пространственную однородность. На рисунке 9, а показаны железнодорожные сегменты, классифицированные так, как указано выше. Общая длина железнодорожных трасс в Италии превышает 17 000 км, но в данной работе [1] не рассматривались участки, защищенные тоннелями, и участки за пределами цифровой модели рельефа TINITALY, но рассматривались участки, проходящие через равнинный рельеф. Таким образом, общая исследуемая длина железнодорожных трасс составила 16 084 км. Из них 14 724 км были отнесены к интервалу вероятно-

сти камнепадов [0, 0,2], 239 км – к [0,2, 0,4], 170 км – к [0,4, 0,6), 163 км – к [0,6, 0,8), 789 км – к [0,8, 1,0] (см. также таблицу 6).

К сожалению, имеющихся данных было недостаточно для валидации результатов классификации сегментов. Чтобы выполнить дополнительную оценку этих результатов, авторы работы [1] провели анализ графа и оценили значимость повреждений сегментов для работы всей железнодорожной сети.

**Ранжирование железнодорожной сети по подверженности и чувствительности к камнепадам ▶**

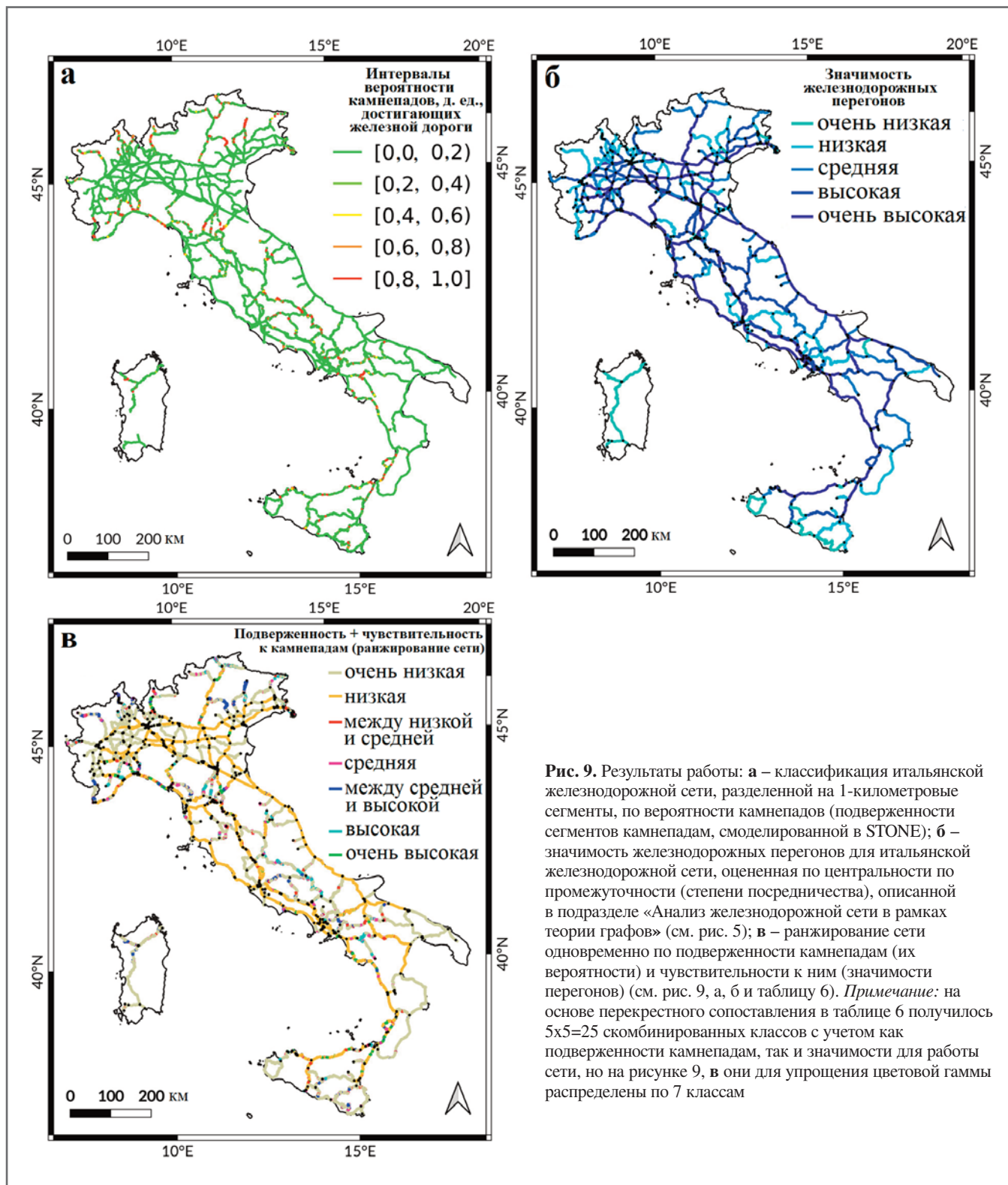
В подразделе «Анализ железнодорожной сети в рамках теории графов» был определен новый показатель (атрибут) значимости каждого сегмента железной дороги, полученный как изменение общей центральности по промежуточности (степени посредничества) всех оставшихся ребер в сети, если ребро, соответствующее рассматриваемому сегменту, удалено из графа. На рисунке 9, б показаны результаты такого анализа при удалении ребер по одному. Четко видны наиболее значимые ребра с самыми темными оттенками синего цвета, и можно легко заметить разницу между результатами этого анализа и степенью посредничества, показанной на рисунке 5.

Классы, основанные на подверженности камнепадам железнодорожной сети, разделенной на 1-километровые сегменты, были определены в подразделе «Моделирование траекторий камнепадов с помощью STONE». Результаты этой классификации (5 классов) показаны на рисунке 9, а.

Изменение общей степени посредничества всех оставшихся ребер графа сети при удалении ребер по одному было определено в подразделе «Анализ железнодорожной сети в рамках теории графов» и в начале этого подраздела (см. рис. 9, б).

Это были промежуточные шаги на пути к последнему результату этой работы [1] – комбинированному ранжированию железнодорожной сети с учетом как классов сегментов по их подверженности камнепадам, так и классов сегментов по их значимости. Этот комбинированный анализ был выполнен самым простым из возможных способом – путем перекрестного рассмотрения двух указанных классификаций. Результаты такого ранжирования, выраженные в километрах железнодорожных трасс в





**Рис. 9.** Результаты работы: а – классификация итальянской железнодорожной сети, разделенной на 1-километровые сегменты, по вероятности камнепадов (подверженности сегментов камнепадам, смоделированной в STONE); б – значимость железнодорожных перегонов для итальянской железнодорожной сети, оцененная по промежуточности (степени посредничества), описанной в подразделе «Анализ железнодорожной сети в рамках теории графов» (см. рис. 5); в – ранжирование сети одновременно по подверженности камнепадам (их вероятности) и чувствительности к ним (значимости перегонов) (см. рис. 9, а, б и таблицу 6). *Примечание:* на основе перекрестного сопоставления в таблице 6 получилось  $5 \times 5 = 25$  скомбинированных классов с учетом как подверженности камнепадам, так и значимости для работы сети, но на рисунке 9, в они для упрощения цветовой гаммы распределены по 7 классам

каждом комбинированном классе, представлены в таблице 6. Всего получилось 25 классов (рангов). Но их для простоты изображения на карте разбили на 7 объединенных классов (класс с самой низкой подверженностью камнепадам, соответствующий наибольшей части железнодорожной сети, был разделен на два класса ранжированной чувствительности, а оставшаяся часть сети была почти равномерно разделена еще на пять классов). Результаты этого пред-

ставлены на рисунке 9, в. Их сравнение с результатами классификации железнодорожной сети, основанной только на подверженности камнепадам (см. рис. 9, а), демонстрирует явные различия.

### ВЫБОРОЧНОЕ ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Авторы статьи [1] подчеркивают, что национальную базу данных по оползням IFFI (Trigila et al., 2010; ISPRA, 2018) они использовали лишь для вали-

дации результатов моделирования несколькими способами, но не применяли ее для построения или калибровки принятой в данной работе [1] модели камнепадов.

### Выявление зон источников камнепадов

Иллюстрация сопоставления смоделированных вероятностей начала камнепадов в зонах источников, закартированных экспертами, и верхнего процентиля

**Таблица 6. Перекрестное сопоставление подверженности сегментов железных дорог Италии камнепадам и оценок их значимости для работы всей железнодорожной сети страны**

Оценка значимости сегментов железнодорожной сети Италии	Суммарная длина сегментов железнодорожной сети, км, с вероятностью схода на них камнепадов, д. ед.					
	0,0–0,2	0,2–0,4	0,4–0,6	0,6–0,8	0,8–1,0	любая
Очень низкая (0–687)	1432	16	11	10	42	1511
Низкая (688–3006)	782	11	5	7	21	826
Средняя (3007–9014)	2506	52	33	33	188	2811
Высокая (9015–32 914)	4655	86	67	64	323	5195
Очень высокая (329 515–512 079)	5348	73	54	50	215	5740
Суммарная длина сегментов в столбце	14 724	239	170	163	789	16 084

*Примечание:* на основе перекрестного сопоставления в этой таблице получилось 5x5=25 скомбинированных классов с учетом как подверженности камнепадам, так и значимости для работы всей железнодорожной сети, но на рисунке 9, в они для упрощения цветовой гаммы распределены по 7 объединенным классам.

высотных отметок полигонов из базы данных IFFI представлена на рисунке 8 для одного конкретного района в топографической единице 1.2&1.3. Видно, что в этом районе ненулевые пиксели вероятностной карты источников охватывают большие площади, чем было выявлено при экспертном картировании источников и чем было занято верхним процентилем высот полигонов из базы данных IFFI. Это обусловлено построением, поскольку статистическая процедура, описанная в подразделе «Выявление зон источников камнепадов», была разработана для консервативного присвоения ненулевых вероятностей любой ячейке сетки выше довольно низкого порога, основанного на величине наклона поверхности. Это согласуется с тем наблюдением, что зоны источников, нанесенные на карту экспертами, на самом деле имеют довольно низкие наклоны (см. рис. 3, 6). На рисунке 8, а показано хорошее соответствие вероятностной карты и верхних процентилей высот полигонов из базы данных IFFI, а также зон, закартированных экспертами, хотя не все эти зоны совпадают идеально.

Тем не менее степень соответствия модельных источников модели с закартированными зонами и полигонами из IFFI часто довольно низка (см. таблицу 3). Авторы работы [1] объясняют это следующими причинами. Чтобы построить модель зон источников, они приняли наличие взаимосвязи между вероятностью того, что ячейка сетки инициирует камнепад, и местным углом наклона поверхности. Это было компромиссом между приемлемым общим временем, необходимым для выполнения процедуры для большой исследуемой территории, и реалистичностью получаемых результатов. Но это, без-

условно, не учитывало все свойства местного рельефа, которые влияют на экспертные критерии, применяемые для картирования зон потенциальных источников камнепадов. Более того, в процессе моделирования авторы делали конкретные выборы и допущения, часто произвольные.

Ошибки также могли возникать из-за несоответствия между цифровой моделью рельефа, использованной при анализе, и видимым разрешением изображений с сервиса Google Earth™, используемых для экспертного картирования, особенно для мест с самым крутым рельефом, которые больше всего интересовали авторов. При анализе они применяли ЦМР, сгенерированную на основе нерегулярной триангулированной сети (ТНС), и визуальный осмотр карты с оттененным рельефом, созданной на основе выделенных на ЦМР мест, в которых проявляется триангуляция, использованная для подготовки ЦМР, что, несомненно, влияет на карту склонов по всей стране.

**Модель STONE и подверженность камнепадам ▶**

Результатом моделирования в программе STONE является растровая карта, показывающая количества классифицированных траекторий на ячейку сетки. Для получения окончательных результатов своей работы авторы статьи [1] использовали эту карту несколькими способами:

- 1) сопоставили эту карту с информацией по камнепадным полигонам из базы данных IFFI;
- 2) разделили железнодорожную сеть на 1-километровые сегменты и классифицировали их на основе их подверженности камнепадам;

3) изучили свойства железнодорожной сети в рамках теории графов, рассматривая сеть в связи с ее чувствительностью к удалению ребер (аналогов перегонов между узлами) графа по одному, что помогло затем выполнить совместную классификацию по подверженности и чувствительности.

В таблицах 4 и 5 перечислены итоги валидации модельных результатов путем их сравнения соответственно с зонами транзита плюс отложения и с целыми камнепадными полигонами из базы данных IFFI. Значения общей доли (частоты) совпадений *HR* в этом случае довольно велики, а это означает, что большинство зон транзита камнепадов в IFFI действительно перекрывались хотя бы с одной модельной траекторией камней.

Анализируя парциальные величины *HR* для разных интервалов модельной вероятности камнепадов в таблице 4, можно увидеть, что в большинстве случаев зоны транзита попадают в класс подверженности камнепадам в интервале их вероятности [0,8, 1,0], многие – в [0, 0,2), некоторые – в [0,4, 0,6) и [0,6, 0,8) и ни одна – в [0,2, 0,4). Эта информация не требует однозначных выводов, хотя может быть интересна для дальнейшего использования, если будут усовершенствованы методы, представленные в этой работе. Скорее всего, указанные особенности могут быть связаны с процедурой выбора зон источников камнепадов (например, Rossi et al., 2021) или с использованием стратегии классификации по результатам подсчета траекторий.

В таблице 5 представлены итоги валидации модельных результатов путем их сравнения с целыми полигонами из базы данных IFFI в отличие от таблицы 4. Значения общей частоты совпадений *HR* довольно схожи со случаем, когда сравнение выполнялось с 10-м процентилем высоты каждого полигона, а в нескольких случаях и немного выше. Интересно, что здесь частоты совпадений почти всегда равномерно распределяются между пятью подклассами модельной вероятности камнепадов. Одной из причин этого может быть пространственная неточность выделенных полигонов из IFFI.

Модельный подсчет траекторий (см. рис. 8, б) дал растровую карту с разрешением 10 м. Но авторы считают конечным продуктом этой работы векторную карту железнодорожной сети, разбитую на сегменты длиной по 1 км, подразделенные на 5 классов по их подвержен-

ности камнепадам. Причина этого является двойкой. Во-первых, первоначальной целью авторов было создание карты, которую можно было бы использовать для ранжирования (приоритизации) мер безопасности на национальном уровне. Во-вторых, авторы принимали допущения и приближения, чтобы иметь возможность работать однородно в национальном масштабе; по этой причине растровая карта с разрешением 10 м может содержать локальные неточности, которые сглаживаются классификацией сегментов протяженностью по 1 км. Это подразумевает, что применение классифицированной карты предназначено для определения местоположений целых сегментов с наибольшей подверженностью камнепадам. Выводы для меньших (местных) масштабов все же могут быть получены в рамках модели STONE, но они должны подтверждаться данными с более высоким разрешением.

### Совместная классификация железнодорожной сети по подверженности камнепадам и по чувствительности к выходу из строя отдельных перегонов ▶

Объединенное ранжирование железнодорожной сети Италии по подверженности и чувствительности к камнепадам было выполнено на основе перекрестной комбинации пяти классов сегментов по вероятности схода на них камнепадов и пяти классов перегонов по их значимости для функционирования всей сети (см. таблицу 6 и рис 9, в).

Как уже было отмечено, в этом случае были получены несколько необычные результаты (см. рис 9, в): сегменты с незначительной подверженностью камнепадам (см. рис. 9, а) не попадали в низший ранг по чувствительности сети к их выходу из строя. Но следует отметить, что из 25 комбинаций из таблицы 6 было почти произвольно выделено 7 комбинированных классов, представленных на рисунке 9, в, – отсюда и некоторые несоответствия.

Авторы статьи [1] рассматривают указанную комбинированную классификацию просто как методологическое предложение. Они не пытались здесь оптимизировать конечные классы на более высоком уровне, хотя это можно было бы выполнить с подходящими точными данными для валидации – по наблюдаемым камнепадам и (возможно) по пересечению ими железнодорожных путей, а также по фактической работе всей сети.

Знание фактического железнодорожного трафика подразумевает свойства сети. На самом деле в этой работе [1] степень посредничества узлов и ребер рассчитывалась с учетом кратчайших путей между всеми возможными парами. Если бы авторы статьи [1] заменили их реальными маршрутами, они бы получили другую сеть и другой соответствующий граф (Kurant, Thiran, 2006). Вот еще один пример. Знание количества поездов, проходящих в день по каждому железнодорожному перегону, можно было бы использовать для определения значимости ребер другим способом, а не на основе простой топологии сети, рассмотренной здесь. Аналогичным образом могла бы помочь дополнительная информация о среднем количестве пассажиров на перегон в день. С другой стороны, информация о присутствии поездов в реальном времени на каждом перегоне сети хотя и не является сложной для рассмотрения с технической точки зрения, но не имеет непосредственного отношения к выполненной работе [1]. Получение такой информации потребовало бы включения некоего динамического механизма фактического отрыва каменного материала выше по склону над каждым железнодорожным перегонном, а также мониторинга возможных инициирующих камнепады событий в реальном времени.

