

# Независимый электронный журнал

# ГеоИнфо

Аналитический метод расчета осадки с учетом нелинейности деформирования  
*Стр. 26*

Инженерно-геологические особенности массивов гранитоидов...  
*Стр. 48*

Инфляция в строительстве. Обогнать нельзя построить  
*Стр. 84*



## GEOINFO

ISSN 2949-0677 (ONLINE)

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

TOM VII • 1-2025

## ГЕНЕРАЛЬНЫЕ СПОНСОРЫ ПРОЕКТА



Геотехническая лаборатория  
АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ»



ООО «ПЕТРОМОДЕЛИНГ»



Институт  
экологического  
проектирования  
и изысканий

АО «ИНСТИТУТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗЫСКАНИЙ»



MACSAFERRI / ГАБИОНЫ МАККАФЕРРИ СНГ

## СПОНСОРЫ ПРОЕКТА



ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

ООО НПП «ГЕОТЕК»



MALINISOFT



ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» / FUGRO



Обработка и хранение результатов  
инженерно-геологических  
изысканий

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС  
«ENGCEO»



КАЗГЕОЛАБ  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ



ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
НОРТЕСТ

АНО ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
«НОРТЕСТ»



КОМПЛЕКС  
АВТОНОМНЫХ ПРОГРАММ  
ДЛЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ



ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ  
УПРАВЛЕНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ  
В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ



ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ДЛЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ НЕЗАВИСИМОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЖУРНАЛА «ГЕОИНФО»

### **Самарин Евгений Николаевич**

Главный редактор журнала «ГеоИнфо», профессор Кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н.

### **Баборыкин Максим Юрьевич**

Главный геолог ООО «Аэрогеоматика», к.г.-м.н., имеет степень MBA

### **Бершов Алексей Викторович**

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

### **Ван Пин**

Профессор Института географических наук и исследования природных ресурсов Академии наук, КНР, к.г.-м.н.

### **Галкин Александр Николаевич**

Профессор кафедры экологии и географии учреждения образования «Витебский государственный университет им. П.М. Машерова», д.г.-м.н.

### **Гиззатуллин Рушан Рафаэлевич**

Инженер-геотехник ООО «НИП-Информатика»

### **Ермолов Александр Александрович**

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

### **Жидков Роман Юрьевич**

Главный инженер отдела цифровой картографии ГБУ «Мосгоргеотрест», к.г.-м.н.

### **Зайцев Андрей Александрович**

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

### **Исаев Владислав Сергеевич**

Доцент Университета МГУ ППИ, Шэньчжэнь, КНР, 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, д.г.-м.н.

### **Лю Цзянькунь**

профессор Университета Сунь Ятсена, Гуанчжоу, КНР, к.г.-м.н.

### **Маштаков Александр Сергеевич**

Доцент кафедры географии и картографии Волгоградского государственного университета, директор ООО «ВОЛГАСТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

### **Мирный Анатолий Юрьевич**

Доцент Кафедры инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, генеральный директор ООО «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.

### **Молдобеков Болот Дуйшеналиевич**

Доцент, содиректор Центрально-Азиатского института прикладных исследований Земли, к.г.-м.н.

### **Пиоро Екатерина Владимировна**

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

### **Салихов Фарид Салохиддинович**

Доцент кафедры математики и естественных наук филиала МГУ им. М.В. Ломоносова в городе Душанбе, д.г.-м.н.

### **Судакова Мария Сергеевна**

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

### **Слободян Владимир Юрьевич**

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

### **Труфанов Александр Николаевич**

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

### **Федоренко Евгений Владимирович**

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

### **Фоменко Игорь Константинович**

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

### **Фролова Юлия Владимировна**

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

### **Чжан Шэньжун**

Доцент Северо-Восточного Университета Лесного Хозяйства, Харбин, КНР, к.г.-м.н.

### **Чжан Цзе**

Профессор факультета гражданского строительства и транспорта Северо-Восточного университета Лесного Хозяйства, директор Китайско-Российской лаборатории инженерии и экологии холодных регионов, к.г.-м.н.

### **Шарафутдинов Рафаэль Фаритович**

Директор НИИОСП им. Н.М. Герсевича, ученый секретарь Российского Общества по Механике Грунтов, Геотехнике и Фундаментостроению (РОМГГиФ), к.т.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: 4 выпуска в год.

ISSN: 2949-0677

Префикс DOI: 10.58339

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

### Учредитель:

ИП Ананко Виктор Николаевич

### Издательство:

ГеоИнфо, ИП Ананко В.Н.

### Адрес:

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

### Редакция:

Самарин Евгений Николаевич  
Главный редактор

Васин Михаил Васильевич  
Обозреватель

Дьяченко Людмила  
Специальный корреспондент

Еремеева Мария  
Специальный корреспондент

Виноградова Вера  
Специальный корреспондент

### Дизайн и верстка:

ИП Лившиц С.С.

### Официальный сайт:

Geoinfo.ru

### Адрес в НЭБ:

[https://elibrary.ru/title\\_about\\_new.asp?id=80357](https://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=80357)

Распространяется бесплатно.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.

Дата выхода в свет: 16.06.2025

© Ананко Виктор Николаевич, 2025

© ГеоИнфо, 2025

Фото на обложке: Midjourney

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

**Методы очистки геологической среды по трассам нефтепроводов** .....6  
Королев В.А., Самарин Е.Н., Григорьева И.Ю., Николаева С.К., Чжан Цз., Чжан Ш.

## ГЕОТЕХНИКА

**Аналитический метод расчета осадки с учетом нелинейности деформирования** .....26  
Мирный А.Ю., Калугина Ю.А.

## ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА ТЕРРИТОРИЙ

**Ретроспективный подход к определению генезиса воронок на земной поверхности (на примере Троицкого и Новомосковского округов, г. Москва)** ...34  
Романова Е.Р., Жидков Р.Ю., Абакумова Н.В.

## ГРУНТОВЕДЕНИЕ

**Инженерно-геологические особенности массивов гранитоидов Северо-Восточного Забайкалья** .....48  
Барыкина О.С., Зеркаль О.В., Самарин Е.Н.

## ПЕРЕВОДНЫЕ СТАТЬИ

**Моделирование и картирование влияния изменений климата на многолетнюю мерзлоту в регионе со сложным рельефом с высоким пространственным разрешением** .....54  
Чжан Ю., Ван С., Фрейзер Р., Олтхоф И., Чэнь В., Макленнан Д., Пономаренко С., У В.

**Ключевые технологии повышения устойчивости тоннеля сверхбольшого диаметра, сооружаемого под рекой Хуанхэ щитовым способом** .....76  
Чэнь Цз.

## ПРИЛОЖЕНИЕ. ДИСКУССИЯ ПРОФЕССИОНАЛОВ

**Инфляция в строительстве. Обогнать нельзя построить** .....84  
Ананко Виктор

**Айрат Латыпов: Научно-техническое сопровождение инженерных изысканий в Татарстане требуется практически повсеместно** .....90  
Интервью с Латыповым А.И.

**Сложные вопросы применения геофизических методов в ходе инженерно-геологических изысканий** .....96  
Прохачев Максим

**Об оценке оползневых рисков на основе комплексного подхода** .....100  
Васин Михаил

### 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, мерзловедение 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



**ECOLOGICAL GEOLOGY**

**Methods for cleaning geological environment along oil pipelines** .....6  
 Korolev V.A., Samarin E.N., Grigor'eva I.Yu., Nikolaeva S.K., Zhang J., Zhang Sh.

**GEOTECHNICS**

**Analytical method for settlement calculation taking into account nonlinear deformation** .....26  
 Mirnyy A.Yu., Kalugina Yu.A.

**ENGINEERING PROTECTION OF TERRITORIES**

**Retrospective approach to determining the genesis of sinkholes on the earth surface (by the example of Troitsk and Novomoskovsk districts, Moscow)** ... 34  
 Romanova E.R., Zhidkov R.Yu., Abakumova N.V.