### Выводы ▶

В данной работе [1] был выполнен физически обоснованный анализ подверженности камнепадам итальянской железнодорожной сети на площади 25 400 км<sup>2</sup>. Выборка источников камнепадов, нанесенная на карту экспертами, помогла разработать вероятностную идентификацию потенциальных источников на основе цифровой модели рельефа и углов наклона поверхности. Расположение источников было ключевым исходным материалом для трехмерного моделирования зон транзита камнепадов из любого возможного источника в программе STONE. Сегменты железнодорожной сети были разделены на классы по подверженности камнепадам и на классы по их значимости для работы всей сети. В результате была разработана совместная классификация на основе предыдущих двух.

Чтобы справиться с проблемами, связанными с большими размерами изучаемой территории, обширными картографическими и вычислительными трудностями, обязательно принимались допущения и приближения. Дополни-

тельным моментом здесь является то, что из-за больших размеров исследуемой территории и отсутствия конкретных данных камнепады на застроенных склонах не рассматривались. При этом достоинством этой работы является предложение эффективной процедуры оценки подверженности и чувствительности к камнепадам железных дорог на очень большой и геоморфологически разнообразной исследуемой территории.

На основе выполненной работы были сделаны следующие выводы.

1. Процедура определения зон источников камнепадов основывалась на статистическом обобщении распределения углов наклона в пределах камнепадных полигонов, нанесенных на карту экспертами. Результаты валидации путем анализа частоты (доли) совпадений *HR* с информацией по камнепадам из базы данных IFFI показали, что указанная процедура в принципе пригодна для идентификации источников на больших территориях (в данной работе исследуемая площадь составляла около 25 000 км<sup>2</sup>), хотя улучшение качества калибровки потребовало бы включения дополнительных морфометрических переменных помимо наклона поверхности.

2. Траектории камнепадов моделировались с помощью программы STONE. Результаты валидации классифицированных зон транзита с точки зрения частоты совпадений *HR* с информацией по камнепадам из базы данных IFFI были достаточно удовлетворительными, поскольку большинство значений *HR* относилось к верхнему квартилю распределения вероятностей. Далее авторы статьи [1] совместили карту подверженности камнепадам территории страны и карту железнодорожной сети, разбили железные дороги на сегменты длиной по 1 км и подразделили эти сегменты на классы подверженности камнепадам. Более надежная валидация величин подверженности требует дополнительных данных.


3. При анализе возможного воздействия камнепадов на железнодорожную сеть Италии поочередно учитывалось влияние выхода из строя одного перегона на функционирование всей сети. Таким образом было выполнено ранжирование перегонов по их значимости для сети (в рамках теории графов). Затем была выполнена комбинированная классификация сети с учетом как подверженности, так и чувствительности к камнепадам. Авторы статьи [1] расценивают этот шаг как методологическое предложение, оптимизация и валидация кото-

рого потребуют специальных данных и дополнительных знаний о фактическом железнодорожном трафике в сети.

Следует подчеркнуть, что в данной работе информация из национальной базы данных по оползням IFFI (Trigila et al., 2010) помогла подтвердить приемлемую достоверность результатов моделирования, но не использовалась ни при идентификации источников камнепадов, которая требовала экспертного картирования, ни при моделировании зон транзита каменного материала. Это оставляет возможность для усовершенствования процедуры, поскольку авторы статьи [1] для характеристики закартированных экспертами полигонов использовали только распределение углов наклона поверхности. То есть оба шага (идентификация источников камнепа-

дов и моделирование их транзита), в принципе, могут быть расширены.

Следует также отметить, что естественной эволюцией выполненного здесь анализа топологических свойств железнодорожной сети является мониторинг сети в реальном времени (поначалу еще статический, без учета трафика) в зависимости от развития в реальном времени возможных инициирующих событий. Собственно, это и было первоначальным мотивом этой работы. Представленная здесь карта подверженности сегментов железной дороги камнепадам вместе с аналогичной картой их подверженности обломочным потокам, селям и оползням дисперсных грунтов были ключевыми входными данными для прототипа системы раннего предупреждения, создание которого

финансировалось Национальной железнодорожной компанией (RFI) в рамках реализации Национальной системы раннего предупреждения об оползнях, вызванных дождями (SANF) (Rossi et al., 2012; Guzzetti et al., 2020). 

*Эта работа была частично поддержана владельцем железнодорожной сети Италии Rete Ferroviaria Italiana (RFI) – дочерней компанией государственного холдинга Ferrovie dello Stato (FS).*

**Перевод статьи на русский язык подготовлен редакцией при поддержке компании «ГАБИОНЫ МАККАФЕРРИ СНГ» – партнера и одного из генеральных спонсоров журнала «ГеоИнфо».**

### ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

1. Alvioli M., Santangelo M., Fiorucci F., Cardinali M., Marchesini I., Reichenbach P., Rossi M., Guzzetti F., Peruccacci S. Rockfall susceptibility and network-ranked susceptibility along the Italian railway // *Engineering Geology*. Vol. 293. Elsevier B.V., November 2021. P. 106301. URL: doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106301.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ [REFERENCES] ►

1. Agliardi, F., Crosta, G.B., 2003. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40, 455–471. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00021-2).
2. Albert, R., Jeong, H., Barabasi, A.L., 2000. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature* 406, 378–382. <https://doi.org/10.1038/35019019>.
3. Alvioli, M., 2020. Administrative boundaries and urban areas in Italy: A perspective from scaling laws. *Landsc. Urban Plan.* 204, 103906. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103906>.
4. Alvioli, M., Marchesini, I., Reichenbach, P., Rossi, M., Ardizzone, F., Fiorucci, F., Guzzetti, F., 2016. Automatic delineation of geomorphological slope units with r. slopeunits v1.0 and their optimization for landslide susceptibility modeling. *Geosci. Model Dev.* 9, 3975–3991. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3975-2016>.
5. Alvioli, M., Guzzetti, F., Marchesini, I., 2020a. Parameter-free delineation of slope units and terrain subdivision of Italy. *Geomorphology* 358, 107124. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107124>.
6. Alvioli, M., Santangelo, M., Fiorucci, F., Cardinali, M., Marchesini, I., Reichenbach, P., Rossi, M., 2020b. A data-driven method for assessing the probability for terrain grid cells of initiating rockfalls on a large area. In: Alvioli, M., Marchesini, I., Melelli, L., Guth, P. (Eds.), *Proceedings of the sixth Geomorphometry conference: Geomorphometry 2020*, CNR Edizioni, Rome, Perugia, Italy. [https://doi.org/10.30437/geomorphometry2020\\_43](https://doi.org/10.30437/geomorphometry2020_43).
7. Amato, G., Fiorucci, M., Martino, S., Lombardo, L., Palombi, L., 2020. Earthquake-Triggered Landslide Susceptibility in Italy by Means of Artificial Neural Network. <https://doi.org/10.31223/X59W39>.
8. Barthelemy, M., 2011. Spatial networks. *Phys. Rep.* 499, 1–101. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2010.11.002>.
9. Bassolas, A., Gallotti, R., Lamanna, F., Lenormand, M., Ramasco, J.J., 2020. Scaling in the recovery of urban transportation systems from massive events. *Sci. Rep.* 10, 2746. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59576-1>.
10. Battaglini, L., Campo, V., Cipolloni, C., Congi, M.P., Delogu, D., Ventura, R., 2012. Carta geologica d'Italia alla scala 1:100,000. WWW site. ISPRA. Via Vitaliano Brancati, 48 — 00144 Rome, Italy. URL: [http://193.206.192.231/carta\\_geologica\\_italia/cartageologica.htm](http://193.206.192.231/carta_geologica_italia/cartageologica.htm).
11. Bornaetxea, T., Rossi, M., Marchesini, I., Alvioli, M., 2018. Effective surveyed area and its role in statistical landslide susceptibility assessments. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18, 2455–2469. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2455-2018>.
12. Bourrier, F., Dorren, L., Hungr, O., 2013. The use of ballistic trajectory and granular flow models in predicting rockfall propagation. *Earth Surf. Process. Landf.* 38, 435–440. <https://doi.org/10.1002/esp.3372>.
13. Bucci, F., Santangelo, M., Fongo, L., Marchesini, I., Alvioli, M., Cardinali, M., Melelli, L., 2021. A new lithological Map of Italy at 1:100,000 Scale for geo-mechanical modeling. In preparation.
14. Buyer, A., Aichinger, S., Schubert, W., 2020. Applying photogrammetry and semi-automated joint mapping for rock mass characterization. *Eng. Geol.* 264, 105332. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105332>.


15. Camilo, D.C., Lombardo, L., Mai, P.M., Dou, J., Huser, R., 2017. Handling high predictor dimensionality in slope-unit-based landslide susceptibility models through lasso-penalized generalized linear model. *Environ. Model. Softw.* 97, 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.08.003>.
16. Casagrande, L., Cavallini, P., Frigeri, A., Furieri, A., Marchesini, I., Neteler, M., 2007. GIS Open Source. Flaccovio, Palermo (In Italian).
17. Cats, O., Yap, M., van Oort, N., 2016. Exposing the role of exposure: Public transport network risk analysis. *Transp. Res. A Policy Pract.* 88, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.03.015>.
18. Chartrand, G., Chartrand, G., Lesniak, L., Lesniak, L., Zhang, P., 1993. *Graphs & Digraphs*. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, FL.
19. Chen, Z., Liang, S., Ke, Y., Yang, Z., Zhao, H., 2020. Landslide susceptibility assessment using different slope units based on the evidential belief function model. *Geocarto Int.* 35, 1641–1664. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1582716>.
20. Cohen, R., Erez, K., Ben Avraham, D., Havlin, S., 2000. Resilience of the internet to random breakdowns. *Phys. Rev. Lett.* 85, 4626–4628. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.4626>.
21. Collins, B.D., Stock, G.M., 2016. Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures. *Nat. Geosci.* 9, 395–400. <https://doi.org/10.1038/ngeo2686>.
22. Corominas, J., Mavrouli, O., Ruiz-Carulla, R., 2018. Magnitude and frequency relations: are there geological constraints to the rockfall size? *Landslides* 15, 829–845. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0910-z>.
23. Delonca, A., Gunzburger, Y., Verdel, T., 2014. Statistical correlation between meteorological and rockfall databases. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14, 1953–1964. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1953-2014>.
24. Evans, S.G., Hungr, O., 1993. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Can. Geotech. J.* 30, 620–636. <https://doi.org/10.1139/t93-054>.
25. Fongo, L., 2018. Verso una nuova carta litologica d'Italia in scala 1:100,000 (in Italian) Master Thesis. University of Perugia.
26. Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A., Agliardi, F., 2008. Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology* 94, 419–437. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.037>. GIS technology and models for assessing landslide hazard and risk.
27. Freeman, L.C., 1978. Centrality in social networks conceptual clarification. *Soc. Networks* 1, 215–239. [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7).
28. Giordan, D., Adams, M.S., Aicardi, I., Alicandro, M., Allasia, P., Baldo, M., Berardinis, P. D., Dominici, D., Godone, D., Hobbs, P., Lechner, V., Niedzielski, T., Piras, M., Rotilio, M., Salvini, R., Segor, V., Sotier, B., Troilo, F., 2020. The use of unmanned aerial vehicles (uavs) for engineering geology applications. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 79, 3437–3481. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01766-2>.
29. Guzzetti, F., Reichenbach, P., 1994. Towards a definition of topographic divisions for Italy. *Geomorphology* 11, 57–74. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(94\)90042-6](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90042-6).
30. Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., Agliardi, F., 2002. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Comput. Geosci.* 28, 1079–1093. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00025-0).
31. Guzzetti, F., Reichenbach, P., Wieczorek, G.F., 2003. Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 3, 491–503. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-491-2003>.
32. Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ghigi, S., 2004. Rockfall hazard and risk assessment along a transportation corridor in the Nera Valley, Central Italy. *Environ. Manag.* 34, 191–208. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0021-6>.
33. Guzzetti, F., Gariano, S.L., Peruccacci, S., Brunetti, M.T., Marchesini, I., Rossi, M., Melillo, M., 2020. Geographical landslide early warning systems. *Earth Sci. Rev.* 200, 102973. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102973>.
34. Hungr, O., Evans, S.G., Hazzard, J., 1999. Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. *Can. Geotech. J.* 36, 224–238. <https://doi.org/10.1139/t98-106>.
35. ISPRA, 2018. Landslides and floods in Italy: hazard and risk indicators — Summary Report 2018. Technical report. The Institute for Environmental Protection and Research, Via Vitaliano Brancati, 48 — 00144 Rome, Italy. URL. <http://www.isprambiente.gov.it.287/bis/2018>.
36. Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellan, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A., 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Nat. Hazards* 61, 5–28. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>.
37. Jacobs, L., Kervyn, M., Reichenbach, P., Rossi, M., Marchesini, I., Alvioli, M., Dewitte, O., 2020. Regional susceptibility assessments with heterogeneous landslide information: Slope unit- vs. pixel-based approach. *Geomorphology* 356, 107084. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107084>.
38. Katifori, E., Szollosi, G.J., Magnasco, M.O., 2010. Damage and fluctuations induce loops in optimal transport networks. *Phys. Rev. Lett.* 104, 048704 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.048704>.
39. Kurant, M., Thiran, P., 2006. Extraction and analysis of traffic and topologies of transportation networks. *Phys. Rev. E* 74 (3), 036114. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.036114>.
40. Li, L., Lan, H., 2020. Integration of spatial probability and size in slope-unit-based landslide susceptibility assessment: A case study. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17, 8055. <https://doi.org/10.3390/ijerph17218055>.

41. Li, H., Li, X., Li, W., Zhang, S., Zhou, J., 2019. Quantitative assessment for the rockfall hazard in a post–earthquake high rock slope using terrestrial laser scanning. *Eng. Geol.* 248, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.11.003>.
42. Lu, L., Zhang, M., 2013. Edge betweenness centrality. In: Dubitzky, W., Wolkenhauer, O., Cho, K.H., Yokota, H. (Eds.), *Encyclopedia of Systems Biology*. Springer New York, New York, NY, pp. 647–648. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9863-7\\_874](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9863-7_874).
43. Macciotta, R., Martin, C.D., Edwards, T., Cruden, D.M., Keegan, T., 2015. Quantifying weather conditions for rock fall hazard management. *Georisk* 9, 171–186. <https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1061673>.
44. Marchesini, I., Rossi, M., Alvioli, M., Santangelo, M., Cardinali, M., 2020. Slope–catchment area relationship for debris-flow source area identification. In: Alvioli, M., Marchesini, I., Melelli, L., Guth, P. (Eds.), *Proceedings of the sixth Geomorphometry conference: Geomorphometry 2020*, CNR Edizioni, Rome, Perugia, Italy. [https://doi.org/10.30437/geomorphometry2020\\_47](https://doi.org/10.30437/geomorphometry2020_47).
45. Matas, G., Lantada, N., Corominas, J., Gili, J., Ruiz-Carulla, R., Prades, A., 2017. Simulation of full–scale rockfall tests with a fragmentation model. *Landslides* 14, 1565–1578. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0818-7>.
46. Matas, G., Lantada, N., Corominas, J., Gili, J., Ruiz-Carulla, R., Prades, A., 2020. Simulation of full–scale rockfall tests with a fragmentation model. *Geosciences* 10, 168. <https://doi.org/10.3390/geosciences10050168>.
47. Matasci, B., Stock, G.M., Jaboyedoff, M., Carrea, D., Collins, B.D., Guerin, A., Matasci, G., Raveland, L., 2018. Assessing rockfall susceptibility in steep and overhanging slopes using three-dimensional analysis of failure mechanisms. *Landslides* 15, 859–878. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0911-y>.
48. Mattsson, L.G., Jenelius, E., 2015. Vulnerability and resilience of transport systems — a discussion of recent research. *Transp. Res. A Policy Pract.* 81, 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.002>. Resilience of Networks.
49. Mavrouli, O., Corominas, J., 2020. Evaluation of maximum rockfall dimensions based on probabilistic assessment of the penetration of the sliding planes into the slope. *Rock Mech. Rock. Eng.* 53, 2301–2312. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02060-z>.
50. Melillo, M., Gariano, S., Peruccacci, S., Sarro, R., Mateos, R.M., Brunetti, M.T., 2020. Rainfall and rockfalls in the Canary Islands: assessing a seasonal link. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 20, 2307–2317. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2307-2020>.
51. Melzner, S., Rossi, M., Guzzetti, F., 2020. Impact of mapping strategies on rockfall frequency-size distributions. *Eng. Geol.* 272, 105639. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105639>.
52. Menegoni, N., Giordan, D., Perotti, C., 2021. An open-source algorithm for 3d rock slope kinematic analysis (roka). *Appl. Sci.* 11 <https://doi.org/10.3390/app11041698>.
53. Neteler, M., Mitasova, H., 2007. *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. Springer, New York.
54. Perez-Rey, I., Riquelme, A., Gonzalez-de-Santos, L.M., Estevez-Ventosa, X., Tomas, R., Alejano, L.R., 2019. A multi–approach rockfall hazard assessment on a weathered granite natural rock slope. *Landslides* 16, 2005–2015. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01208-5>.
55. Riquelme, A.J., Abellan, A., Tomas, R., Jaboyedoff, M., 2014. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Comput. Geosci.* 68, 38–52. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>.
56. Rossi, M., Peruccacci, S., Brunetti, M.T., Marchesini, I., Luciani, S., Ardizzone, F., Balducci, V., Bianchi, C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Mondini, A.C., Reichenbach, P., Salvati, P., Santangelo, M., Bartolini, D., Gariano, S.L., Palladino, M., Vessia, G., Viero, A., Andronico, L., Borselli, L., Deganutti, A.M., Iovine, G., Luino, F., Parise, M., Polemio, M., Guzzetti, F., Tonelli, G., 2012. SANF: National warning system for rainfall-induced landslides in Italy. In: *Proceedings 11th Symposium on Landslides and 2nd north American Symposium on Landslides*, Banff, Canada, pp. 1895–1899.
57. Rossi, M., Sarro, R., Reichenbach, P., Mateos, R.M., 2021. Probabilistic identification of rockfall source areas at regional scale in El Hierro (Canary Islands, Spain). *Geomorphology* 381, 107661. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107661>.
58. Ruiz-Carulla, R., Corominas, J., Gili, J.A., Matas, G., Lantada, N., Moya, J., Prades, A., Nunez Andres, M.A., Buill, F., Puig, C., 2020. Analysis of fragmentation of rock blocks from real–scale tests. *Geosciences* 10, 308. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080308>.
59. Santangelo, M., Alvioli, M., Baldo, M., Cardinali, M., Giordan, D., Guzzetti, F., Marchesini, I., Reichenbach, P., 2019. Brief communication: Remotely piloted aircraft systems for rapid emergency response: road exposure to rockfall in Villanova di Accumoli (Central Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 19, 325–335. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-325-2019>.
60. Santangelo, M., Marchesini, I., Bucci, F., Cardinali, M., Cavalli, M., Crema, S., Marchi, L., Alvioli, M., Guzzetti, F., 2020. Exposure to landslides in rural areas in Central Italy. *J. Maps* 0, 1–9. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1746699>.
61. Sarro, R., Mateos, R.M., Reichenbach, P., Aguilera, H., Riquelme, A., Hernandez- Gutierrez, L.E., Martin, A., Barra, A., Solari, L., Monserrat, O., Alvioli, M., Fernandez- Merodo, J.A., Lopez-Vinielles, J., Herrera, G., 2020. Geotechnics for rockfall assessment in the volcanic island of Gran Canaria (Canary Islands, Spain). *J. Maps* 16, 605–613. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1806125>.
62. Schlogel, R., Marchesini, I., Alvioli, M., Reichenbach, P., Rossi, M., Malet, J.P., 2018. Optimizing landslide susceptibility zonation: Effects of DEM spatial resolution and slope unit delineation on logistic regression models. *Geomorphology* 301, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.10.018>.
63. Tacchia, D., 2004. *Cartografia ufficiale geologica e geomorfologica*. Technical report. ISPRA. Via Vitaliano Brancati, 48 — 00144 Rome, Italy. URL. <http://sgi.isprambiente.it/geologia100k/Documenti/cartuffgeo.pdf>.
64. Tanyas, H., Rossi, M., Alvioli, M., van Westen, C.J., Marchesini, I., 2019a. A global slope unit-based method for the near real-time prediction of earthquake-induced landslides. *Geomorphology* 327, 126–146. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.022>.

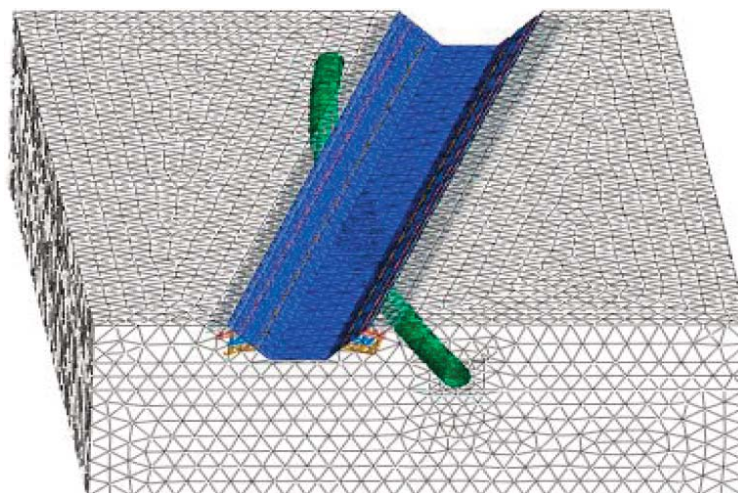
65. Tanyas, H., van Westen, C.J., Persello, C., Alvioli, M., 2019b. Rapid prediction of the magnitude scale of landslide events triggered by an earthquake. *Landslides* 16, 661–676. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01136-4>.
66. Tarquini, S., Isola, I., Favalli, M., Mazzarini, F., Bisson, M., Pareschi, M.T., Boschi, E., 2007. TINITALY/01: a new Triangular Irregular Network of Italy. *Ann. Geophys.* 50, 407–425. <https://doi.org/10.4401/ag-4424>.
67. Trigila, A., Iadanza, C., Spizzichino, D., 2010. Quality assessment of the Italian Landslide Inventory using GIS processing. *Landslides* 7, 455–470. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0213-0>.
68. Turanboy, A., Ulker, E., Cuksutcu, C.B.K., 2018. A new approach for assessing stability of rock slopes considering centroids of weak zones. *J. Min. Environ.* 9, 1–18. <https://doi.org/10.22044/jme.2017.5975.1414>.

## Telegram-канал журнала

Независимый электронный журнал  
**ГеоИнфо**

- 
- Новости
  - Статьи
  - Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>



## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА КОТЛОВАНА НА РАСПОЛОЖЕННЫЙ ВБЛИЗИ ТОННЕЛЬ

Обзорная статья. Перевод с английского

Поступила в редакцию 26.01.2023. Принята к публикации 22.02.2023.

© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2023

### ЛЮ ЧЭНЬ ЯН

Институт гражданского строительства и архитектуры Цзинаньского университета; Научно-исследовательский центр инженерных технологий для поддержки городского подземного строительства и мониторинга рисков провинции Шаньдун, г. Цзинань, пров. Шаньдун, Китай, liuchenyang919@163.com

### ЛЮ ЦЗЮНЬ ЯНЬ

Институт гражданского строительства и архитектуры Цзинаньского университета, г. Цзинань, пров. Шаньдун, Китай, liujunyan@vip.sina.com

### У ЮН ЧЖЭНЬ

Компания № 3 Engineering Group и компания № 5 Engineering Group корпорации China Railway Group, г. Пекин, Китай, jidigaofei@163.com

### ЛЮ ЮН

Компания Jinan Ding Hui Civil Engineering Technology, г. Цзинань, пров. Шаньдун, Китай, lydinghui@163.com

### АННОТАЦИЯ

Продолжаем знакомить наших читателей с использованием программной продукции южнокорейской компании MIDAS IT, основанной в 2000 году в г. 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.

Представляем вниманию читателей немного сокращенный адаптированный перевод с английского языка доклада «Анализ влияния строительства котлована на расположенный вблизи тоннель», сделанного в 2018 году на 4-й Международной конференции по применяемым материалам и технологиям производства. Его авторами являются китайские исследователи из Цзинаньского университета и некоторых изыскательских компаний – Чэнь Ян Лю, Цзюнь Янь Лю, Юн Чжэнь У и Юн Лю. Этот доклад в том же году появился на сайте IOP Publishing Ltd – одного из крупнейших в мире издательств, публикующих материалы престижных научных конференций в сферах технических и естественных наук. Данное издательство является дочерней компанией британского научного общества IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшего транснациональным.

Указанный доклад находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет его копировать, распространять, адаптировать,



преобразовывать и использовать (в том числе в коммерческих целях) при указании ссылки на первоисточник и типов изменений. В нашем случае ссылка приводится в конце перевода.

Освоение подземного пространства привело к возникновению ряда строительных проектов, требующих выемки грунта вблизи существующих тоннелей метро, что без принятия специальных мер защиты весьма рискованно. В этой работе [1] рассматриваются строящийся котлован и проходящий под ним наискось тоннель метро в городе Цзинань (провинция Шаньдун, Китай). Минимальное вертикальное расстояние между дном котлована и верхом тоннеля составляет всего 1,8 м, а угол между их направлениями равен 15°.

Авторы доклада [1] выполнили численное моделирование в конечноэлементном программном комплексе midas GTS NX для исследования полей смещений и напряжений тоннеля и вмещающего его грунтового массива в условиях откопки котлована. На основе этого авторы изучили меры по укреплению грунта и проанализировали его результаты. В то же время для подтверждения эффекта укрепления использовались данные мониторинга.

По результатам предварительного анализа, выемка грунта при создании котлована оказала незначительное влияние на горизонтальные смещения тоннеля и большое влияние – на его вертикальные смещения. Без мер по укреплению грунта максимальное смещение тоннеля вверх достигло 23,11 мм, что превысило допустимое значение. За счет инъекционной цементации грунта вокруг тоннеля и приложения нагрузки на дно тоннеля подъем последнего уменьшился до 4,86 мм, что согласовывалось с данными полевых измерений. Эффект принятых защитных мер получился замечательным.

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

котлован; тоннель метро; численное моделирование; программный комплекс midas GTS NX; выемка грунта; разгрузка; вертикальные смещения; горизонтальные смещения; напряжения; деформации; риски; безопасность; защитные меры; укрепление грунта; цементация грунта; приложение нагрузки; мониторинг.

#### ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Лю Чэнь Ян, Лю Цзюнь Янь, У Юн Чжэнь, Лю Юн. Анализ влияния строительства котлована на расположенный вблизи тоннель (пер. с англ.) // Геоинфо. 2023. № 1. С. 72–80

# ANALYSIS ON THE INFLUENCE OF EXCAVATION OF A CLOSE-RANGE FOUNDATION PIT ON AN EXISTING TUNNEL

*Review paper. Translated from English*

*Received 26.01.2023. Accepted 22.02.2023.*

© Independent electronic journal "GeoInfo", 2023

#### CHEN YANG LIU

School of Civil Engineering and Architecture of the University of Jinan, Jinan, Shandong Province, China, liuchenyang919@163.com

#### JUN YAN LIU

School of Civil Engineering and Architecture of the University of Jinan; the Engineering Technology Research Center for Urban Underground Engineering Supporting and Risk Monitoring of Shandong Province, Jinan, Shandong Province, China, liujunyan@vip.sina.com

#### YONG ZHEN WU

№ 3 Engineering Group Ltd. and № 5 Engineering Group Ltd. of the China Railway Group Ltd., Beijing, China, jidigaofei@163.com

#### YONG LIU

Jinan Ding Hui Civil Engineering Technology Co. Ltd., Jinan, Shandong Province, China, lydinghui@163.com

#### ABSTRACT

We are continuing to familiarize the 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 of this company was opened (LLC "MIDAS"). 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 offer to the attention of the readers a slightly abridged and adapted translation (from English into Russian) of the report [1] on the influence of excavation of a close-range foundation pit on an existing tunnel. It was made at the 4th International Conference on Applied Materials and Manufacturing Technology in 2018. The authors of the report are Chinese researchers from the Jinan University and some Chinese site investigation and geotechnical companies. They are Chen Yang Liu, Jun Yan Liu, Yong Zhen Wu, and Yong Liu. In the same year their report was published by IOP Publishing Ltd (at its website in open access) that is one of the world's largest publishers of proceedings of prestigious scientific conferences in the fields of engineering

and natural sciences. IOP Publishing Ltd is a subsidiary of the British scientific society named IOP (Institute of Physics – “Institute of Physics”), which has become transnational.

This report is in open access under the CC BY 3.0 license, which allows it to be copied, distributed, adapted, transformed and used (including for commercial purposes) with indication a reference to the original source and types of changes. In our case, the reference is provided at the end of the translation.

The development of underground space has resulted in a number of construction projects that require soil excavation in the vicinity of existing metro tunnels, which is very risky. This report [1] discusses a constructed foundation pit and an existing subway tunnel running askew under the pit in the city of Jinan (Shandong Province, China). The minimal vertical distance between the bottom of the foundation pit and the tunnel top is only 1.8 m, and the angle between their directions is 15°.

The authors of the report [1] carried out numerical simulations with the use of the midas GTS NX finite element software to investigate the displacement and stress fields of the tunnel under the conditions of the foundation pit excavation. On this basis, they studied some measures of soil reinforcement and further analyzed the results of that. At the same time, the authors used monitoring data to confirm the effect of the reinforcement.

According to the results of the preliminary analysis, the foundation pit excavation influenced the horizontal displacements of the tunnel insignificantly and impacted its vertical displacements greatly. Without the soil reinforcement measures, the maximal upward displacement of the tunnel reached 23.11 mm, which exceeded the permissible one. As a result of grouting the soil around the tunnel and loading the bottom of it, the rise of the tunnel decreased and became 4.86 mm, which was consistent with the monitoring measurements. The effect of the protective measures turned out to be remarkable.

#### KEYWORDS:

foundation pit; subway tunnel; numerical simulation; midas GTS NX software package; soil excavation; unloading; vertical displacements; horizontal displacements; stresses; deformations; risks; safety; protective measures; soil reinforcement; soil grouting; loading; monitoring.

#### FOR CITATION:

Liu Chen Yang, Liu Jun Yan, Wu Yong Zhen, Liu Yong. Analiz vliyaniya stroitel'stva kotlovana na raspolozhennyi vblizi tonnel' (per. s angl.) [Analysis on the influence of excavation of a close-range foundation pit on an existing tunnel]. GeolInfo. 2023. 1: 72–80 (in Russian).

#### ВВЕДЕНИЕ ►

Согласно статистическим данным по состоянию на 31 декабря 2017 года общая протяженность линий метро в Китае достигла 3894,2 км и Китай стал крупнейшим рынком строительства таких линий в мире [Feng Aijun, 2018]. Подземное пространство становится «перегруженным», и рядом с тоннелями метро проводится множество земляных работ. Разгрузка при выемке грунта поблизости обязательно вызывает изменения полей напряжений и смещений во вмещающих грунтах и тоннелях метро, что вызывает дополнительные внутренние усилия и деформации конструкций тоннелей и серьезно угрожает их безопасности. Так, Берфорд [Burford, 1988] впервые сообщил о проходке тоннеля над существующим тоннелем метро, который за 27 лет поднялся в сумме на 50 мм; Чан и др. [Chang et al., 2001] проанализировали повреждения конструкций тоннеля метро в г. Тайбэе из-за выемки грунта при строительстве соседнего котлована. Поэтому очень важно понимать характеристики деформаций и распределение внутренних усилий в существующих тоннелях метро во время проведения поблизости земляных работ [Liu Siqin et al., 2009].

В отношении деформаций существующих тоннелей из-за соседних земляных работ было выполнено множество исследований. Например, Чжан Цзюньфэн и др. [Zhang Junfeng et al.] для анализа деформаций грунта, вызванных разгрузкой при откопке котлована, использовали решение задачи Буссинеска, рассмотрели пространственно-временные эффекты деформаций слабого грунта и предложили метод расчета для прогнозирования смещения тоннеля вверх. Хуан Хунвэй и др. [Huang Hongwei et al., 2012] при проектировании котлована под фундамент Шанхайской набережной выполнили конечноэлементное моделирование и проанализировали закономерности деформаций соседнего тоннеля при различных мерах укрепления.

Результаты указанных выше исследований в основном были получены для типичных территорий со слабым грунтом, таких как в г. Шанхае, но следует отметить, что для других геологических условий решения аналогичных проблем недостаточно.

В данной работе [1] изучаются закономерности деформирования существующего тоннеля метро, проходящего наискось под строящимся в указанных

типичных условиях котлованом (близко к его дну), а также анализируются эффекты защитных мер по укреплению грунта. Затем эффекты укрепления верифицируются с помощью данных полевого мониторинга.

#### УСЛОВИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ►

Общее расстояние между порталами рассматриваемого тоннеля линии R3 метро г. Цзинаня составляет 1033,5 м. Левая линия этого двойного тоннеля проходит наискось под южным участком строящегося котлована (в виде объемной траншеи) для ленточного фундамента. Угол между направлениями продольных осей котлована и тоннеля равен 15°, а минимальное расстояние между дном котлована и верхом свода тоннеля составляет всего 1,8 м.

Площадка строительства котлована расположена на холмистой территории, на которой слои грунтов включают (сверху вниз): насыпной грунт; гравелистый грунт; выветрелый известняк.