**SOIL SCIENCE**

**Engineering-geological features of granitoid masses in Northeastern Transbaikalia** .....48  
 Barykina O.S., Zerkal' O.V., Samarin E.N.

**TRANSLATED ARTICLES**

**Modelling and mapping climate change impacts on permafrost at high spatial resolution for a region with complex terrain** .....54  
 Zhang Yu., Wang X., Fraser R., Olthof I., Chen W., McLennan D., Ponomarenko S., Wu W.

**Key technologies for improving resilience of super-large diameter shield tunnel affected by large variable loads underneath the Yellow River** .....76  
 Chen J.

**APPENDIX. DISCUSSION OF PROFESSIONALS**

**Inflation in construction. Impossible outpacing versus impossible building** .....84  
 Ananko Victor

**Airat Latypov: Scientific-technical support of engineering surveys is required almost everywhere in Tatarstan** .....90  
 Interview with Latypov A.I.

**Difficult issues of using geophysical methods in the course of engineering-geological survey** .....96  
 Prokhachev Maksim

**On landslide risk assessment based on an integrated approach** .....100  
 Vasin Mikhail

**GEOINFO**

Electronic publication

Published since 2016

Publication frequency:  
 10 issues per year

ISSN: 2949-0677

DOI prefix: 10.58339

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

**Founder:**  
 Ananko Viktor Nikolaevich

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

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

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

analyst:  
 Vasin Mikhail Vasilyevich;

D'yachenko Lyudmila  
 Special Correspondent;

Eremeeva Mariya  
 Special Correspondent;

Vinogradova Vera  
 Special Correspondent;

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

**Official website:**  
 Geoinfo.ru

**Address in the National Electronic Library of the RF:**  
[https://elibrary.ru/title\\_about\\_new.asp?id=80357](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: 16.06.2025

© Ananko Viktor Nikolaevich, 2025

© GeoInfo, 2025

Cover photo: Midjourney



**Методы очистки геологической среды по трассам нефтепроводов Стр. 6**





Источник фото: <https://oleoscope.com/news/fiz-za-proryva-nefteprovoda-v-orenburzhe-pogibli-posevy-podsolnechnika/>

# МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПО ТРАССАМ НЕФТЕПРОВОДОВ

Принята к публикации 30.05.2025

Опубликована: 16.06.2025

## КОРОЛЁВ В.А.

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

## САМАРИН Е.Н.

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

## ГРИГОРЬЕВА И.Ю.

Доцент кафедры инженерной и экологической геологии МГУ имени М.В. Ломоносова, к. г.-м. н., г. Москва, г. Москва, Россия  
ikagr@inbox.ru

## НИКОЛАЕВА С.К.

Доцент кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к. г.-м. н., г. Москва, Россия  
nikolaeva sk@gmail.com

## ЧЖАН Цз.

Профессор Северо-восточного университета лесного хозяйства, к. г.-м. н., г. Харбин, Китай  
zez@nefu.edu.cn

## ЧЖАН Ш.

Доцент Северо-восточного университета лесного хозяйства, к. г.-м. н., г. Харбин, Китай  
zhangshengrong1988@nefu.edu.cn

## АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены современные методы очистки геологической среды от нефтяных загрязнений по трассам нефтяных трубопроводов, в том числе в условиях Сибири и криолитозоны. Приведена рациональная схема очистки грунтов от нефтяных загрязнений. Проанализированные методики можно рассматривать как общие для решения аналогичных проблем не только в России, но и в Китайской Народной Республике. Также необходимо учитывать их при инженерно-экологических изысканиях и исследованиях на загрязненных территориях.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

геологическая среда; методы очистки грунтов; нефтяные загрязнения; трассы нефтепроводов.

## ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Королёв В.А., Самарин Е.Н., Григорьева И.Ю., Николаева С.К., Чжан Цз., Чжан Ш. Методы очистки геологической среды по трассам магистральных нефтепроводов // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 1. С. 6–24. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-6-24.

# METHODS FOR CLEANING GEOLOGICAL ENVIRONMENT ALONG OIL PIPELINES

Accepted for publication 30.05.2025

Published 16.06.2025

## KOROLEV V.A.

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

## SAMARIN E.N.

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

## GRIGOR'EVA I.Yu.

PhD, assistant professor, Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
ikagrig@inbox.ru

## NIKOLAEVA S.K.

PhD, assistant professor, Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
nikolaeva sk@gmail.com

## ZHANG J.

PhD, professor, Northeastern Forestry University, Harbin, China  
zez@nefu.edu.cn

## ZHANG Sh.

PhD, assistant professor, Northeastern Forestry University, Harbin, China  
zhangshengrong1988@nefu.edu.cn

## ABSTRACT

This article discusses modern methods of cleaning away oil pollution from geological environment along oil pipeline routes, including in the Siberian and cryolithozone conditions. A rational scheme for cleaning grounds off oil pollution is given. The analyzed methods can be considered as general for solving similar problems not only in Russia, but also in the Chinese People's Republic. And they should be taken into account during engineering-environmental surveys and studies in polluted areas, too.

## KEYWORDS:

geological environment; ground cleaning methods; oil pollution, oil pipeline routes

## FOR CITATION:

Korolev V.A., Samarin E.N., Grigor'eva I.Yu., Nikolaeva S.K., Zhang J., Zhang Sh. *Metody ochistki geologicheskoi sredy po trassam nefteprovodov [Methods for cleaning geological environment along oil pipelines] // GeoInfo. 2025. T. 7. № 1. S. 6–24. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-6-24 (in Rus.)*

## ВВЕДЕНИЕ ►

Загрязнение геологической среды нефтью и нефтепродуктами представляет собой серьезную экологическую проблему. Особенно интенсивно это загрязнение происходит в местах добычи, а также транспортировки нефти по трубопроводам. С учетом огромной суммарной протяженности нефтепроводов в России и связанной с этим загрязненностью грунтов нефтью, становятся весьма актуальными вопросы очистки грунтов от нефти и нефтепродуктов. Однако многие из них пока остаются нерешенными, что обусловлено сложностью и комплексностью данной проблемы. В этой связи целью настоящей статьи является анализ существующих способов очистки грунтов вдоль нефтепроводов и обоснование рациональной схемы очистки геологической среды от нефтяных загрязнений.

Анализ проводился на базе изучения фондовых, полевых и лабораторных материалов по нефтяным загрязнениям вдоль нефтепроводов, включая материалы, собранные авторами вдоль трассы участка магистрального нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО-1) – нефтепровода Сковородино – Мохэ в Амурской области – и его продолжения до города Дацин (КНР), а также на Саянском месторождении (Западная Сибирь). Работы проводились совместно с сотрудниками Северо-восточного университета лесного хозяйства (КНР).

В настоящее время объем поставок по первой очереди ВСТО до станции Сковородино составляет 80 млн тонн нефти в год. Из них в Китай, в Мохэ и Дацин, уходит до 30 млн тонн в год; остальная часть нефти (50 млн тонн) по

второй очереди ВСТО направляется в сторону Тихого океана. Из этого количества на Хабаровский и Комсомольский нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) суммарно поступает 13 млн тонн, оставшиеся 37 млн тонн предназначены для отправки на экспорт. По территории России нефтепровод идет от Сковородино на юг в сторону реки Амур до приграничного поселка Джалинда, где размещен приемо-сдаточный пункт, затем он идет под руслом Амура в КНР и далее – по китайской территории проходит через г. Мохэ и другие 12 городов и округов провинции Хэйлуцзян и автономного района Внутренняя Монголия (АРВМ) до города Дацин, где расположена его конечная нефтеперекачивающая станция «Линьюань».

Работа выполнялась в рамках госбюджетной темы МГУ имени М.В. Ломоно-





**Рис. 1.** Гибель леса под воздействием «нефтяного озера» на Самотлорском месторождении в Западной Сибири (фото Е.А. Вознесенского, 1999)



**Рис. 2.** Погибший из-за нефтяного загрязнения лес (сухостой) на Самотлорском месторождении (фото В.С. Королева, 2021)

**Таблица 1. Формы нефтяных загрязнений в грунтах**

Обозначение формы загрязнения	Особенности нефтяного загрязнения
НП <sub>1</sub>	Легкоподвижные жидкие низкоплотные углеводороды – основная первичная форма (бензины, керосины, дизельные топлива и т.п.)
НП <sub>2</sub>	Слабоподвижные жидкие низкоплотные углеводороды – второстепенная первичная форма (легкие мазуты, масла и т.п.)
НП <sub>3</sub>	Слабоподвижные жидкие высокоплотные углеводороды (с плотностью выше, чем у воды, то есть больше единицы) – второстепенная первичная форма (тяжелые мазуты, масла и т.п.). Форма, производная от НП <sub>1</sub> и НП <sub>2</sub>
НП <sub>4</sub>	Неподвижные слабвязкие (от текучих до полутвердых) тяжелые формы нефтепродуктов в зоне аэрации. Форма, производная от НП <sub>2</sub> и НП <sub>3</sub>
НП <sub>5</sub>	Высокоплотные сильновязкие нефтепродукты, малоподвижные (в горизонтах подземных вод). Форма, производная от НП <sub>3</sub>
НП <sub>6</sub>	Водоземлюлированные подвижные нефтепродукты. Форма, производная от НП <sub>1</sub>
НП <sub>7</sub>	Водорастворенные подвижные формы нефтепродуктов. Ароматические углеводороды, производные от всех других форм
НП <sub>8</sub>	Газообразные нефтепродукты. Форма, производная в основном от НП <sub>1</sub>
НП <sub>9</sub>	Неподвижные сорбированные нефтепродукты. Парафины, производные от всех других форм

сова «Эколого-геологические системы: структура, многообразие, систематика и их анализ» (госбюджет, раздел 0110 (для тем по госзаданию), номер 5-4-2021, номер ЦИТИС 121042200089-3) и совместных исследований с Северо-восточным университетом лесного хозяйства (Китайская Народная Республика).

### ОСОБЕННОСТИ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ГРУНТОВ ВДОЛЬ НЕФТЕПРОВОДОВ ►

Основным путем загрязнения почв и подпочвенных грунтов вдоль нефтепроводов и объектов их инфраструктуры являются аварийные разливы нефти, осаждение поллютантов из атмосферы за счет гравитационного и турбулентного оседания, дальнейшей адсорбции загрязняющих веществ подстилающей поверхностью, миграции и накопления углеводородов в почвенном профиле. При этом загрязнителями почвенного покрова являются нефтепродукты, сульфаты, ароматические углеводороды

(бензол, толуол, стирол, альфаметилстирол, ортоксилол, этилбензол, изопропилбензол, бензин, бензапирен), азот аммонийный, металлы и др.

Значительны интенсивность и масштабы загрязнения подземных вод и грунтов в районах нефтедобычи и промышленных нефтепроводов. Весьма негативные экологические последствия имеют многочисленные повреждения промышленных трубопроводов, аварии на магистральных нефтепроводах, потери нефти из резервуаров из-за несовершенства конструкций, что сказывается в первую очередь на состоянии почв, растений и водных объектов (рис. 1, 2).

Большинство нефтепроводов-коллекторов и магистральных трубопроводов прокладывается подземным способом или полуподземным (полузаглубленным) способом с обваловкой, реже – наземным в насыпи. Поэтому нефть из поврежденной трубы может сразу проникать вглубь массива или сначала изливаться на поверхность.

Особенности нефтяного загрязнения массивов различных грунтов обуславливаются:

- 1) строением массива грунтов;
- 2) его гидрогеологическими особенностями;
- 3) типом и составом проникающих углеводородов;
- 4) их возрастом (длительностью загрязнения);
- 5) конструкцией и состоянием трубопровода.

В зависимости от этих особенностей в массивах формируются различные углеводородные загрязнения. В силу разной подвижности, испаряемости и процессов «старения» нефти в грунтах нефтяные загрязнения могут быть представлены разными формами, среди которых выделяют как минимум **девять категорий** [1] (таблица 1):

Со временем углеводородные загрязнения в грунте видоизменяются из-за процессов испарения легких фракций, процессов окисления нефтепродуктов,

**Таблица 2. Классификация уровней загрязнения грунтов нефтепродуктами (по [1])**

Уровень загрязнения	Общее содержание нефтепродуктов	
	г/кг	%
Фоновый	<0,5	<0,05
Низкий	0,5–1	0,05–0,1
Умеренный	1–5	0,1–0,5
Средний	5–10	0,5–1
Высокий	10–50	1–5
Очень высокий	>50	>5

**Таблица 3. Способность разных грунтов сорбировать нефтепродукты (по [2])**

Грунт	Коэффициент фильтрации для воды, м/сут	Количество сорбированных нефтепродуктов, л/м <sup>3</sup>
Крупный гравий, валуны	10 <sup>2</sup>	-
От гравия до крупнозернистого песка	10 <sup>2</sup> –10 <sup>1</sup>	8
Песок от крупно- до среднезернистого	10 <sup>1</sup> –10 <sup>0</sup>	15
Песок от средне- до мелкозернистого	10 <sup>0</sup> –10 <sup>-1</sup>	25
От глинистого песка до глины	10 <sup>-1</sup> –10 <sup>-3</sup>	40

**Таблица 4. Показатели загрязненности земель нефтью до начала рекультивационных мероприятий (по [3])**

Группа ландшафтно-геохимических районов	Степень загрязнения	Содержание остаточной нефти, мг/кг	Степень отмирания растительности в следующем вегетационном периоде	
			травянистой	древесной, %
Мерзлотно-тундрово-таежные	умеренная	от <5000 до 100000	неполное	<50
		>10000	полное	>50
Таежно-лесные	умеренная	<30000	неполное	<75
		>30000	полное	>75
Степные	умеренная	<6	неполное	<75
	сильная	>6	полное	>75

процессов частичного гидролиза и пр. Этот процесс трансформации загрязнений во времени называют процессом «старения нефти». В итоге чем старше нефтяное загрязнение, тем сложнее его удалить, так как в нем остаются самые устойчивые фракции нефтепродуктов, находящиеся в неподвижном состоянии. Указанные формы необходимо учитывать при обосновании схем очистки грунтов.

Количество нефтяных загрязнений в грунтах может быть различным (таблица 2), зависящим от многих факторов, в том числе от сорбционной способности грунтов (таблица 3). С учетом особенностей различных ландшафтов, их степень загрязнения нефтью и нефтепродуктами может оцениваться с помощью таблицы 4.

Нефтяные вещества сорбируются грунтами, включая почвы, преимущественно еще в жидкой фазе, причем в

основном за счет сорбции полярных компонентов (нафтеновых кислот, смол, асфальтенов). Способность углеводородов сорбироваться грунтами понижается в последовательности: олефины > ароматические углеводороды > циклопарафины > парафины.

Загрязнение грунтов нефтью вне и в пределах криолитозоны имеет различия и особенности, рассматриваемые ниже.

#### **ОСОБЕННОСТИ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ГРУНТОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ ▶**

Нефтяное загрязнение грунтов в криолитозоне имеет свои специфические особенности, обусловленные наличием в них льда и незамерзшей воды, возможностью фазовых переходов при изменении термодинамических условий среды, изменением альbedo и теплофизических свойств и др. Они были изучены на ряде объектов как в России [4,

5], так и за рубежом [6, 7]. Установлено, что при нефтяном загрязнении грунтов в криолитозоне происходит существенное изменение тепло- и массообменных свойств грунтов как в сезонно-талом слое, так и в верхней части многолетне-мерзлой толщи [8]. Это может сказываться на активизации различных экзогенных геодинамических процессов.