Глубина котлована составляет около 9,4 м, ширина – примерно 12,85 м. Для обеспечения устойчивости котлована выбраны наклонные борта крутизной 1:0,5 и анкерные болты для крепления бортов в грунте. Длина анкерных бол-

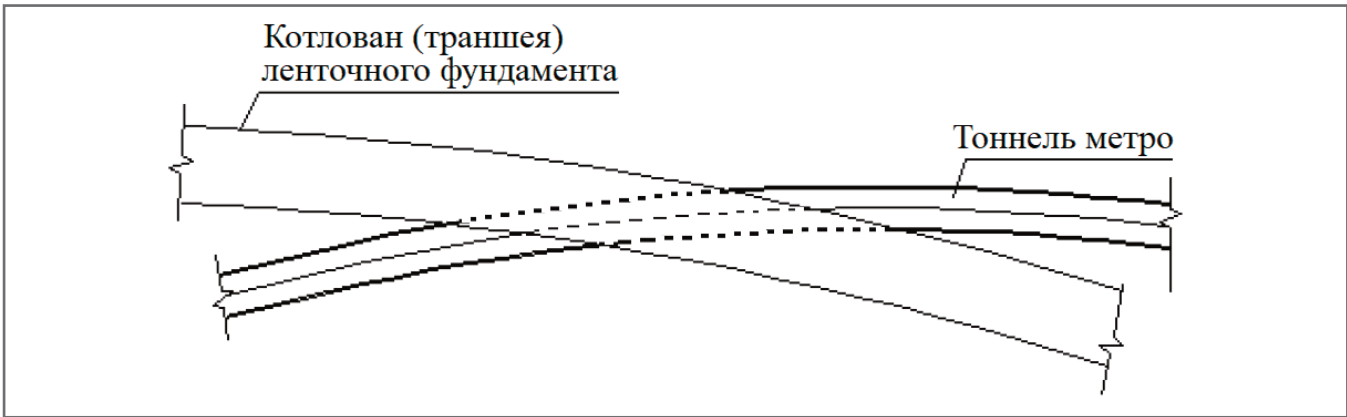


Рис. 1. Схема расположения тоннеля метро и котлована друг относительно друга в плане

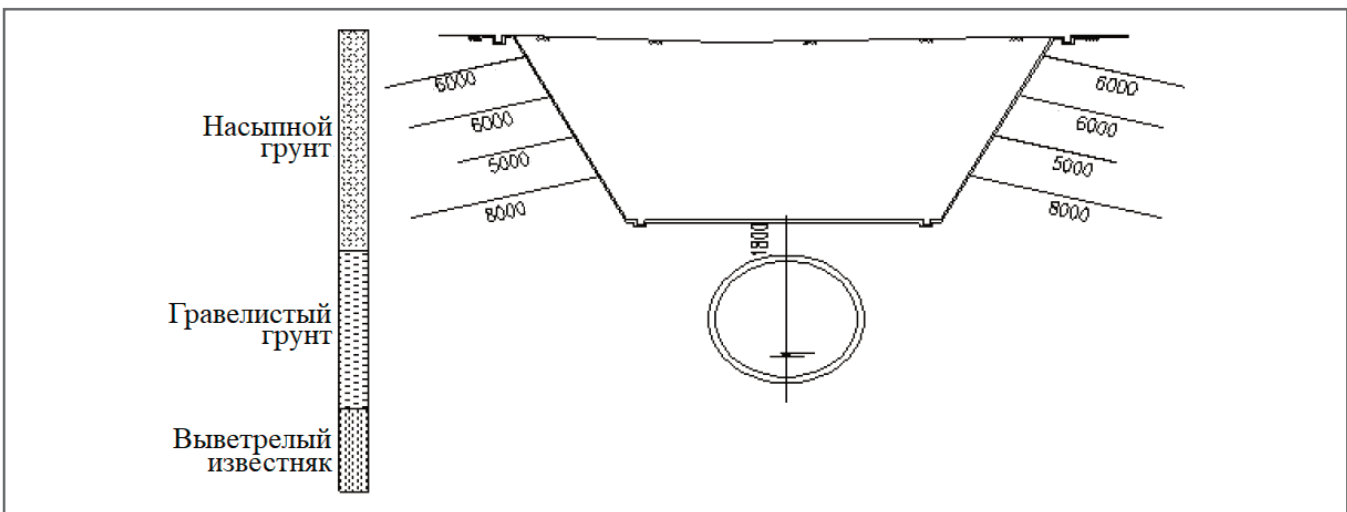


Рис. 2. Схема расположения тоннеля метро и котлована на вертикальном поперечном разрезе. Длина анкерных болтов и расстояние между дном котлована и верхом тоннеля указаны в миллиметрах

Таблица. Основные физико-механические характеристики грунтов, слагающих исследуемую площадку

Грунт (сверху вниз)	Толщина слоя, м	Удельный вес $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	Модуль объемной деформации $E_s$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$ (эмпирич.)	Удельное сцепление $c$ , кПа	Угол внутр. трения $\phi$ , °
Насыпной грунт	11	18,9	-	-	26	16,3
Гравелистый грунт	7,9	21,0	4,8	0,18	27	15
Выветрелый известняк	17,5	26,9	7,5	0,21	48	20

тов варьирует от 5 до 8 м, расстояние между ними по горизонтали составляет 1,5 м, по вертикали – 2 м.

Расположение котлована и тоннеля метро относительно друг друга в плане показано на рисунке 1, на вертикальном поперечном разрезе – на рисунке 2. Основные физико-механические характеристики грунтов приведены в таблице 1.

#### АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМАЦИЙ ТОННЕЛЯ, ВЫЗВАННЫХ ОТКОПКОЙ НАД НИМ КОТЛОВАНА ▶

До создания котлована взаимодействие между существующим тоннелем и вмещающим его грунтом было стабильным, то есть тоннель находился в состоянии равновесия сил (рис. 3, а). При откопке котлована над тоннелем

поля смещений и внутренних усилий в грунтовом массиве изменятся и разгрузка из-за выемки грунта будет передана тоннелю. На рисунке 3, б показано, что вертикальная разгрузка вызывает смещение вверх грунта под котлованом с выпором его дна и поднятие находящегося под котлованом тоннеля за счет уменьшения давления на него от вышележащего грунта. А горизонтальные на-

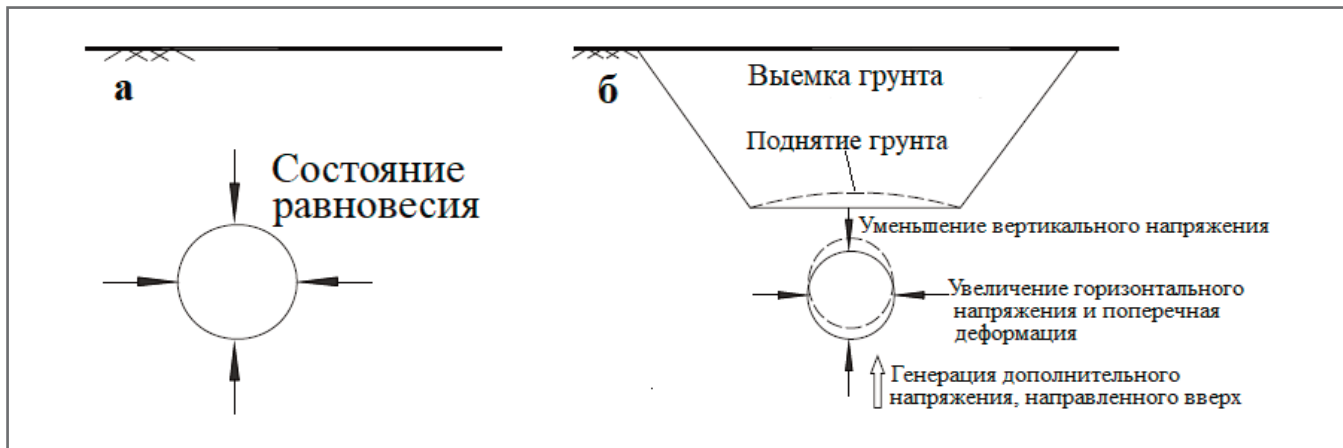


Рис. 3. Состояние равновесия напряжений во вмещающем тоннель грунте до создания сверху котлована (а); дисбаланс напряжений после откопки котлована над тоннелем (б)

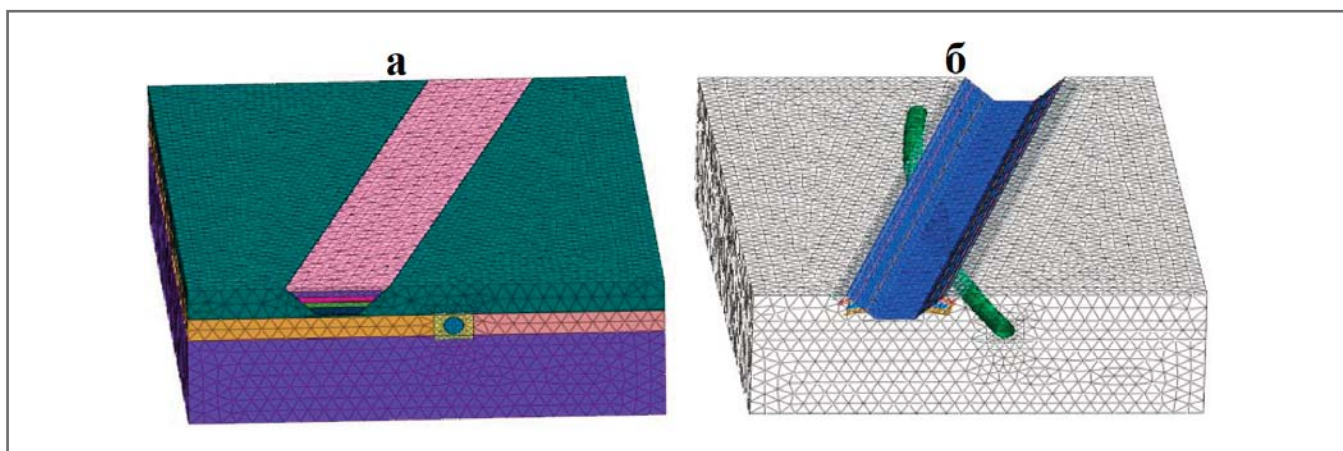


Рис. 4. Численная модель: а – до создания котлована выше существующего тоннеля метро; б – после откопки котлована

пряжения с обеих сторон этого тоннеля, наоборот, увеличиваются из-за сжимающего действия грунта. В результате из-за горизонтального сжатия и вертикального растяжения изначально круглое поперечное сечение тоннеля принимает вертикально вытянутую эллиптическую форму (см. рис. 3, б).

### ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ►

#### Расчетная модель и основные допущения ►

В этой работе для расширенного численного анализа использовалась конечно-элементная программа midas GTS NX ([midasoft.ru/products/midas-gts-nx/?utm\\_source=site&utm\\_medium=geo-info&utm\\_content=article-02-2023](http://midasoft.ru/products/midas-gts-nx/?utm_source=site&utm_medium=geo-info&utm_content=article-02-2023). – Ped.). Размеры полученной компьютерной модели составили 250 м x 150 м x 50 м (соответственно длина, ширина, высота). Эта модель показана на рисунке 4. Для дна модели было принято ограничение горизонтальных и вертикальных смещений, для ее боков – ограничение горизонтальных смещений, а верх был задан как сво-

бодная поверхность без каких-либо ограничений.

Для удобства анализа были сделаны следующие допущения.

1. Для моделирования грунта использовались объемные конечные элементы, для анкерных болтов – встроенные стержневые элементы, для обделки тоннеля – пластинчатые элементы. Все это согласовывалось с принятием комплексной геомеханической (конститутивной) модели Мора – Кулона.

2. Было принято, что один и тот же слой грунта является однородным, непрерывным (без нарушений сплошности) и изотропным.

3. Не учитывалось влияние подземных вод.

#### Моделирование условий строительства ►

Перед откопкой котлована моделировались первоначальные напряжения в грунте *in-situ*, затем моделировалась проходка тоннеля метро (в реальности он был пройден щитовым способом). После этого имитировалась откопка

котлована над тоннелем. Создание котлована производилось по принципу послойной выемки грунта с соответствующим поэтапным креплением бортов, то есть в следующей последовательности сверху вниз: выемка первого слоя грунта → установка первого яруса анкерных болтов → выемка второго слоя грунта → установка второго яруса анкерных болтов → выемка третьего слоя грунта → установка третьего яруса анкерных болтов → выемка четвертого слоя грунта → установка четвертого яруса анкерных болтов → выемка грунта до запроектированного уровня дна котлована.

#### Результаты численного моделирования ►

На рисунке 5 показаны смоделированные вертикальные смещения окружающего котлован грунта и существующего под ним тоннеля. Видно, что на вмещающий котлован грунтовый массив влияет разгрузка после выемки грунта и происходит выпор дна котло-



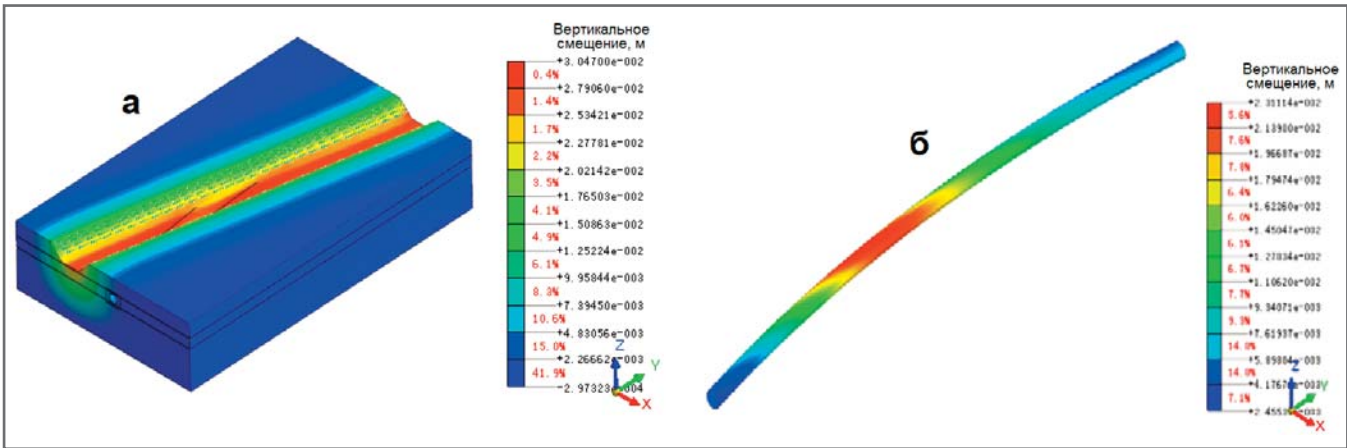


Рис. 5. Вертикальные смещения после откопки котлована: а – для окружающего котлован грунта; б – для существующего тоннеля под котлованом

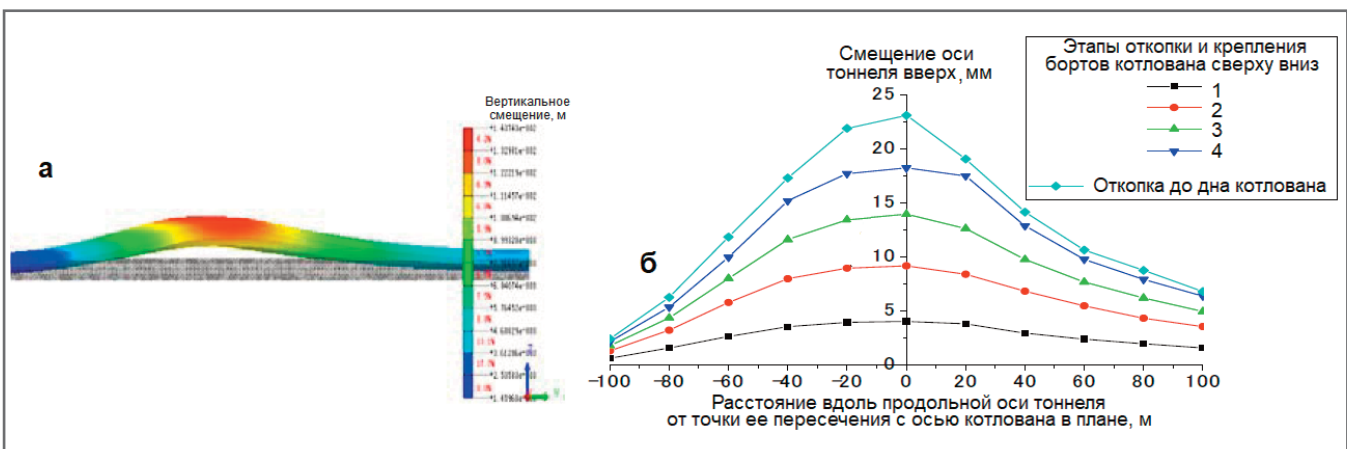


Рис. 6. Сопоставление положений тоннеля до и после его деформирования и его вертикальные смещения (а); смещения тоннеля вверх на разных этапах создания над ним котлована (б)

вана с максимальным смещением вверх 30,47 мм как раз над пересечением котлована с тоннелем в плане. Тоннель также испытывает вертикальные смещения с максимальным подъемом на 23,11 мм непосредственно под котлованом (это не соответствует допустимой деформации, которая составляет 20 мм). Анализ показал, что деформации котлована и тоннеля согласуются друг с другом, а максимальные вертикальные смещения приходятся на вертикальный разрез, проходящий через их пересечение в плане.

На рисунке 6 сопоставлены положения тоннеля до и после его деформирования. На рисунке 7 показаны графики изменений вертикальных смещений тоннеля (его оси) вверх на разных этапах создания котлована. Из графиков видно, что с увеличением глубины выемки грунта из котлована подъем тоннеля под ним постепенно увеличивается, причем максимальное вертикальное смещение происходит непосредственно под котлованом. Подъем тоннеля постепенно уменьшается примерно симмет-

рично в обе стороны от точки пересечения осей тоннеля и котлована в плане. При полной проектной откопке котлована вертикальное смещение тоннеля превышает допустимое.