Находящийся в мерзлых грунтах лед является препятствием для проникновения в них жидких, газообразных и твердых углеводородных загрязнителей. Однако лед нельзя рассматривать как абсолютно непроницаемую для них среду. Хорошо известно, что он имеет «ажурную пористую» структуру с многочисленными пустотами, что, с одной стороны, делает его легче воды, а с другой – придает некоторую проницаемость. Именно эти пустоты и могут бытьместилищем для различных загрязнителей и «миграционными каналами»,

**Таблица 5. Классификация методов очистки грунтов от нефтяных загрязнений (составил В.А. Королев)**

Способы воздействия		Методы локализации очагов загрязнений	Методы очистки путем	
Класс	Подкласс		Удаления углеводородов	Деградации углеводородов
Физическое	Механическое	Механические экраны	Экскавация грунта	-
	Гидродинамическое	Инъекционные экраны	Откачка	-
	Аэродинамическое	-	Вакуумирование, вакуумные сборщики	-
	Термическое	-	Термоосмос	Термодеструкция, сжигание
	Электрическое	Электрокинетические барьеры (экраны)	Электроосмос	Электродеструкция
Физико-химическое	Сорбция	Сорбционное связывание, сорбционные экраны	-	Сорбционная детоксикация
Химическое	-	Химическое капсулирование	-	Известкование
Биологическое	Активизация аборигенных микробов	Рыхление, вспашка, внесение чистых почв и удобрений	-	-
	Внесение культур	Внесение биопрепаратов	-	-
		Фитостабилизация	Фитоэкстракция	Фитодегградация, фитостабилизация
Комплексное	Электрическое и биологическое	-	Электробио-очистка	Электробио-деградация

по которым возможно их перемещение путем диффузии. Распространению углеводородных загрязнений в мерзлых грунтах способствует и наличие в них незамерзшей воды. Чем больше в мерзлом грунте незамерзшей воды, тем в целом выше его коэффициент фильтрации в мерзлом состоянии при прочих равных условиях. Наибольшее количество незамерзшей воды при отрицательных температурах содержится в высокодисперсных глинистых грунтах.

Г.В. Ананьевой с сотрудниками [4] были в полевых условиях изучены особенности загрязнения нефтью четвертичных суглинков, оторфованных в верхней части. Мощность слоя сезонного оттаивания составляла около 1,2 м. На опытных площадках в криолитозоне заливали нефть и замеряли время ее просачивания и скорость впитывания в грунт, а затем через различные промежутки времени (дни, месяцы, годы) проводили опробование грунтов в сезонном слое (СТС) и верхних горизонтов многолетнемерзлых пород (ММП) для выявления характера распределения нефтяного загрязнения в исследуемой толще. Было установлено, что в первые минуты после налива скорости впитывания нефти достигали 1–2 см/мин, со временем они падали, а через 30 мин – не превышали 0,15 см/мин. Максималь-

ное содержание нефтепродуктов наблюдалось в самых верхних горизонтах: от 1–3 до 10 г/кг. Это в целом было меньше на один порядок, чем в предыдущий год опробования на аналогичной глубине. Общий характер нефтяного загрязнения также оказался аналогичным [4]. Повышение содержания нефти в грунтах наблюдается в верхних оторфованных горизонтах, супесях, а также в суглинке с включениями обломочного материала. На границе с ММП часто наблюдается некоторое увеличение концентрации нефти, свидетельствующее о том, что граница сезонного оттаивания является определенным барьером, однако в мерзлых горизонтах также фиксируются нефтепродукты. Хотя их концентрация там оказывается на порядок меньше, есть основания говорить о переносе и рассеивании нефтяного загрязнения в собственно мерзлых породах.

Ю.А. Нефедьевой [9] была выявлена роль трансформации нефтяного загрязнения в изменении свойств грунтов слоев сезонного оттаивания и промерзания, а также оценено изменение глубины сезонного оттаивания и сезонного промерзания в различных геокриологических условиях. Было установлено, что время трансформации и условия загрязнения грунтов определяют количественные и качественные изменения

нефти. При единичных разливах с увеличением длительности трансформации нефти в диапазоне от 3 до 5 лет степень нефтяного загрязнения в исследуемых грунтах уменьшается в 2–4 раза.

Нефтяное загрязнение оказывает наибольшее влияние на глубину сезонного протаивания (промерзания) переходного типа, наименьшее на – длительно устойчивый тип глубин сезонного оттаивания и сезонного промерзания. Уменьшение альбедо при нефтяном загрязнении приводит к увеличению глубины сезонного оттаивания и уменьшению глубины сезонного промерзания дисперсных грунтов, оказывая большее влияние на мерзлые грунты. Уменьшение коэффициента теплопроводности при нефтяном загрязнении приводит к уменьшению мощности слоев сезонного оттаивания и сезонного промерзания, оказывая наибольшее влияние на промерзающие породы из-за более интенсивных процессов трансформации нефти в них. В песках влияние нефтяного загрязнения больше, чем в суглинках, ввиду меньшего изменения теплопроводных свойств при загрязнении нефтью [9].

**МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ГРУНТОВ ОТ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ▶**

Очистка грунтов от нефтяных загрязнений представляет непростую за-





Рис. 3. Срезка слоев торфа с высоковязкой забитумизированной нефтью с помощью экскаватора (фото В.С. Королева)



Рис. 4. «Доработка» срезки нефтезагрязненного торфа ручным способом (фото В.С. Королева)

дачу. В настоящее время разработано множество способов очистки грунтов от нефтяных загрязнений, которые отражаются в различных классификациях. Согласно работе В.А. Королева [10] их можно разделить на три группы (таблица 5):

- 1) методы локализации очагов загрязнений;
- 2) методы очистки путем удаления (извлечения) нефтепродуктов;
- 3) методы очистки путем деградации (деструкции, разрушения) нефтяных загрязнений.

### ОЧИСТКА ГРУНТОВ ОТ ПОВЕРХНОСТНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ ►

Для очистки грунтов от поверхностных разливов нефти и нефтепродуктов применяются [11, 12]:

- 1) механическая экскавация загрязненного грунта;
- 2) вакуумная сборка нефти.

Механические методы удаления нефтяных загрязнений являются простейшими и наиболее универсальными методами очистки массивов от этих загрязнений, однако, в сущности, они являются лишь перенесением загрязнителя из массива в другое место, или предварительным (вспомогательным) этапом для других способов очистки. В настоящее время широко распространено простое механическое удаление – экскавация с помощью различных технических средств загрязненного объема пород. Для этого используется различная землеройная и дорожно-строительная техника: экскаваторы, бульдозеры, грейдеры, скреперы, фрезы и т.п.

Реализация механической очистки идет поэтапно и начинается с сооружения подъездных путей к очищаемому участку или на его территории благода-

ря прокладке насыпных и лежневых дорог. Затем приступают к удалению погибшего леса. Данный вид работ относится к техническому этапу рекультивационных работ и включает в себя уборку погибшего из-за нефтяного загрязнения леса и корчевание пней. Эти операции сопровождаются разделкой древесины и транспортировкой ее к местам дальнейшего складирования. Основные требования заключаются в недопущении повторного загрязнения и расширения площади загрязненной территории.

Механический сбор нефти и нефтепродуктов можно разделить на две части:

- 1) удаление высоковязкой забитумизированной нефти;
- 2) очистка территории и водной поверхности от разливов жидкой нефти с применением механических способов. Суммарно эти работы проводятся от нескольких недель до нескольких месяцев в зависимости от объема загрязнений.