### Исследование защитных мер для обеспечения безопасности тоннеля при строительстве котлована ▶

Из приведенного выше анализа видно, что без принятия защитных мер максимальная величина подъема тоннеля составляет 23,11 мм, что превышает допустимую деформацию 20 мм в соответствии с китайским национальным стандартом по мониторинговым измерениям в сфере городского железнодорожного транспорта GB 50911-2013. Чтобы обеспечить безопасность существующего тоннеля, необходимо вовремя принять защитные меры, такие как приложение нагрузки на его дно (величиной 70 кПа) и укрепление вмещающего его грунта путем инъекционной цементации. Поперечное сечение тре-

бующего усиления грунта вокруг тоннеля показано на рисунке 7.

На рисунке 8 показаны вертикальные смещения тоннеля после откопки котлована в случае принятия защитных мер. Видно, что максимальный подъем тоннеля непосредственно под дном котлована благодаря защитным мерам сильно уменьшился – с 23,11 мм до 4,86 мм.

На рисунке 9 сопоставлены максимальные вертикальные смещения тоннеля после откопки котлована при принятии защитных мер и без них. Из графиков видно, что независимо от принятия защитных мер общие тенденции к подъему тоннеля в процессе создания котлована согласуются друг с другом. Но все же в результате укрепления грунта вокруг тоннеля и приложения нагрузки на дно тоннеля его максимальный подъем после откопки котлована уменьшился с 14,37 мм до 4,86 мм, то есть эффект защитных мер очевиден и они могут значительно увеличить безопасность тоннеля метро в процессе строительства над ним котлована.

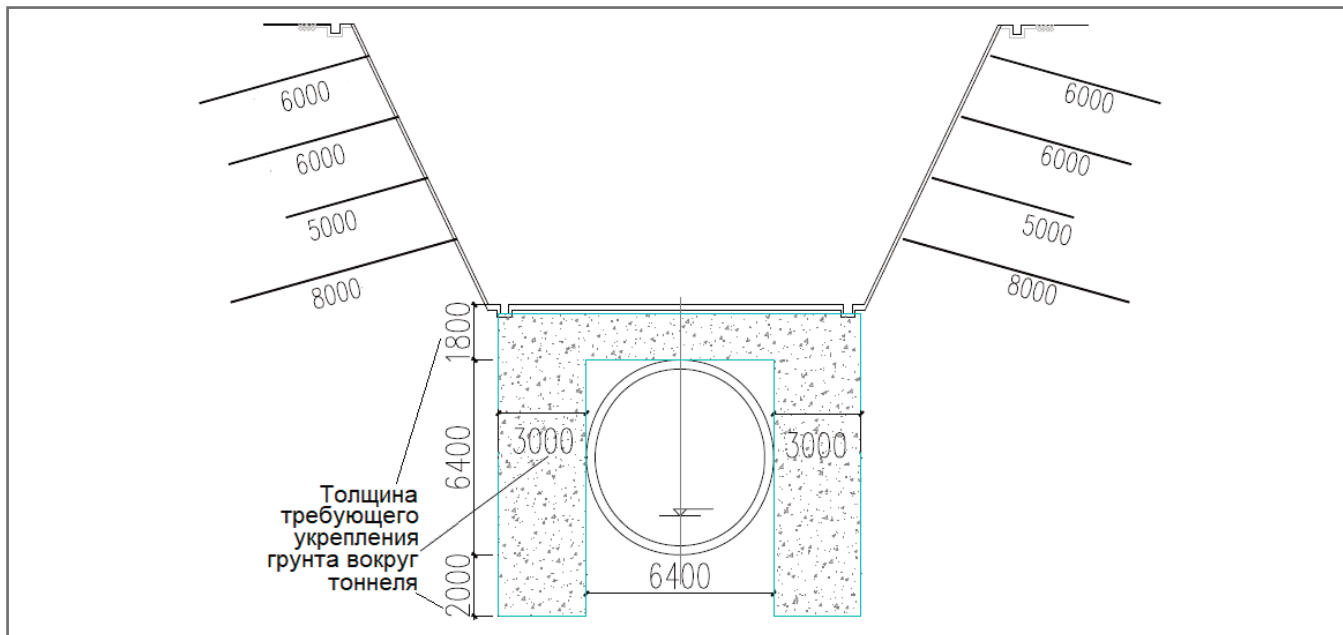


Рис. 7. Поперечное сечение котлована, тоннеля и грунта, требующего укрепления. Размеры указаны в миллиметрах

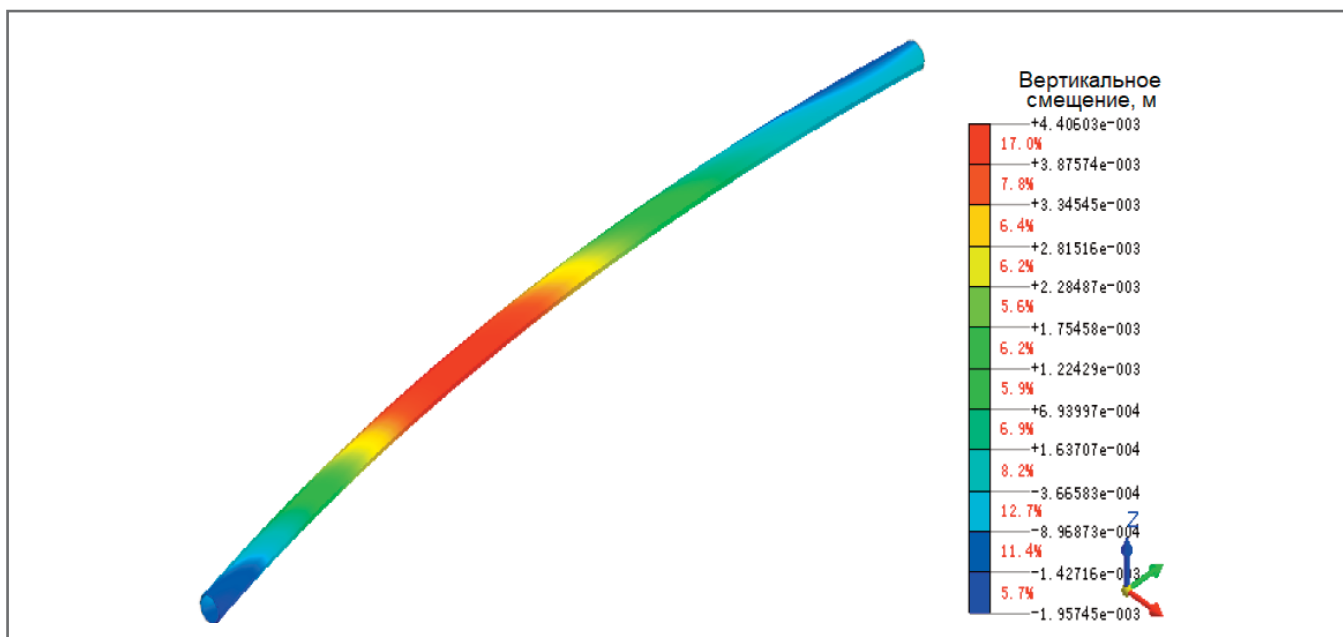


Рис. 8. Вертикальные смещения тоннеля после откопки котлована в случае принятия защитных мер

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА ПОВЕДЕНИЯ ТОННЕЛЯ ВО ВРЕМЯ СТРОИТЕЛЬСТВА НАД НИМ КОТЛОВАНА

Чтобы обеспечить безопасность существующего тоннеля метро во время строительства котлована, для этого тоннеля в зоне его прохождения под котлованом проводился мониторинг ключевых параметров (в случае принятия описанных ранее защитных мер. – *Ред.*).

На рисунке 10 сопоставлены результаты численного моделирования и мони-

торинговых измерений вертикальных смещений свода тоннеля и изменений просвета тоннеля по горизонтали. Из рисунка 10, а видно, что общие тенденции подъема тоннеля в процессе углубления котлована неплохо согласовывались друг с другом. Когда котлован был выкопан до дна, модельный подъем свода тоннеля составил 4,86 мм, а измеренный – 3,04 мм, то есть разница оказалась небольшой. Из рисунка 10, б видно, что просвет тоннеля по горизонтали в обоих случаях менялся относительно мало, но измеренные величины изменений колебались, не показывая очевидной зако-

номерности и не согласуясь с результатами численного моделирования.

### ВЫВОДЫ

1. Поле смещений исходного грунтового массива изменяется по мере строительства в нем котлована. При этом происходит вертикальное смещение вверх существующего под котлованом тоннеля (пересекающего его наискось в плане). Наибольшее смещение происходит непосредственно под дном котлована.

2. Расчеты с помощью численного моделирования показывают, что такие защитные меры, как приложение на-

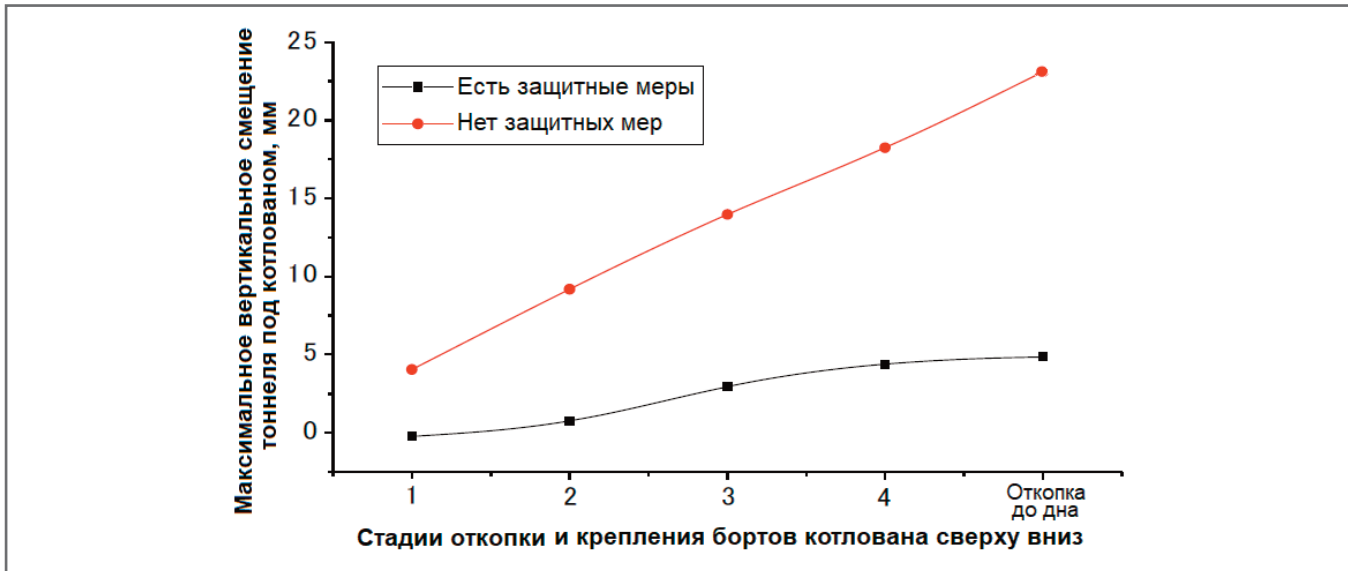


Рис. 9. Максимальные вертикальные смещения тоннеля после откопки котлована при принятии защитных мер и без них

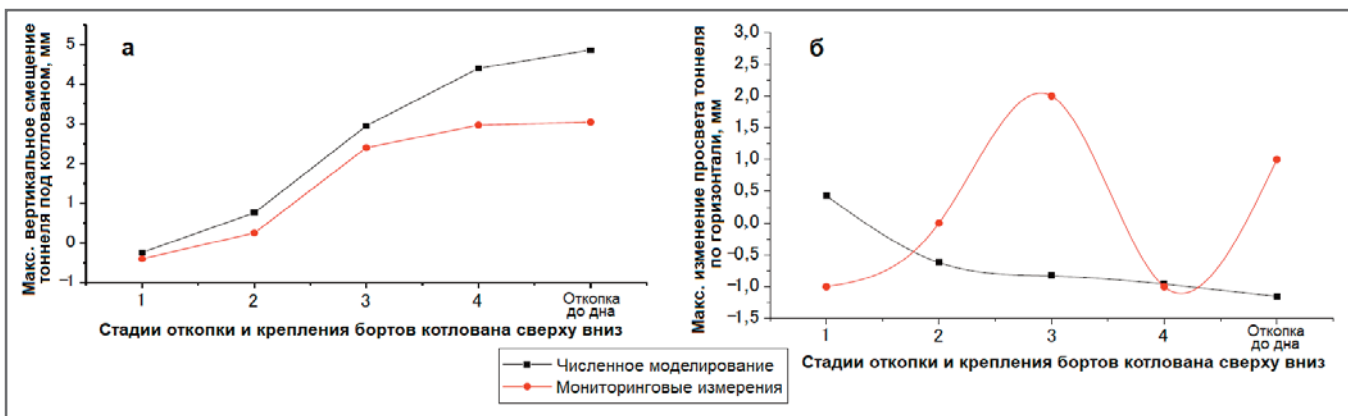


Рис. 10. Сопоставление результатов численного моделирования и мониторинговых измерений: а – для максимальных вертикальных смещений свода тоннеля; б – для максимальных изменений просвета тоннеля по горизонтали

грузки на дно тоннеля и укрепление грунта вокруг тоннеля, могут эффективно уменьшить его подъем в процессе строительства котлована и значительно снизить риски.

3. Результаты численного моделирования и реальных измерений показывают, что горизонтальные смещения тоннеля малы и откопка котлована мало на них влияет. Мониторинговые данные по горизонтальным смещениям тоннеля

являются неупорядоченными и не показывают очевидных закономерностей деформирования.

4. Для решения сложных геотехнических задач численные расчеты (например, в программе midas GTS NX ([midasoft.ru/products/midas-gts-nx/?utm\\_source=site&utm\\_medium=geo-info&utm\\_content=article-02-2023](http://midasoft.ru/products/midas-gts-nx/?utm_source=site&utm_medium=geo-info&utm_content=article-02-2023)), – *Ред.*) могут эффективно предсказать реальные проблемы, связанные с дефор-

мациями, и дать некоторые ориентиры для проектирования и строительства. **и**

*Работа выполнена при поддержке Ключевого научно-исследовательского проекта провинции Шаньдун № 2018GSF120010, Цзинаньского научно-технического проекта № 201705015, Проекта планирования № KY011 Департамента строительства провинции Шаньдун*

## ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

1. Liu Chen Yang, Liu Jun Yan, Wu Yong Zhen, Liu Yong. Analysis on the influence of excavation close-range foundation pit on existing tunnel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 423. 4th International Conference on Applied Materials and Manufacturing Technology, 25–27 May 2018, Nanchang, China. P. 012026. doi:10.1088/1757-899X/423/1/012026.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОГО ДОКЛАДА [1] ►

1. Huang Hongwei, Huang Xu, Schweiger F. Helmut. Numerical analysis of the influence of deep excavation on underneath existing road tunnel // China Civil Engineering Journal. 2012. Vol. 3. P. 182–189.
2. Burford D. Heave of tunnels beneath the shell center, London, 1959–1986 // Geotechnique. 1988. Vol. 38. № 1. P. 135–137.

3. Chang C. T., Sun C. W., Duann S. W., et al. Response of a taipei rapid transit system (TRTS) tunnel to adjacent excavation // Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research. 2001. Vol. 16. № 3. P. 151–158.
4. Feng Aijun, Lu Fang. Statistics of urban rail transit in mainland China, 2017 // Tunnel Construction (Chinese – English). 2018. Vol. 38. № 3. P. 514–517.
5. Liu Siqin, Yu Xiaolin, Yan Quansheng. Numerical simulation analysis for influence of overhead excavation on existing MTR // Guangdong Architecture Civil Engineering. 2009. Vol. 6. P. 19–20.
6. Zhang Junfeng, Wang Jianhua, Wong Qipinf. Nonlinear rheological analysis on tunnel displacement induced by adjacent excavation in soft clay // Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering. 2012. Vol. 34. № 3. P. 10–15.

#### SOURCE FOR THE TRANSLATION ►

1. Liu Chen Yang, Liu Jun Yan, Wu Yong Zhen, Liu Yong. Analysis on the influence of excavation close-range foundation pit on existing tunnel. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 423. 4th International Conference on Applied Materials and Manufacturing Technology, 25–27 May 2018, Nanchang, China. P. 012026. doi:10.1088/1757-899X/423/1/012026.

#### REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED REPORT [1] ►

1. Huang Hongwei, Huang Xu, Schweiger F. Helmut. Numerical analysis of the influence of deep excavation on underneath existing road tunnel. China Civil Engineering Journal, 2012, 3: 182–189.
2. Burford D. Heave of tunnels beneath the shell center, London, 1959–1986. Geotechnique, 1988, 38 (1): 135–137.
3. Chang C T, Sun C W, Duann S W, et al. Response of a taipei rapid transit system (TRTS) tunnel to adjacent excavation. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2001, 16 (3): 151–158.
4. Feng Aijun, Lu Fang. Statistics of urban rail transit in mainland China, 2017. Tunnel Construction (Chinese – English), 2018, 38 (3): 514–517.
5. Liu Siqin, Yu Xiaolin, Yan Quansheng. Numerical simulation analysis for influence of overhead excavation on existing MTR. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2009, 6: 19–20.
6. Zhang Junfeng, Wang Jianhua, Wong Qipinf. Nonlinear rheological analysis on tunnel displacement induced by adjacent excavation in soft clay. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34 (3): 10–15.

Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал  
**ГеоИнфо**

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>





# НОВЫЙ



## GeoStab

расчет  
УСТОЙЧИВОСТИ  
ОТКОСОВ



Malin|n soft

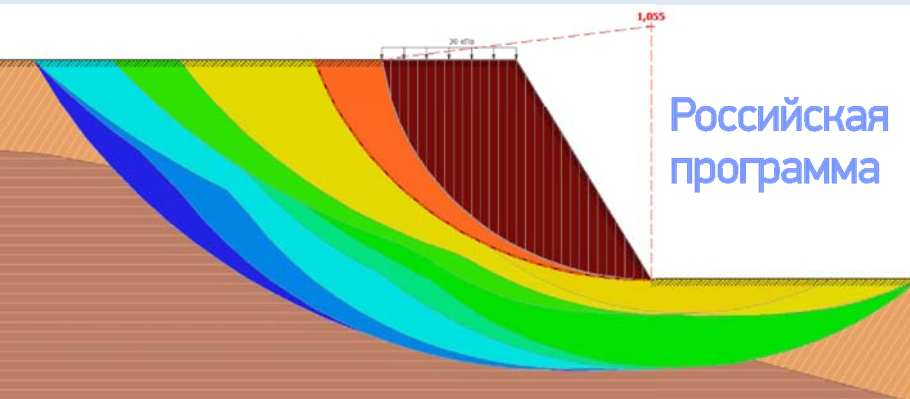
этапность проекта

новые возможности  
анализа

3D визуализатор

экспорт в DXF

новый дизайн  
в темном и светлом  
оформлении



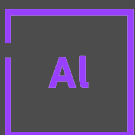
(342) 204-02-08  
[info@malininsoft.ru](mailto:info@malininsoft.ru)  
[www.malininsoft.ru](http://www.malininsoft.ru)



Ограждение  
котлованов  
**GeoWall**



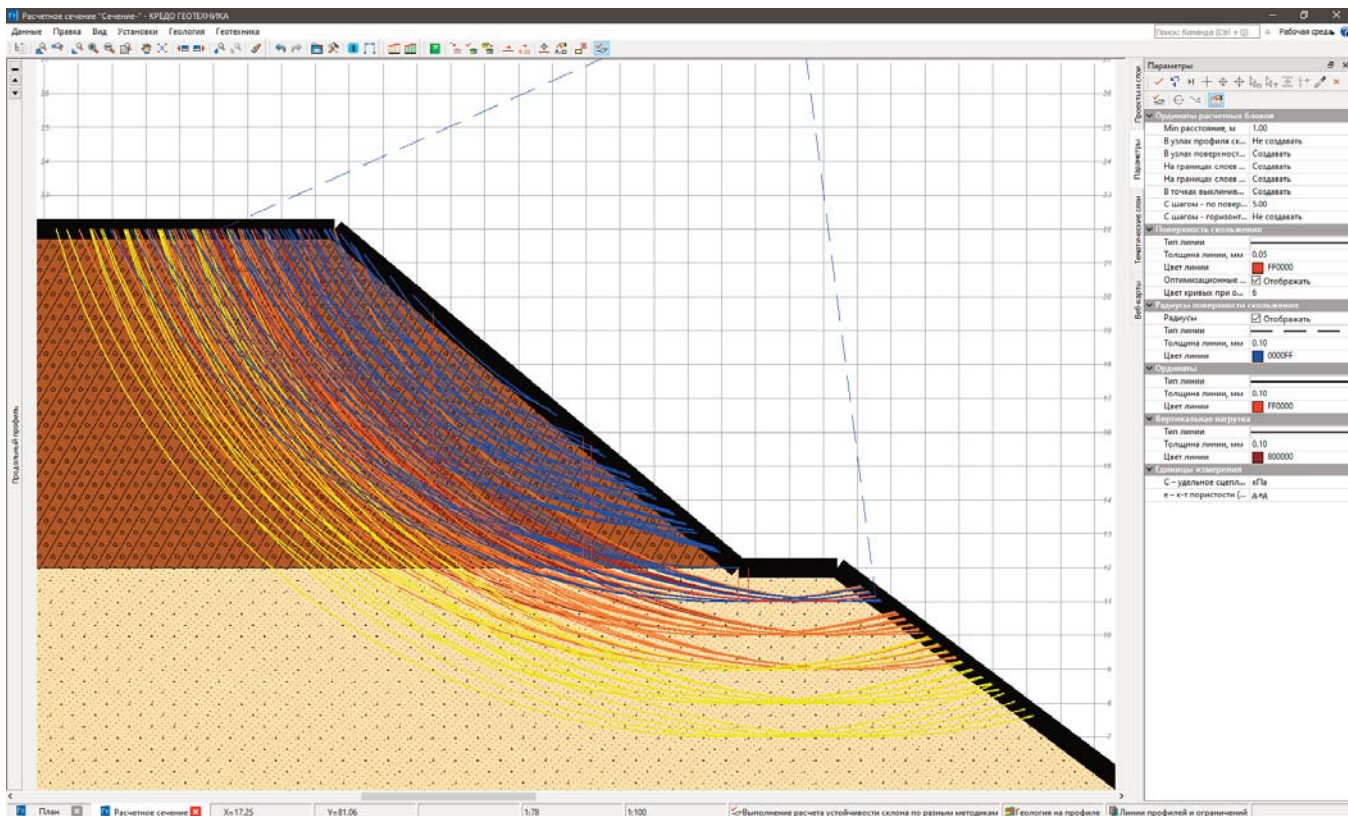
Склоны  
и откосы  
**GeoStab**



2D  
МКЭ  
**Alterra**



Свайно-плитный  
фундамент  
**GeoPlate**



## «КРЕДО ГЕОТЕХНИКА» – НОВАЯ ПРОГРАММА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНЕЙКИ «КРЕДО»

Информационная статья

Поступила в редакцию 30.12.2022. Принята к публикации 21.02.2023.

© Независимый электронный журнал «ГеоИнфо», 2023

**КОЛЕДА С.А.**

ООО «КОМПАНИЯ «КРЕДО-ДИАЛОГ»,  
Москва, Россия,  
moscow@credo-dialogue.com  
Адрес: Россия, 105613, г. Москва,  
Измайловское шоссе, д. 71, стр. 8

### АННОТАЦИЯ

В статье рассказывается о возможностях, которые предлагает компьютерная программа «КРЕДО ГЕОТЕХНИКА», разработанная в компании «КРЕДО-ДИАЛОГ». Она предназначена для определения устойчивости природного склона или откоса на основе физико-механических характеристик грунтов. Исходными данными для выполнения в ней расчетов являются цифровая топографическая основа и модель геологического строения исследуемого участка.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

компьютерная программа «КРЕДО ГЕОТЕХНИКА»; устойчивость склона; устойчивость откоса; коэффициент устойчивости; исходные данные; физико-механические характеристики грунтов; цифровая топографическая основа; модель геологического строения.

### ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Коледа С.А. «КРЕДО ГЕОТЕХНИКА» – новая программа геологической линейки «КРЕДО» // Геоинфо. 2023, № 1, S. 82–84

# “CREDO GEOTECHNICS” IS A NEW PROGRAM OF THE “CREDO” GEOLOGICAL LINE

Informational paper

Received 30.12.2022. Accepted 21.02.2023.

© Independent electronic journal “GeoInfo”, 2023

**SERGEY A. KOLEDA**

CREDO-DIALOGUE COMPANY LLC,

Moscow, Russia,

moscow@credo-dialogue.com

Address: 71 Izmaylovskoye highway,

bld. 8, Moscow, 105613, Russia

## ABSTRACT

The paper describes the possibilities of the “CREDO GEOTECHNICS” computer program developed by “CREDO-DIALOGUE” company. It is designed to determine the stability of a natural or artificial slope on the basis of the physical-mechanical characteristics of grounds. The initial data for performing calculations in this software are a digital topographic base and a model of the geological structure of the studied area.

## KEYWORDS:

“CREDO GEOTECHNICS” computer program; natural slope stability; artificial slope stability; stability coefficient; initial data; physical-mechanical characteristics of grounds; digital topographic base; geological structure model.

## FOR CITATION:

Koleda S.A. «KREDO GEOTEHNIKA» – novaya programma geologicheskoy lineyki «KREDO» [“CREDO GEOTECHNICS” is a new program of the “CREDO” geological line] // GeoInfo, 2023, № 1, S. 82–84

## Введение ▶

В нашем быстро меняющемся мире информационное моделирование все быстрее становится стандартом отрасли. Однако наличие полноценной информационной модели местности как результата инженерных изысканий не является самоцелью проектно-изыскательских работ. Любая модель – это средство, обеспечивающее информацией специалистов на следующем шаге жизненного цикла объекта капитального строительства. И чем более насыщенная модель создана, тем больше данных из нее можно получить при наличии соответствующего инструмента.

Один из таких инструментов – новый программный продукт «КРЕДО ГЕОТЕХНИКА». Эта программа предназначена для определения устойчивости природного склона или откоса на основе физико-механических характеристик грунтов. Исходными данными для выполнения в ней расчетов являются цифровая топографическая основа и модель геологического строения исследуемого участка. Состояние склона определяется расчетным коэффициентом устойчивости ( $K_{уст}$ ), определяемым по наиболее вероятной поверхности скольжения. Величина  $K_{уст}$  в зависимости от выбранного метода рассчитывается по соотношению удерживающих и сдвигающих сил (либо моментов), действующих на

отдельный блок грунта внутри призмы обрушения. Если расчетный  $K_{уст}$  превышает нормативный (определяемый как отношение коэффициента надежности и коэффициента сочетания нагрузок к коэффициенту условий работы), откос считается устойчивым.

Строительство зданий и сооружений в сложных условиях приводит к тому, что задача расчета устойчивости откосов и склонов постоянно возникает в инженерной практике. Несмотря на относительную простоту заложенных инженерных методов расчета, программа позволяет быстро и в любом сечении сформированной сводной информационной модели местности оценить параметры устойчивости различных земляных и подземных сооружений – склонов, откосов насыпей, бортов котлованов.

Поскольку программа «КРЕДО ГЕОТЕХНИКА» реализована на уже хорошо знакомой пользователям информационно-инструментальной платформе «КРЕДО 3D», у пользователя не возникнет никаких сложностей ни с интерфейсом программного обеспечения, ни с использованием исходных данных, подготовленных в других программных продуктах (данных по поверхности рельефа, модели геологии).

Вся функциональность расчета сосредоточена в проекте типа «План Гео-

технический». После формирования проекта пользователь может построить линию расчетного сечения в любом месте модели и, перейдя в ее профиль, увидеть сразу и разрез поверхности рельефа, и геологическое строение.

Для вычисления параметров устойчивости нужно определить линию поверхности скольжения – круглоцилиндрическую или полигональную. Поверхность скольжения – это условная поверхность внутри массива грунта, по которой происходит сдвиг при достижении состояния предельного равновесия. Линию сечения поверхности скольжения пользователь может сформировать либо «вручную», либо используя алгоритм оптимизации. При выборе второго варианта требуется указать первоначальную геометрию поверхности скольжения, размер матрицы вариантов и метод определения коэффициента устойчивости. Система анализирует сформированную матрицу и выбирает наилучший вариант.

Кроме определения поверхности скольжения пользователь настраивает параметры разбивки выделенной призмы грунта на вертикальные блоки, определяет единицы измерения и метод расчета. В рассматриваемой системе реализованы варианты определения коэффициента устойчивости, которые будут рассмотрены далее. При этом бу-

дуг использоваться следующие обозначения:  $G_i$  – вес грунта в  $i$ -м отсеке (блоке) призмы обрушения;  $C_i$  – удельное сцепление грунта в  $i$ -м блоке;  $\varphi_i$  – угол внутреннего трения в  $i$ -м блоке;  $L_i$  – длина линии поверхности скольжения в  $i$ -м блоке,  $\alpha_i$  – угол наклона поверхности скольжения в центре  $i$ -го блока.

### Метод Феллениуса / Петтерсона ▶

Метод Феллениуса / Петтерсона – это один из самых простых методов отсеков с учетом общего уравнения моментов равновесия вокруг центра круговой поверхности скольжения. Нормальные и сдвиговые силы между отсеками не учитываются. Коэффициент устойчивости определяется следующим образом:

$$K_{уст} = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i * \cos \alpha_i * \text{tg} \varphi_i + C_i l_i)}{\sum_{i=1}^n G_i * \sin \alpha_i} \quad (1)$$

### Метод Бишопа ▶

Метод Бишопа учитывает равновесие моментов и вертикальных сил. Коэффициент устойчивости вычисляется последовательной итерацией уравнения:

$$K_{уст} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(G_i * \text{tg} \varphi_i + C_i B_i)}{\cos \alpha_i + \frac{\text{tg} \varphi_i * \sin \alpha_i}{K_{уст}}}}{\sum_{i=1}^n G_i * \sin \alpha_i} \quad (2)$$

### Метод Янбу ▶

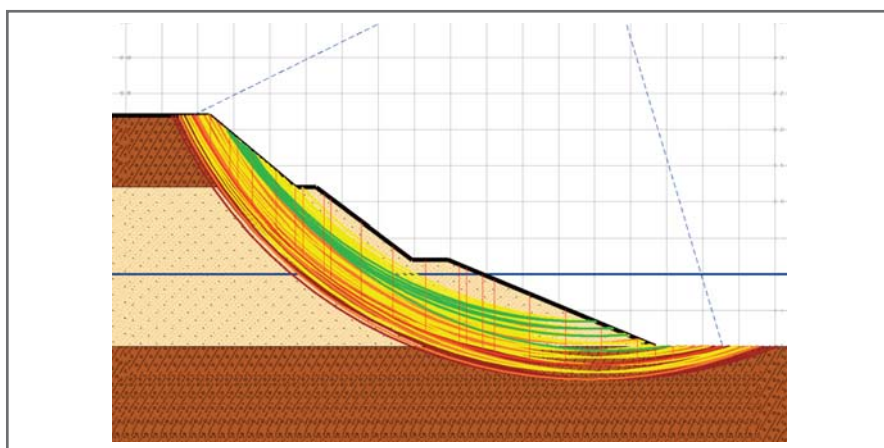
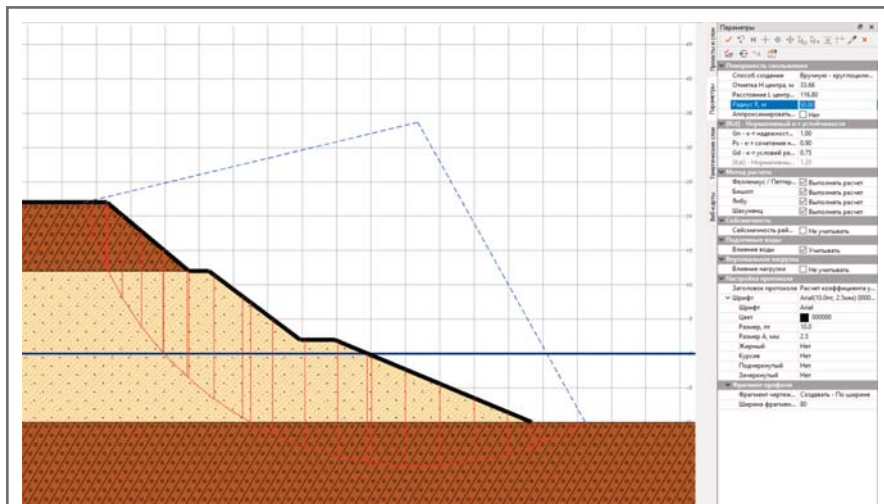
При использовании метода Янбу удовлетворяется условие равновесия сдвигающих сил, при этом не удовлетворяется условие равновесия моментов. Расчет проводится по формуле:

$$K_{уст} = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i * \text{tg} \varphi_i + C_i l_i * \cos \alpha_i) \frac{(\sec^2 \alpha_i)}{1 + \frac{\text{tg} \alpha_i * \text{tg} \varphi_i}{K_{уст}}}}{\sum_{i=1}^n G_i * \text{tg} \alpha_i} \quad (3)$$

### Метод Шахунянца ▶

Метод Шахунянца – это общий метод отсеков предельного равновесия, основанный на удовлетворении условия равновесия сил на отдельных блоках. Блоки образуются в результате разбивки области над поверхностью скольжения плоскостями сечения. Коэффициент устойчивости определяется следующим образом:

$$K_{уст} = \frac{\sum_{i=1}^n [(G_i * \cos \alpha_i + C_i l_i + (G_i * \sin \alpha_i)_{\text{дн}}) \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}]}{\sum_{i=1}^n (G_i * \sin \alpha_i)_{\text{св}} * \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}} \quad (4)$$



### Заключение ▶

Как видно из рассказанного в статье, для всех приведенных в ней методов основой для расчета являются геометрия склона и механические характеристики грунтов, составляющих склон, то есть информация, которая уже определена в любом месте информационной модели с помощью данных о поверхности рельефа и геологическом строении.