Проведение работ по откачке жидкой нефти при наличии затвердевших зон невозможно, поскольку битум не подвергается вакуумированию. Поэтому сначала проводят очистку территорий от забитумизированных слоев с применением *механических способов* удаления загрязнений [13]. Данный этап также является наиболее дорогостоящим и занимает порядка 70–80% от общих затрат (выплат средств подрядчику) на проведение работ по рекультивации. Достижение цели, то есть полного отсутствия слоев высоковязкой забитумизированной нефти на территории участка, возможно при ручных или механизированных работах по снятию слоя высоковязкой «забитумизированной» нефти с минимальным включением неотделяемой части почвы, грунта, торфа и растительных остатков. Механическая очистка (экскавация) заклю-

чается в *срезке* нефтезагрязненного торфа экскаваторами (рис. 3), так как это самый быстрый и эффективный метод. Ручная срезка или так называемые «доработки» необходимы и возможны только в отдельных точках (рис. 4), в которых ранее уже была проведена срезка экскаватором.

При проведении работ по срезке нефтезагрязненного торфа также необходимо исключать возможности вторичного загрязнения во временных местах складирования. Этого можно достичь путем предварительного создания гидроизоляционного слоя. Однако главная проблема заключается не в этом. Нефтезагрязненный с забитумизированной нефтью торф вывозят на самосвалах на специальные полигоны, где впоследствии утилизируют. При этом безвозвратно теряются огромные объемы геологического торфяного ресурса. Однако важно учитывать следующее: чтобы избежать отрицательного воздействия на окружающую среду при термической утилизации забитумизированной нефти с торфом, должны использоваться технологии, прописанные в ИТС 9-2015 [14] или ИТС 15-2016 [15].

Наряду с механической срезкой нефтезагрязненного торфа на данном этапе проводится и сбор плавающей нефти на поверхности водоемов. Данный этап проводится с помощью *откачки насосами или вакуумными сборщиками нефти* на территории, которую предварительно ограничивают по площади досками и бонами от дальнейшего растекания по водной поверхности (рис. 5). Откачанная нефть затем загружается в специальные машины и отвозится на полигоны для утилизации. Результат проведенных работ обычно очень нагляден (рис. 6). Тем не менее во время



Рис. 5. Откачка жидкой нефти с водной поверхности. Видно боновое ограждение (фото В.С. Королева)



Рис. 6. Разница между частью водоема, где была произведена откачка жидкой нефти (слева) и местом, где еще не была выполнена очистка (справа) (фото В.С. Королева)



Рис. 7. Пример «радужной» пленки, которая допустима как остаточный элемент после проведения работ по рекультивации (фото В.С. Королева, 2021 г.)



Рис. 8. Вакуумный нефтесборщик АКН-10 [12]

проведения работ необходимо также исключить вторичное загрязнение.

Однако данная методика все же допускает наличие некоторого количества углеводородов на поверхности воды. Из-за технической невозможности стопроцентной очистки, например, в Стандарте АО «Самотлорнефтегаз» № СЗ.14-19 указано, что после проведения работ допускается наличие «радужной» оболочки (рис. 7), представляющей собой очень тонкую пленку плавающих углеводородов. Это обстоятельство требует разработки дополнительных способов очистки воды даже от тонкой «радужной» пленки.

Важным этапом при использовании целого ряда химических, физико-химических и биологических методов очистки от нефтяных загрязнений является *механическое перемешивание (запашка)*, как показано ниже. Запашка представляет собой предварительный этап перед промывкой нефтезагрязненных и засоленных грунтов с целью рассоления, механическое перемешивание используется и в процессе промывки.

Этот способ заключается в глубоком перепахивании поверхностного слоя почвы или иных грунтов. В результате загрязнители, находящиеся в поверхностном слое, перемешиваются с более глубокими слоями и равномерно распределяются в пахотном горизонте. Этот способ применим при наличии нефтяных загрязнений небольшой концентрации лишь в поверхностном горизонте и отсутствии их в нижележащих слоях. Концентрация загрязнений в пахотном слое после запашки не должна превышать допустимую для растений, а гумусовый горизонт должен быть достаточно мощным.

Для ликвидации поверхностных разливов нефти применяют *вакуумные сборщики* различных типов (рис. 8). Они представляют собой передвижные установки, снабженные устройством захвата нефти (поплавочного типа или иные), вакуумным насосом и цистерной для сбора нефти.

Для сбора нефти с водной поверхности используются *скиммерные установки* разных конструкций, мощности и

производительности: от небольших ручных скиммеров (рис. 9, а) до крупных стационарных или плавающих высокопроизводительных скиммеров (рис. 9, б) используемых для ликвидации крупных аварийных разливов нефти на водных акваториях – морских, речных или озерных (водохранилищ).

### ОЧИСТКА ГРУНТОВ ОТ ГЛУБИННЫХ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ►

Удалять нефтяные загрязнения на глубине от поверхности земли значительно сложнее. Для этого применяют различные специальные методы: гидродинамические, электрокинетические и др.

**Гидродинамические методы** очистки от нефтяных загрязнений используются в виде дренажа, откачки, шунтирования, фильтрования и т.п., но в любом случае их удаление происходит с фильтрующим потоком жидкости. Гидродинамическое воздействие эффективно сочетается с другими методами очистки.

Наиболее простые гидродинамические методы реализуются с помощью



Рис. 9. Ручной щеточный скиммер-нефтесорбщик «СОр» (а) и плавающий скиммер-катамаран КН-1 (б) [12]

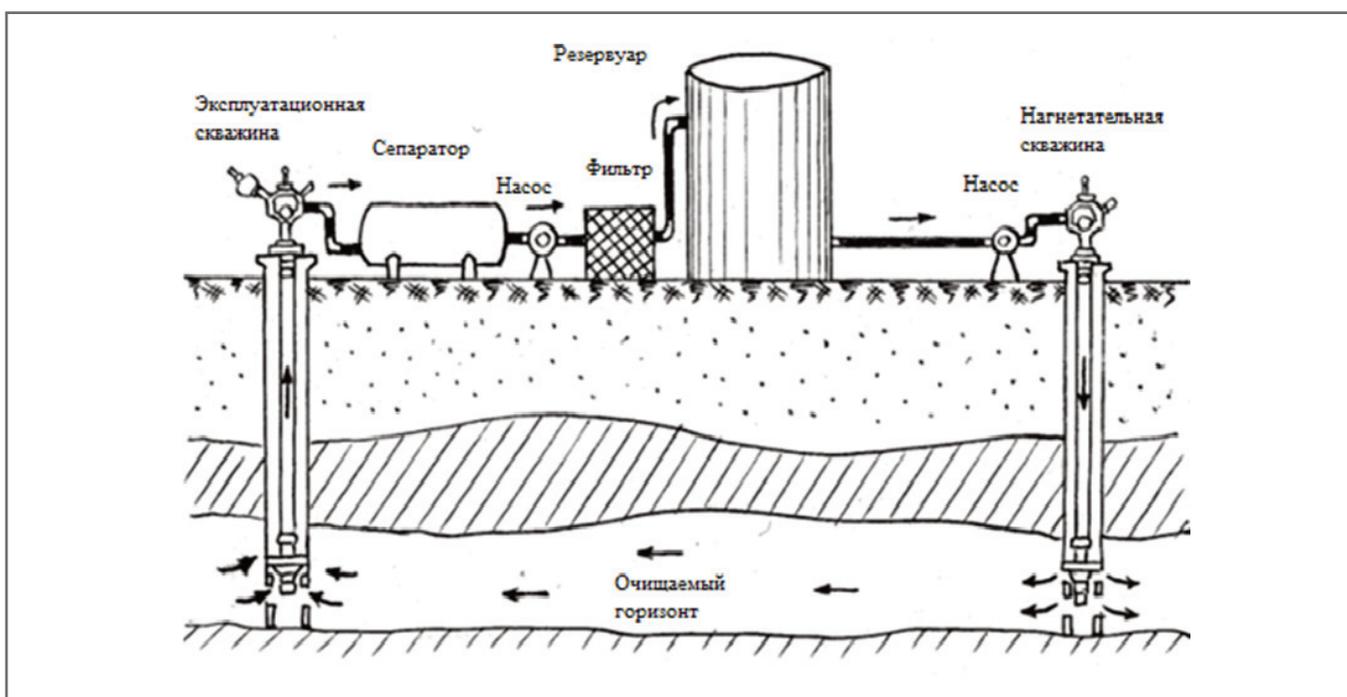


Рис. 10. Схема замкнутого цикла очистки водоносного горизонта от нефтяных загрязнений методом откачки в промывном режиме [12]

различных систем *дренажа*. Например, для удаления нефтяных линз применяется горизонтальный дренаж.

Широко известным методом удаления нефтяного загрязнения вместе с водой является *откачка*. Она может применяться самостоятельно и в сочетании с другими методами для всех типов загрязняющих веществ (включая нефть и иные углеводороды), содержащихся в подземных водах. Откачка проводится с помощью специально оборудованных скважин или иглофильтровых установок, в том числе в промывном режиме (рис. 10).

Наиболее эффективным при извлечении нефтепродуктов является метод совместной откачки. При использовании этого метода скважина оборуду-

ется двумя насосами, нижний из которых является понижающим (откачивающим воду), а верхний – извлекающим (откачивающим нефтепродукты). Создаваемая нижним насосом воронка депрессии позволяет увеличить приток нефтепродукта к скважине и повысить эффективность очистных работ. Другим способом повышения эффективности извлечения нефтепродуктов является использование для обсыпки зафильтрованного пространства скважин смеси гравия и олеофильного материала (фторопласта) в соотношении 1:1.

Существенным преимуществом откачки при удалении монолитного нефтяного загрязнения (крупных линз, техногенных нефтяных залежей) является возможность последующего использо-

вания извлеченных нефтепродуктов. В России были разработаны стационарные, передвижные и самоходные установки, позволяющие откачивать нефть и нефтепродукты из техногенных залежей без существенного понижения уровней грунтовых вод. При очистке грунтов и подземных вод от мощного загрязнения нефтью и нефтепродуктами за счет откачки при благоприятных гидрогеологических условиях реально можно извлечь около 30% содержащего в массиве загрязнения.

Для очистки подземных вод от углеводородов может применяться также следующая комбинированная схема: бурят систему скважин, где из внутренней скважины ведется откачка, а во внешние поступают инъекции воздуха

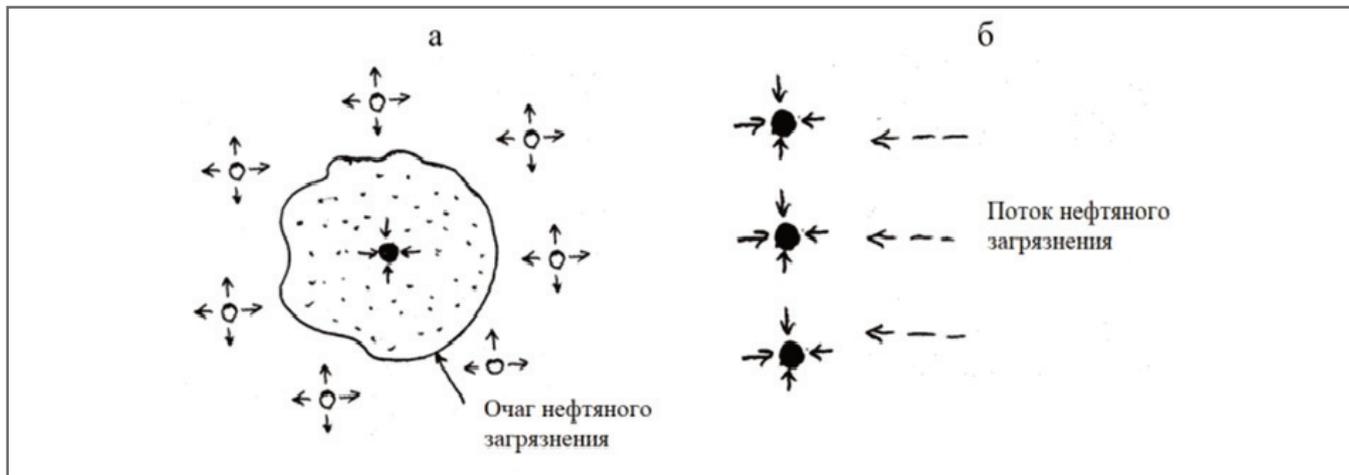


Рис. 11. Варианты применения откачки нефтяных загрязнений (план): а – локализация и удаление очага загрязнения системой нагнетательных скважин; б – перехват нефтяного потока системой скважин [12]

(рис. 11). Комплексная очистка территории от загрязнения нефтепродуктами осуществляется с помощью откачки воды из горизонтальных скважин, последующая очистка воды проводится с помощью химических реагентов.

Общим недостатком откачки является сильное нарушение обводненности массива, что изменяет гидродинамический режим территории и свойства пород, слагающих массив.

**Вакуумное удаление** нефтяных загрязнений применяется довольно широко для извлечения из грунтов летучих газообразных токсикантов (например, из свалок твердых бытовых отходов), а также для ликвидации поверхностных разливов нефти и иных жидких токсикантов [10, 12]

**Термическое удаление** нефтяных загрязнений основано на процессе *термоосмоса*. Этот метод применим лишь для массивов дисперсных или тонкопористых скальных грунтов, в которых возможен этот процесс. Термоосмос представляет собой движение жидкости в тонкопористой среде под действием градиента температуры. Данный процесс был всесторонне исследован Б.В. Дерягиным, который установил, что в основе термоосмоса лежит отличие удельной энтальпии жидкости на поверхности раздела фаз, в тонких порах (капиллярах) и в объеме. При наличии вдоль оси капилляра градиента температуры возникает движение жидкости – термоосмос. Скорость термоосмотического потока пропорциональна перепаду температуры на концах капилляра. Если в поровом растворе в массиве грунта содержатся нефть или иные жидкие углеводороды в виде эмульсии или в парогазовой фазе, то при наличии температурного градиента

в разных частях массива они будут двигаться вместе с термоосмотическим потоком жидкости (или газа) от области с более высокой температурой к области с более низкой температурой. При термоосмосе в не полностью водонасыщенных грунтах передвижение в порах воды или загрязнителя может осуществляться как в жидкой, так и в газовой фазе, то есть за счет термоосмоса могут удаляться и летучие углеводороды – легкие фракции.

**Электрокинетические методы** основаны на применении поля постоянного электрического тока [16]. Под действием приложенной разности напряжений в межэлектродном пространстве массива (между анодом и катодом) возникает электроосмотический поток воды от анода к катоду, вместе с которым в этом же направлении передвигается нефть или иные жидкие углеводороды (в том числе эмульгированные), увлекаемые силами вязкого трения [10]. Этот метод применим для очистки от нефти различных дисперсных грунтов – глинистых, суглинистых, супесчаных, торфяных, илистых, а также почв.

Наряду с удалением нефти и нефтепродуктов из грунтов электрокинетические методы позволяют бороться одновременно и с засолением грунтов, которое часто возникает в местах добычи и транспортировки нефти. Общая схема реализации электрокинетической очистки водонасыщенных глинистых грунтов от нефти и солей электроосмотическим методом показана на рисунке 12. Скважины, служащие анодом и катодом, имеют специальную конструкцию и позволяют одновременно с электроосмотическим фильтратом извлекать содержащиеся в нем загрязнители.

Для борьбы с нефтяными загрязнениями этот метод стал применяться относительно недавно. В конце 1990-х годов В.А. Королевым и М.А. Некрасовой [17] впервые было обнаружено, что в водонефтенасыщенных глинистых грунтах под действием постоянного электрического тока наблюдается диспергация и перемещение жидких углеводородов с электроосмотическим фильтратом преимущественно в катодном направлении. Специфичность электроосмоса в таких системах обусловлена в основном степенью подвижности границы раздела двух несмешивающихся или слабосмешивающихся жидкостей относительно их свободного объема. Вероятно, в этом случае под действием постоянного электрического тока и наличия двойного электрического слоя (ДЭС) на межфазной границе «нефть – вода» в поровом пространстве грунта происходит перемещение ионов ДЭС в одной из жидкостей и вовлечение в течение макрослоев соседней жидкости вследствие вязкого трения.