В качестве дополнительных факторов, влияющих на определение коэффициента устойчивости в программе «КРЕДО ГЕОТЕХНИКА», можно учесть:

- горизонты подземных вод;
- коэффициент динамической сейсмичности;
- дополнительную нагрузку.

Все исходные данные для расчета можно либо получить из предваритель-

но сформированной модели, либо задать «вручную» непосредственно в программе. Так, геометрию склона можно загрузить из файлов DXF/DWG или смоделировать прямо в окне профиля расчетного сечения. Исходную информацию о геологическом строении также можно либо получить из предварительно сформированной трехмерной геологической модели, либо задать непосредственно для сечения.

Команда разработчиков надеется, что функциональные возможности программы «КРЕДО ГЕОТЕХНИКА» в сочетании с простым и удобным интерфейсом позволят пользователям использовать ее как самостоятельный программный продукт для выполнения локальных инженерных расчетов или в связке с остальными системами комплекса «КРЕДО» при инженерно-геологических изысканиях. **И**

### Информация об авторе

#### КОЛЕДА СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

Руководитель отдела внедрения информационных технологий ООО «КОМПАНИЯ «КРЕДО-ДИАЛОГ», Москва, Россия

### Information about the author

#### SERGEY A. KOLEDA

Head of Information Technology Implementation Department, CREDO-DIALOGUE COMPANY LLC, Moscow, Russia

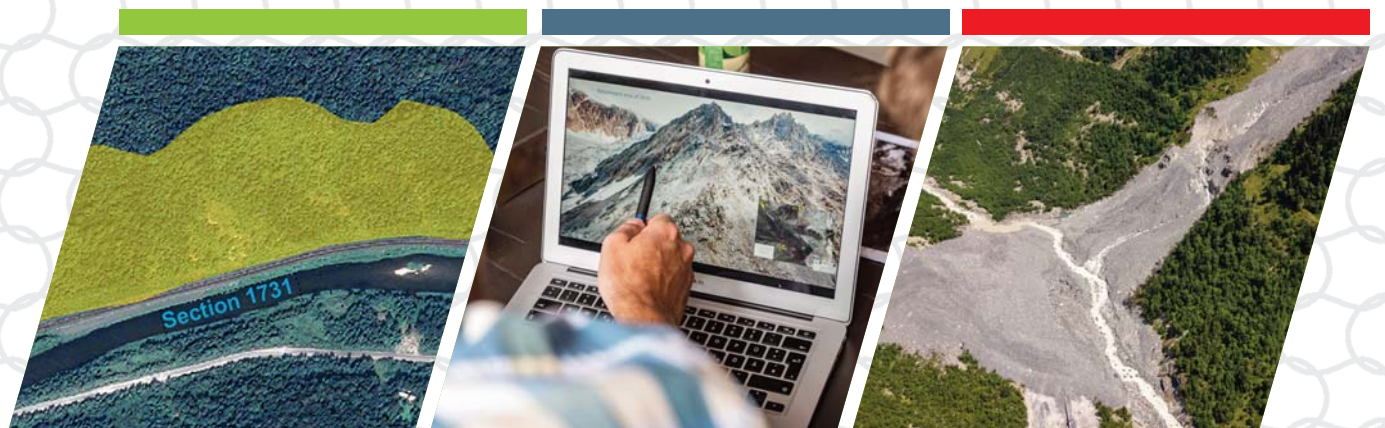


Mountain  
Risk  
Consultancy

# 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](mailto:office@mountain-risk.ru)  
<https://www.mountain-risk.ru>





## ИВАН КОРОЛЁВ: КУЛЬТУРА БЕРЕЖНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ФОРМИРУЕТСЯ НЕ ЗА ОДИН ГОД

Прошедший 2022 год для всех в нашей стране стал не просто сложным, а настоящим годом-вызовом. Задачи, которые он ставил перед людьми и перед бизнесом, часто были уникальными, но требовали при этом быстрых и адекватных решений. Мы поговорили об этом с Иваном Анатольевичем Королёвым – финансовым директором АО «Институт экологического проектирования и изысканий» (АО «ИЭПИ»).

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

авиапром; техническое перевооружение; новое строительство; инженерные изыскания; управление ледовой обстановкой; добывающие компании; экологический мониторинг; экологический контроль; обследование устьев законсервированных скважин; городское благоустройство; бережное природопользование.

# IVAN KOROLEV: THE CULTURE OF CAUTIOUS NATURE MANAGEMENT IS NOT FORMED IN ONE YEAR

The past year 2022 has become not just a difficult one for everyone in our country, but a real challenge year. The tasks that it set for people and for business were often unique, but at the same time they required quick and adequate solutions. We talked about this with Ivan Anatol'yevich Korolev, Financial Director of the JSC "IEPI" [JSC "Institute for Environmental Design and Surveys"].

## KEYWORDS:

aviation industry; technical re-equipment; new construction; engineering surveys; ice situation management; mining companies; environmental monitoring; environmental control; mothballed well mouth surveys; municipal improvements; cautious nature management.

**Ред.:** Иван Анатольевич, расскажите, пожалуйста о том, как складывается ситуация в мире и в российской экономике на изыскательском бизнесе?

**И.К.:** Конечно, внешнеполитические факторы сильно сказываются на нашей работе. Прежде всего, многие крупные компании, которые являются основными заказчиками в нашей отрасли, серьезно корректируют свои инвестиционные программы. Какие-то проекты замораживаются, по другим сокращается объем работ. Однако реализация многих проектов, имеющих в том числе и в нашем активе, находится на такой стадии, когда ее уже невозможно остановить. Кроме того, ряд отраслей, наоборот, получил развитие. В частности, много новых промышленных площадок появляется по линии авиапрома. Там и раньше велась активная деятельность по техническому перевооружению и новому строительству, а сейчас эти процессы активизировались и набрали колоссальный оборот благодаря в том числе амбициозным задачам, которые ставит государство. И, если честно, даже гордость берет за то, что мы, хотя и в небольшой части, но все же сопричастны к реализации таких важных задач.

Всех этих объемов хватает для того, чтобы развиваться и двигаться дальше. Хотя, конечно, ощущения стабильности пока очень не хватает.

**Ред.:** Какие работы выполняются АО «ИЭПИ» для задач авиапрома?

**И.К.:** В первую очередь, комплексные инженерные изыскания, археологи-



ческие исследования, обследования фундаментов. В общем, все, что необходимо для того, чтобы пройти государственную экспертизу и согласовать проектную документацию.

**Ред.:** А вообще, какой объем занимают в настоящее время инженерные изыскания в экономике ИЭПИ?

**И.К.:** Не очень большой. Мы коммерческая компания и вынуждены всегда двигаться вслед за рынком. Если брать наш масштаб деятельности в области изысканий, то могу констатировать, что рентабельность этих работ достаточно низкая: выполняемые работы требуют больших капитальных затрат, а возврат инвестиций хотя и обеспечивается, но на приемлемый уровень прибыли выйти получается не всегда.

Думаю, для таких организаций, как наша, ситуация сможет кардинально измениться только тогда, когда будет отменен конкурсный принцип выбора подрядчика по наименьшей стоимости.

**Ред.:** На какие работы в таком случае вы делаете упор?

**И.К.:** У нас довольно много направлений работы. Например, одно из важных – управление ледовой обстановкой. Нам удалось обеспечить нашим заказчикам самый длинный в нашей практике сезон буровых работ на шельфе – практически до самого Нового года. Наша задача – отслеживать опасные ледовые объекты, которые могут угрожать судам или буровым платформам, и своевременно предупреждать капитанов и Морскую спасательную службу,



корабли которой несут оперативное дежурство в северных морях.

Также мы активно развиваем работы по производственному экологическому мониторингу и контролю для нужд крупнейших российских добывающих компаний, в том числе в очень отдаленных регионах, например таких как Обская губа, Гыданский полуостров. Там всегда возникает много вопросов по природо-охранному блоку, которые требуют качественного и оперативного решения.

Еще одно направление нашей работы – экологический мониторинг в море, а также обследование устьев законсервированных скважин. В частности, мы совместно с нашим партнером, Морской спасательной службой, обследовали 11 скважин в Карском море и примерно столько же в Охотском.

Наконец, у нас есть собственное проектное бюро, которое занимается среди прочего городским благоустройством.

К настоящему моменту завершается масштабный проект в Чебоксарах, выполнен ряд интересных проектов в Москве. Например, по проекту наших специалистов прошло благоустройство квартала в Вешняках площадью 32 гектара. Были приведены в порядок все дворовые территории, территории пяти образовательных учреждений.

**Ред.:** Вы оказываете много услуг в сфере экологии. Можно ли утверждать, что за последние годы экологическая культура крупных компаний укрепилась и вышла на новый уровень?

**И.К.:** Культура бережного природопользования формируется не за один год. За те 15 лет, которые мы занимаемся этой тематикой, культура производства стала заметно выше, при этом гораздо лучше стали работать корпоративные стандарты. Однако, думаю, все же наличие специализирован-

ных надзорных органов и работа наших специалистов (или специалистов других профильных компаний) на объектах этому очень способствует. С таким комплексным подходом требования законодательства соблюдаются более четко.

**Ред.:** ИЭПИ также много занимается экологическим мониторингом и контролем. Наша страна уже год живет в условиях санкций, что заставило власти где-то пойти на уступки в части соблюдения экологических норм. Например, в части экологического класса автомобильных двигателей. Не происходит ли такого же и в более глобальных масштабах?

**И.К.:** Стоит вспомнить, что в 2020 году, когда был разгар пандемии ковида, многие промышленные предприятия снизили объем производства. В тот период во всем мире отмечалось глобальное снижение антропогенной нагрузки на экологию – выбросов в результате работы автотранспорта, промышленных предприятий и пр. Даже в Арктике на тех метеостанциях, где ведется непрерывный мониторинг уровня аэрозолей в атмосфере, например на острове Белый, получились очень неожиданные цифры, которые позволили сделать вывод, что глобальное антропогенное воздействие снизилось.

Новые глобальные изменения произошли после февраля 2022 года. После введения новых западных санкций многие энергетические компании из недружественных стран, занимающиеся разработкой электроэнергии, вернулись к использованию в большей степени угля, нежели более экологичных видов топлива. И это, конечно, огромный шаг назад с точки зрения заботы об экологии и предпринимавшихся ранее за рубежом попыток снизить количество вредных выбросов.

В России же, конечно, многие технологии поставляются с Запада, однако сокращение их поставок или отказы в сервисном обслуживании пока никак не проявились с точки зрения экологии. За исключением, может быть, упомянутых снижений требований к автомобильным двигателям. В остальном в стране функционирует современное оборудование, используется современный транспорт, а также налажено импортозамещение (или в крайнем случае параллельный импорт). Возможно, за 5–10 лет в тренде что-то может серьезно измениться, но пока говорить об этом рано. **И**





**TRUMER**  
Schutzbauten

[www.trumer.cc](http://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](mailto: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.



## ОЛЕГ ОЗМИДОВ: ФОРМУЛА РАСЧЕТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА БЕЗНАДЕЖНО УСТАРЕЛА

Геотехническая лаборатория АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ» нередко выступает с яркими заявлениями, подвергающими пересмотру традиционные представления, устоявшиеся в инженерной геологии и геотехнике. Вот и сегодня наш собеседник Олег Ростиславович Озmidов, президент и научный руководитель этой организации, рассказал о том, что всем известный модуль деформации  $E$  определяется с помощью модели Мора – Кулона без учета ряда особенностей грунтов. Следствие этого – огромные экономические потери на этапе строительства фундаментов зданий и сооружений. В связи с этим в лаборатории АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ» была разработана новая формула для расчета сопротивления грунта с целью получения достоверной величины упругого модуля деформации  $E$ , что может дать значительный экономический эффект.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

упругий модуль деформации; достоверное значение; линейная модель Мора – Кулона; нелинейные модели грунта; кривая нагружения; линейный участок; бытовое давление; расчетное сопротивление грунта; усовершенствованная формула.

# OLEG OZMIDOV: THE FORMULA FOR THE CALCULATED SOIL RESISTANCE IS HOPELESSLY OUTDATED

The geotechnical laboratory of JSC "MOSTDORGEOTREST" often makes bright statements reconsidering the traditional ideas that have been well established in engineering geology and geotechnics. So today, our interlocutor Oleg Rostislavovich Ozmidov (president and scientific director of this laboratory) said that the well-known deformation modulus ( $E$ ) is determined with the use of the Mohr-Coulomb model without taking into account a number of soil features. The consequences of this are huge economic losses when constructing the foundations of buildings and structures. In this regard, the laboratory of JSC "MOSTDORGEOTREST" has developed a new formula for calculating soil resistance in order to obtain a reliable value of the elastic deformation modulus ( $E$ ), which can give a significant economic effect.

## KEYWORDS:

elastic deformation modulus; true value; Mohr-Coulomb linear model; non-linear soil models; load curve; linear section; natural soil pressure; calculated soil resistance; improved formula.

**Ред.:** Олег Ростиславович, расскажите, пожалуйста, о новых разработках лаборатории АО «МОСТДОР-ГЕОТРЕСТ».

**О.О.:** В рамках курсов повышения квалификации, которые регулярно проводятся на базе нашей лаборатории, в частности для экспертов Мосгосэкспертизы, мы прорабатываем вопрос правильного определения модуля деформации  $E$ . Удивительно, но получить его должным образом специалисты до сих пор не научились.

В российских нормативных документах есть два модуля деформации –  $E$  и  $E_{50}$ . Вторая характеристика на самом деле является не модулем деформации, а параметром гиперболической зависимости между напряжением и деформацией в нелинейных моделях упрочняющегося грунта (HS) или упрочняющегося грунта при малых деформациях (HSS). А упругий модуль деформации  $E$  – это основной параметр линейной модели Мора – Кулона, которой специалисты пользуются уже более 100 лет. Определяют его, как выясняется, неверно. И это несмотря на огромное количество научных диссертаций по деформируемости грунтов и большое число соответствующих нормативных документов.

**Ред.:** Почему Вы так в этом уверены?

**О.О.:** В ГОСТ 12248.3-2016 сказано, что модуль  $E$  определяется для интер-

вала кривой девиаторного нагружения от бытового давления  $P=\rho gh$  до  $1,6\rho gh$ . Предполагается, что это линейный участок кривой напряжения. Однако фактически это не так. Этот участок может выйти в зону разрушения грунта или оказаться в зоне микродеформаций (microstrain), то есть за пределами строительных деформаций в рамках сжимаемой толщи. В результате модуль  $E$  не будет иметь ничего общего с реальной деформацией грунта под сооружением.

Приходится признать, что в этом есть и наша вина: мы тоже участвовали в написании данного нормативного документа и пропустили этот момент.

**Ред.:** В каких расчетах и на что влияет данный параметр?

**О.О.:** Прежде всего, этот показатель учитывается при расчете осадки сооружения. Напомню, основное требование к этому параметру: осадка не должна превышать предельно допустимую, которая, в свою очередь, определяется отраслевыми сводами правил. Например, для сверхпрочных зданий она составляет 18 см. А если модуль деформации получается с точностью, условно говоря, плюс-минус 300%, как это происходит сейчас, то ни о каких точных результатах расчетов осадки говорить не придется. Следствие этого – огромные перерасходы средств на этапе строительства фундамента в одном случае или

большой риск возникновения аварийных деформаций здания в другом.

**Ред.:** В чем, на Ваш взгляд, заключается проблема?

**О.О.:** Дело в том, что не всегда возможно найти этот линейный участок, прописанный в ГОСТ. Указанный диапазон от  $1\rho gh$  до  $1,6\rho gh$  – это произвольный участок кривой, который может быть как линейным, так и нелинейным. Предыдущая редакция ГОСТ 12248-2010 допускала возможность визуального определения линейного участка интерпретатором. Однако такой подход никого не устраивал – прежде всего экспертов. Потому что в результате геолог мог на свое усмотрение получить абсолютно любой модуль деформации. Более того, при большом желании можно найти несколько таких псевдолинейных участков и выбрать тот, по которому получившееся значение модуля было бы похоже на табличное. Но по факту строительства обнаруживалось, что осадки сооружения совершенно другие.

Составители последней редакции ГОСТ попытались устранить этот субъективизм, но, к сожалению, получилось весьма неудачно. Мы подготовили письмо в НИИОСП с просьбой дать разъяснения по данному вопросу, потому что у наших заказчиков возникают определенные проблемы из-за сложившейся ситуации.

**Ред.:** Вы придумали, как можно точно определять модуль деформации  $E$ ?

**О.О.:** Есть совершенно четкие критерии, основанные на таком понятии, как расчетное сопротивление грунта. Это то давление, которое можно приложить к грунту, не выходя за линейный участок кривой нагружения. Кстати, хотелось бы отметить: многие неверно считают, что этот термин обозначает максимальное давление, которое может выдержать грунт. Это не так. Грунт может выдержать гораздо большее давление, но работать при этом будет уже нелинейно. У нас же стоит задача получить модуль именно на линейном участке, то есть когда грунт еще работает как пружина, показывая один и тот же модуль при прямом и обратном нагружении. То есть если взять интервал от бытового давления до расчетного сопротивления грунта, то мы как раз получим значение модуля деформации на линейном участке. К случаю, отмечу, что термин «бытовое давление» пришло время заменить на более обоснованный с физической точки зрения – на «геостатическое давление».