Характер и интенсивность проявления этих процессов во многом определяются рядом факторов: свойствами грунта, соотношением «вода/нефть», химическим составом порового раствора, его концентрацией и т.д. Существенное влияние на процесс электрохимической миграции нефти оказывает взаимное расположение нефти и воды в структуре порового пространства грунта. Эффект электрохимической миграции нефти проявляется лишь в том случае, если она находится в виде капель в центре пор и со всех сторон окружена водой. Если же нефть находится непосредственно на межфазной границе с минеральной подложкой, а вода – в центре поры, то система ток не прово-

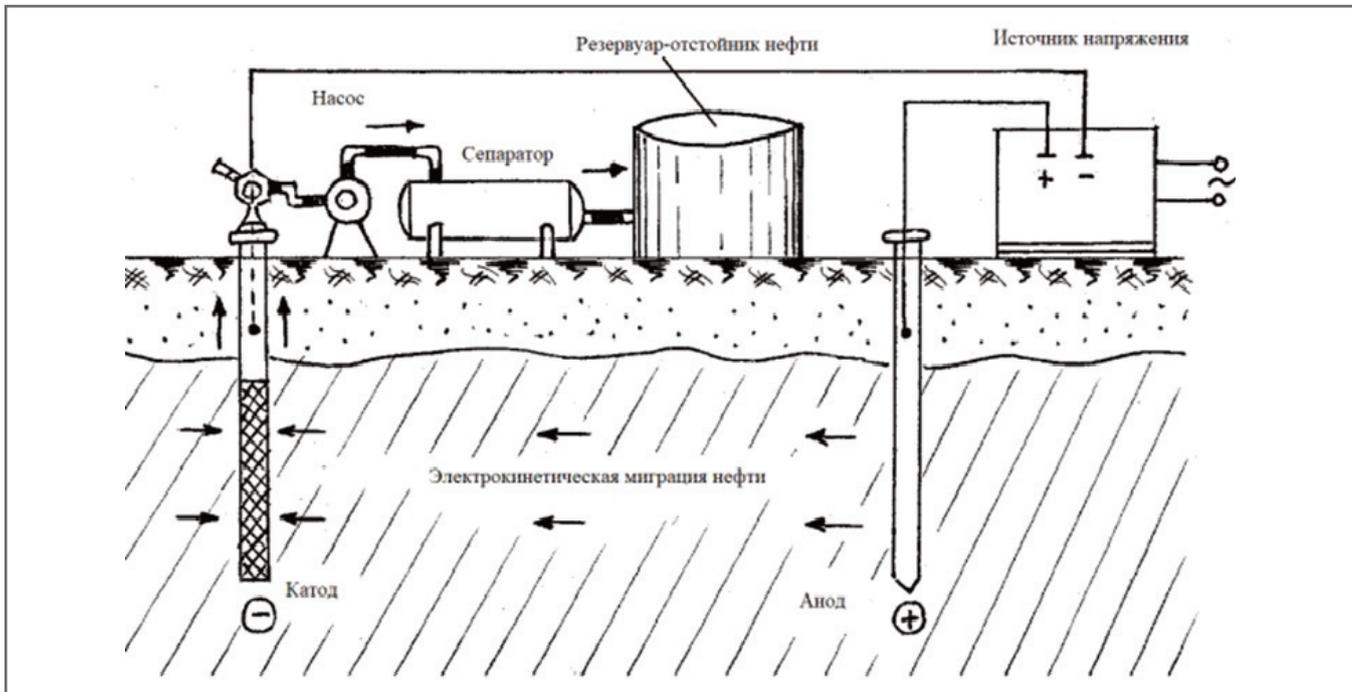


Рис. 12. Общая схема электрокинетической очистки грунта от нефтяных загрязнений [10]

дит и электрохимическая миграция не возникает. По результатам экспериментов были получены зависимости, отражающие влияние этих факторов на интенсивность электрохимической миграции жидких углеводородов в дисперсных грунтах [10, 12]. Также было установлено, что в ходе электрохимической очистки грунта от нефтяных загрязнений существенно меняется pH вдоль оси образца по направлению от анода к катоду. В анодной зоне величина pH снижается до единицы, а в катодной – повышается до 12.

Такое существенное изменение pH среды не может не сказаться на миграционной способности жидких углеводородных загрязнителей и их отдельных компонентов в электрическом поле вследствие того, что нефть, нефтяные загрязнители, машинное масло и другие жидкие углеводороды в той или иной степени растворимы в щелочах. Вследствие этого их миграционная подвижность в щелочной среде вблизи катода в поле постоянного тока существенно увеличивается – в этой зоне углеводороды перемещаются частично в растворенной форме, что облегчает процесс очистки грунта от них.

В целом на эффективность электрокинетической очистки грунтов от нефтяных загрязнений влияет множество различных факторов, изученных нами. Во-первых, эффективность очистки зависит от химико-минерального состава нефтезагрязненных грунтов: с увеличением содержания в грунте глинистых

минералов и снижением количества в них водорастворимых солей эффективность очистки возрастает. Во-вторых, на эффективность очистки влияет гранулометрический состав нефтезагрязненного грунта: чем выше его дисперсность, тем выше эффективность очистки, поскольку с ростом дисперсности возрастает влияние двойного электрического слоя на электроосмос. В-третьих, на эффективность очистки влияют различные физико-химические факторы, обуславливающие физико-химическую активность нефтезагрязненного грунта. Результаты наших исследований показали, что снижение физико-химической активности, оцениваемой числом пластичности ( $I_p$ ), показателями гидрофильности ( $K_h$ ) и коллоидной активности ( $K_a$ ), приводит к уменьшению интенсивности электрохимической миграции и, как следствие, к снижению степени электрокинетической очистки почв от углеводородов. Это обусловлено зависимостью толщины диффузной части ДЭС от физико-химической активности катионов ДЭС, оцениваемой перечисленными показателями. Косвенно эти показатели определяют скорость электроосмотической миграции и ее вклад в суммарный процесс электрохимического массопереноса. В-четвертых, выявлено, что на эффективность очистки грунтов от нефти влияет ее исходное содержание в грунте. Проведенные исследования по изучению влияния соотношений «вода/нефть» на степень очистки почв показали, что с ростом соотношения от

1:0,2 до 1:0,8 степень очистки увеличивается, а при дальнейшем увеличении доли нефти в почве – уменьшается. В-пятых, эффективность электрокинетической очистки нефтезагрязненных грунтов, включая почвы, зависит от pH порового раствора. Выше уже отмечалось, что в щелочной среде происходит частичное растворение нефти и нефтепродуктов, что способствует их удалению с электроосмотическим потоком. В-шестых, на эффективность электрокинетической очистки грунтов (включая почвы) от нефти влияет «возраст» нефтяного загрязнения: свежие загрязнения удаляются более эффективно, чем старые. Это объясняется процессами «старения» нефти, которые обусловлены постепенным испарением из нее легких летучих фракций, которые являются самыми мобильными. Со временем при старении в нефти остаются самые консервативные тяжелые фракции, которые хуже всего удаляются под влиянием электроосмоса.