Однако важно понимать, что формула расчетного сопротивления грунта не менялась около 70 лет и, разумеется, безнадежно устарела. На момент ее разработки считалось, что не бывает переплотненных грунтов, рассматривалось только изотропное напряженное состояние с одинаковыми горизонтальными и вертикальными напряжениями, не измерялось поровое давление и т. д. Поэтому, несмотря на то что формула очень длинная, она неточна.

Мы разработали формулу, учитывающую также все названные параметры. И уже получили одобрение ряда экспертов. Ее вид мы представим в последующей публикации. Следова-

тельно, если мы будем в конечном счете выделять линейный участок на кривой от бытового давления с учетом взвешивающего эффекта грунтовых вод и принимать это за первую точку напряжения, а за вторую точку принимать расчетное сопротивление грунта по усовершенствованной формуле с учетом реального напряженного состояния и истории нагружения грунта, то мы получим достоверное значение упругого модуля деформации  $E$ . При этом надо учитывать, что в случае глубоких котлованов (более 5 м) линейный участок мы должны получать по кривой повторного нагружения.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, мы сможем смело пользоваться моделью Мора – Кулона в линейном диапазоне зависимости «напряжение – деформация», а также будем абсолютно точно знать, на каком этапе нагружения модель Мора – Кулона перестает работать и когда для точного расчета осадки необходим переход к нелинейной модели, например упрочняющегося грунта (HS), упрочняющегося грунта при малых деформациях (HSS), слабого грунта (SS), слабого грунта учетом ползучести (SSC).

**Ред.:** А если речь идет не о выемке, а о насыпи, например для автомобильной или железной дороги? Как в таком случае рассчитывать модуль деформации?

**О.О.:** Следует понимать, что любая грунтовая насыпь – это сооружение. Поэтому необходимо рассматривать грунтовый массив под дополнительной нагрузкой. Обычно насыпи на слабых грунтах высотой до 6 м позволяют оставаться в линейной зоне кривой нагружения. А при большей высоте насыпи мы уже выходим за расчетное сопротивление грунтов и требуется переход к не-

линейной модели, поскольку модель Мора – Кулона даст совершенно неверный результат.

**Ред.:** Заказчики соглашаются с такой постановкой вопроса?

**О.О.:** С этим, конечно, все непросто. Сейчас устоялась такая практика, что заказчики с ограниченным бюджетом, несмотря ни на какие доводы, требуют использовать исключительно линейную модель Мора – Кулона. Даже тогда, когда ее применение заведомо будет приводить к неточным результатам. А «богатые» заказчики везде прописывают применение нелинейных моделей – даже там, где они вовсе не нужны. Поэтому я уверен, что критерии применения той или иной модели должны быть четко прописаны в ГОСТ. В противном случае могут возникать неразрешимые споры между изыскателями и проектировщиками. Если в конечном счете возникнут проблемы при экспертизе, то виноватым окажется именно изыскатель, поскольку он не обеспечил исходными данными проектную документацию.

В связи с этим можно вспомнить, что известнейший ученый в области механики грунтов, геомеханики и инженерной геологии Николай Александрович Цытович в свое время говорил, что при расчете осадок важно не ошибиться на порядок, то есть в 10 раз. Но при современном высотном строительстве такой подход, конечно, уже недопустим.

В масштабе страны разработки нашей лаборатории АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ» позволят получить невероятный экономический эффект – с ежегодной экономией в десятки и сотни миллиардов рублей. Сейчас мы готовим подробную публикацию по обозначенной теме. Конечно, думаю, у нас, как всегда, будет много оппонентов, но мы готовы к профессиональным дискуссиям. **и**

Независимый электронный журнал  
**ГеоИнфо**

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

**WWW.GEOINFO.RU**





# 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



Источник фото: Pixabay

## О ТЕКУЩЕЙ ПРАКТИКЕ И НОВЫХ ЗАДАЧАХ НАДЗОРА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Реprint

### ФЕРАПОНТОВ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

Заместитель руководителя  
Федеральной службы по  
экологическому, технологическому и  
атомному надзору (Ростехнадзор),  
председатель ТК 322 «Атомная  
техника»

Реформа контрольно-надзорной деятельности в строительстве направлена на снижение давления административной нагрузки на предпринимателей, установку понятных и прозрачных правил проведения проверок. И перед Ростехнадзором как органом государственного строительного надзора по-прежнему стоит задача качественно и надежно предупреждать, выявлять и пресекать нарушения, в том числе при сооружении объектов использования атомной энергии в соответствии с изменившимся законодательством. Какие ключевые перемены произошли в сфере надзорной деятельности за последнее время?

Эта статья была впервые опубликована в № 4 журнала «Вестник государственной экспертизы» за 2022 год. В «ГеоИнфо» она публикуется с разрешения редакции указанного выше журнала.

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

строительный надзор; изменившееся законодательство; Ростехнадзор; объекты капитального строительства; объекты использования атомной энергии; контроль корректировок; Росстандарт; цифровая платформа.

# ON THE CURRENT PRACTICE AND NEW TASKS OF THE SUPERVISION IN CONSTRUCTION

Reprint

## ALEKSEY V. FERAPONTOV

Deputy head of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor); chairman of TC 322 "Atomic Engineering"

**The reform of control and supervisory activities in construction is aimed at reducing the pressure of the administrative burden on entrepreneurs and at establishing understandable and transparent rules for conducting inspections. And the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor), as a state construction supervision body, is still faced with the task of qualitatively and reliably preventing, detecting and deterring violations, including during the construction of nuclear energy facilities in accordance with the changed legislation. What key changes have taken place in the field of supervisory activities recently?**

**This paper was first published in 2022 of № 4 of the journal "Vestnik gosudarstvennoy ekspertisy" ("Bulletin of State Expertise"). It is publishing in "GeoInfo" with the permission of the editorial board of the above-mentioned journal.**

### KEYWORDS:

**construction supervision; changed legislation; Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor); capital construction facilities; nuclear energy facilities; control of adjustments; Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart); digital platform.**

## Новый порядок действий ►

2 июля 2021 года в силу вступило новое «Положение о федеральном государственном строительном надзоре», утвержденное постановлением Правительства РФ от 30 июня 2021 года № 1087. В соответствии с требованиями Федерального закона от 31 июля 2020 года № 248-ФЗ «О государственном контроле (надзоре) и муниципального контроле в Российской Федерации» в новом Положении установлен ряд нововведений, в том числе касающихся проведения контрольных (надзорных) мероприятий при осуществлении федерального государственного строительного надзора.

*Изменения коснулись как организации проведения контрольных (надзорных) мероприятий, так и их проведения, включая снижение срока проведения документарной или выездной проверки с 20 до 10 рабочих дней.*

По окончании проверки составляется акт, а в случае выявления нарушений выдается предписание территориальных органов Ростехнадзора. При этом постановлением Правительства Российской Федерации от 10 марта 2022 года № 336 «Об особенностях организации и осуществления государственного контроля (надзора), муниципального контроля» определено, что предписание об устранении выявленных нарушений

выдается контролируемому лицу исключительно в случае, если в ходе контрольного (надзорного) мероприятия были выявлены факты нарушений, влекущих непосредственную угрозу причинения вреда жизни и тяжкого вреда здоровью, возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, ущерба обороне страны и безопасности государства.

## Соответствовать требованиям ►

Предметом государственного строительного надзора согласно статье 54 Градостроительного кодекса РФ является соблюдение соответствия выполняемых работ и применяемых строительных материалов и изделий в процессе строительства, реконструкции объекта капитального строительства, а также результатов таких работ целому комплексу обязательных требований. В том числе:

- требованиям утвержденной проектной документации и (или) информационной модели;
- требованию наличия разрешения на строительство;
- требованию о членстве в саморегулируемых организациях;
- требованиям к обеспечению консервации объекта капитального строительства;
- требованиям к порядку осуществления строительного контроля.

*При этом качество проектной документации и, соответственно, качество ее экспертизы, является определяющим фактором при осуществлении полноценной надзорной деятельности.*

## Контроль корректировок ►

К сожалению, до сих пор не в полной мере урегулирован вопрос о внесении изменений в проектную документацию в ходе строительства и реконструкции объектов капитального строительства – без повторного обращения в организацию, проводившую экспертизу проекта в соответствии с частью 3.8 статьи 49 Градостроительного кодекса РФ. В данной статье указано, что экспертиза проектной документации по решению застройщика может не проводиться в отношении изменений, внесенных в проектную документацию, получившую положительное заключение экспертизы проектной документации, если такие изменения одновременно:

- 1) не затрагивают несущие строительные конструкции объекта капитального строительства, за исключением замены отдельных элементов таких конструкций на аналогичные или иные улучшающие показатели таких конструкций элементы;
- 2) не влекут за собой изменение класса, категории и (или) первоначаль-

но установленных показателей функционирования линейных объектов;

3) не приводят к нарушениям требований технических регламентов, санитарно-эпидемиологических требований, требований в области охраны окружающей среды, требований государственной охраны объектов культурного наследия, требований к безопасному использованию атомной энергии, требований промышленной безопасности, требований к обеспечению надежности и безопасности электроэнергетических систем и объектов электроэнергетики, требований антитеррористической защищенности объекта;

4) соответствуют заданию застройщика или технического заказчика на проектирование, а также результатам инженерных изысканий;

5) соответствуют стоимости строительства (реконструкции) объекта капитального строительства, осуществляемого за счет средств бюджетов бюджетной системы Российской Федерации в установленном порядке.

Во всех остальных случаях внесенные изменения необходимо оценивать либо в форме экспертного сопровождения органом исполнительной власти или организацией, проводившей экспертизу проектной документации, либо направлять проект на повторную экспертизу.

Однако на практике из-за отсутствия четких критериев, указанных в части 3.8 статьи 49 Градостроительного кодекса РФ, при внесении изменений в проектную документацию часто возникают несогласия не только между органом, осуществляющим государственный строительный надзор, и застройщиком, но и между самими участниками строительства.

### Атомный надзор ►

Согласно «Положению о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору», утвержденному постановлением Правительства Российской Федерации № 401 от 30 июля 2004 года Ростехнадзор наряду с другими полномочиями контролирует исполнение требований Конвенции о ядерной безопасности и Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшими топливом и радиоактивными отходами в рамках договорных обязательств Российской Федерации.

*В отношении объектов использования атомной энергии по итогам 12 месяцев 2021 года осуществлялся феде-*

*ральный государственный строительный надзор при строительстве и реконструкции 40 объектов капитального строительства.*

В течение 12 месяцев 2021 года при осуществлении государственного строительного надзора Межрегионального технологического управления (МТУ) по надзору за ядерной и радиационной безопасностью было проведено 163 проверки. По их результатам:

- выявлено 916 нарушений обязательных требований проектной документации;
- выдано 83 предписания об устранении выявленных нарушений;
- наложено 37 административных наказаний.

Кроме того, по итогам осуществления федерального государственного строительного надзора в отношении объектов использования атомной энергии, за 12 месяцев 2021 года выдано 12 заключений о соответствии построенного, реконструированного объекта капитального строительства требованиям, указанным в части 16 статьи 54 Градостроительного кодекса Российской Федерации.

За семь месяцев 2022 года проведено 53 проверки. За этот период выявлено 336 нарушений, выдано 28 предписаний и определено 16 административных наказаний. За тот же период было выдано два заключения о соответствии вводимого объекта капитального строительства установленным требованиям.

*Основными видами нарушений, выявленных при осуществлении федерального государственного строительного надзора на объектах использования атомной энергии, являются нарушения требований проектной документации, получившей положительное заключение государственной экспертизы, и нарушения при проведении строительного контроля.*

### Идеальный заказчик и подрядчик: критерии Ростехнадзора ►

Практика государственного контроля строительной деятельности показывает, что идеального заказчика и подрядчика, или, в терминах Градостроительного кодекса РФ, застройщика, технического заказчика и лиц, осуществляющих строительство, к сожалению, «в природе» не существует, особенно при сооружении объектов использования атомной энергии.

И вопрос здесь не только в уровне компетентности и в целом профпригод-

ности участников строительства, а также в наличии финансов, кадров и т. п., но и в достаточно высоких требованиях, предъявляемых к этим организациям в атомной отрасли.

Так, при сооружении объекта использования атомной энергии участники строительства должны неукоснительно выполнять не только требования градостроительного законодательства, но и требования, установленные в соответствии с международными договорами Российской Федерации, Федеральным законом от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии», другими федеральными законами и иными нормативными правовыми актами Российской Федерации в области использования атомной энергии.

Самым продвинутым заказчиком в этом отношении является АО «Концерн Росэнергоатом», а среди подрядных организаций – АО «Атомстройэкспорт» и АО «Концерн Титан-2», которые и осуществляют строительство крупнейших объектов использования атомной энергии в России и за рубежом.

### «Атомная техника»: секреты лидерства техкомитета 322 ►

Технический комитет по стандартизации «Атомная техника» стал лидером рейтинга эффективности по итогам 2021 года. Рейтинг традиционно представляет Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт).

Одним из важнейших направлений деятельности ТК 322 является гармонизация отечественных нормативных документов с международными стандартами и рекомендациями. Гармонизация подразумевает целенаправленную деятельность по созданию условий для внедрения и использования в отечественных интересах международных нормативных документов, отражающих новейшие достижения в науке и технике и определяющих современные требования к уровню качества и конкурентоспособности продукции и услуг.

Как удалось вывести ТК322 в лидеры рейтинга эффективности Росстандарта и по каким критериям оценивалась работа техкомитетов?

При составлении рейтинга оценивалась фактическая деятельность каждого технического комитета и количественные характеристики работы в отчетном году. Также рассматривались: уровень выполнения плановых показателей деятельности, результаты рассмотрения апелляционных жалоб, достижения в



работе международных организаций по стандартизации, степень привлечения для участия в работах по стандартизации бизнес-сообщества, наличие случаев значительного сокращения среднего срока разработки стандарта, активное участие в проектах Росстандарта по совершенствованию и развитию системы национальной стандартизации и др.

Строительный контроль объектов капитального строительства, в том числе и атомной отрасли, осуществляется в соответствии с «Положением о проведении строительного контроля при осуществлении строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов капитального строительства», утвержденным постановлением Правительства РФ от 21 июня 2010 года № 468. Согласно этому положению предметом строительного контроля является проверка выполнения работ при строительстве объектов капитального строительства на соответствие требованиям проектной и подготовленной на ее основе рабочей документации, результатам инженерных изысканий, требованиям градостроительного плана земельного участка, требованиям технических регламентов в целях обеспечения безопасности зданий и сооружений.

При сооружении объекта использования атомной энергии требования к проведению строительного контроля гораздо жестче и дополнительно прописаны в лицензионных документах участников строительства, таких как «Программа обеспечения качества».

Помимо этого проектная документация объекта использования атомной энергии учитывает требования законодательства в области использования атомной энергии, что предъявляет дополнительные требования к организации строительного контроля.

Численность осуществляющих строительный контроль работников заказчика при сооружении энергоблока атомной станции составляет больше 100 человек, причем их значительная часть занимается строительным контролем при монтаже оборудования. Все это в комплексе обеспечивает высокий уровень надежности объектов атомной промышленности.

### Цифровая платформа на службе госнадзора ▶

Развитие информационных технологий – одно из ключевых направлений совершенствования системы государственного надзора за строительной деятельностью.

На данный момент в Ростехнадзоре утверждается техническое задание к подсистеме государственного строительного надзора (ГСН) в рамках цифровой платформы «Автоматизированная информационная система Ростехнадзора» (ЦП АИС). Эта платформа находится в стадии опытной эксплуатации.

Внедрение ЦП АИС Ростехнадзора позволит решать такие задачи, как:

- реализация обмена документов и сведений между всеми участниками строительства в электронном виде;

- организация возможности автоматизированной проверки и сверки проектной и исполнительной документации;
- осуществление возможности автоматизированного контроля этапов и сроков строительства;

- развитие функции контроля исполнения предписаний, выданных в рамках федерального государственного строительного надзора.

Помимо указанной цифровой платформы в работе Ростехнадзора сегодня также используется целый ряд ведомственных информационных систем, в том числе:

- Единый реестр контрольных (надзорных) мероприятий (ЕРКНМ);
- Единый реестр проверок (ЕРП);
- Автоматизированная информационная система по регулированию безопасности в области использования атомной энергии (АИС ЯРБ);
- государственная информационная система «Типовое облачное решение по автоматизации контрольной (надзорной) деятельности» (ГИС ТОР КНД).

*Данная статья из журнала «Вестник государственной экспертизы» (№4/2022) опубликована здесь в рамках информационного сотрудничества журнала «ГеоИнфо» и Главгосэкспертизы России.*

*Приобрести журнал «Вестник государственной экспертизы» можно в интернет-магазине по ссылке: <https://vestnik.gge.ru/>.*

# ГеоИнфо

Независимый электронный журнал

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

[WWW.GEOINFO.RU](http://WWW.GEOINFO.RU)