Для промышленной реализации этой методики на рабочей территории размещается система анодов и катодов. С учетом незначительной глубины загрязнения, она состоит из блоков металлических анодных (А) и катодных (К) электродов (рис. 13, а), расположенных по секциям, которые задавливаются с поверхности, а затем соединяются друг с другом в единую сеть (рис. 13, б). Длина электродов – до 50–60 см, то есть она соответствует глубине проникновения в торф нефти. Расстояние между электро-

дами должно быть от 1,5 до 2 м, расстояние между рядами – до 2 м. Для катодных фильтров электроосмотических электродов применяются специальные пластмассовые трубы с дренажными отверстиями. Они соединяются гибкими шлангами. Откачиваемый электроосмотический фильтрат с углеводородным токсикантом собирается в сепараторе, затем проходит через систему фильтров.

Все это дополнительное оборудование, включая управляющий компьютер, насосы, сепараторы, фильтры и др., размещается в специальном контейнере, который временно устанавливается на очищаемой территории (рис. 14). Контейнер подключается к источнику электричества. Внутри контейнера располагаются насосы, система электропитания, система компьютерного контроля, сепараторы, системы водоочистки и др. (рис. 15). Работы в зависимости от площади участка занимают 15–60 дней, в результате уровень загрязнения уменьшается до 10–15%.

**Химические методы** очистки грунтов от нефтяных загрязнений основаны на применении различных химических реагентов, вступающих с углеводородами в химические реакции, в результате которых нефть и нефтепродукты теряют свою токсичность (происходит их химическая деструкция).

Среди химических методов деструкции углеводородов наиболее широко применяется *известкование*, для которого разработаны различные промышленные технологии, используемые при рекультивации территорий, загрязненных нефтью и нефтепродуктами.

При известковании нефтезагрязненных грунтов (включая почвы) обрабатывается поверхность грунта негашеной

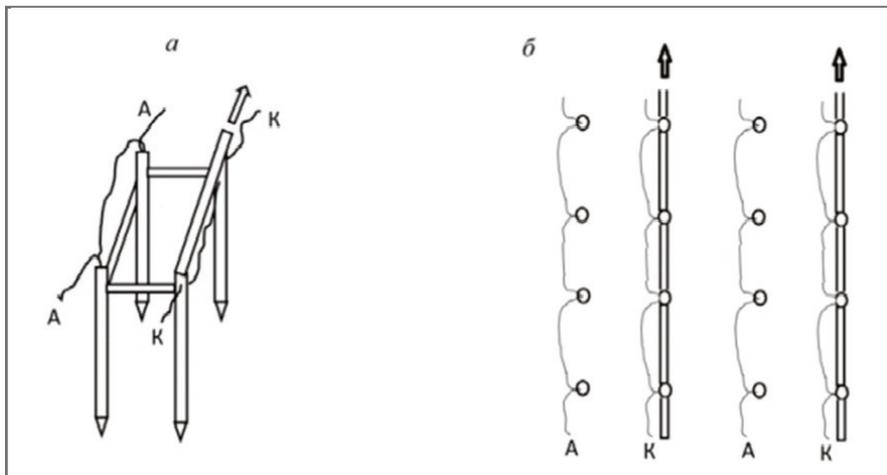


Рис. 13. Схема одной секции (а) и секционного размещения (б, план) электродов для электрокинетической очистки грунтов от нефтяных загрязнений [12]



Рис. 14. Общий вид контейнера с электрокинетическим оборудованием для очистки грунтов от нефтепродуктов на городской территории (фото В.А. Королева)

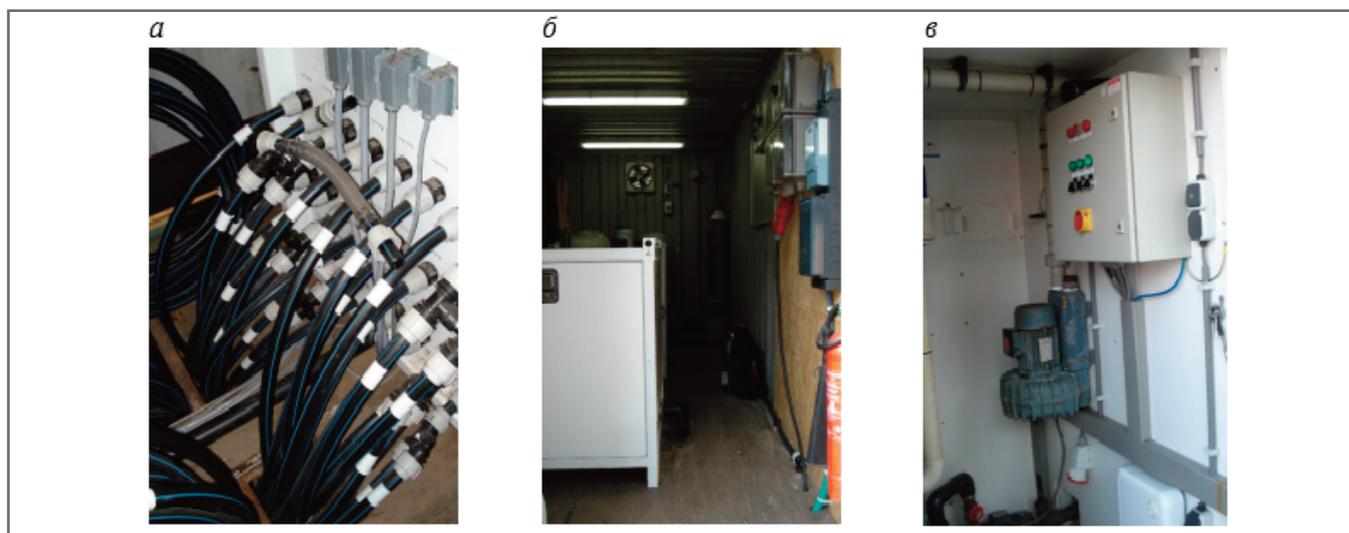


Рис. 15. Внутреннее оборудование контейнера: а – подводящие электрические кабели и шланги; б – общий вид помещения, в – система электрического питания (фото В.А. Королева)

**Таблица 6. Классификация сорбентов, используемых при очистке грунтов от углеводородных загрязнений [19]**

1. Сорбенты по исходному сырью					
неорганические		органические			
Из естественных минералов	Из искусственных неорганических	органоминеральные	Из каоцубиолитов	из природного сырья растительного и животного происхождения и отходов их переработки	синтетические
пески, глины и т.п.	перлит, керамзит, силикагель и т.п.	сапропель, сланцы, нефтешламы	торф, уголь, графит и т.п.	мох, листва, кора, опилки, сено, солома, шелуха от переработки зерновых, макулатура	полипропилен, полиуретан, тефлон, фенол-формальдегидные пенопласты
2. Сорбенты по дисперсности					
дисперсные			формованные		
мелкодисперсные	крупнодисперсные	волокнистые	прессованные	-	
порошки	крошка, гранулы хлопья	Тканые и нетканые материалы	плиты	сорбирующие боны, подушки, маты с оболочкой из проницаемого материала	
3. Сорбенты по характеру смачивания					
гидрофильные		безразличного смачивания		гидрофобные	
статический угол смачивания материала сорбента водой меньше 90°		статический угол смачивания материала сорбента водой примерно равен 90°		статический угол смачивания материала сорбента водой больше 90°	
4. Сорбенты по плавучести					
высокой плавучести (более 72 ч)		ограниченной плавучести (3–72 ч)		Неплавучие (до 3 ч)	
5. Сорбенты по пористой структуре					
непористые	крупнопористые	мезопористые	мелкопористые	гетеропористые	
-	Радиус кривизны пор более 200 нм	Радиус кривизны пор 1,5–200 нм	Радиус кривизны пор менее 1,5 нм	радиус кривизны пор меняется в широком диапазоне	

известью (0,5–5% от количества занесенного нефтепродукта). Известь за счет адгезии хорошо взаимодействует с нефтями и битумами, в результате чего образуется твердый продукт, который удерживает нефтепродукты в виде комплексных соединений. При нефтяном загрязнении в грунте снижается количество поглощенного кальция и магния, а внесение извести улучшает агрохимические свойства почв и ускоряет разложение метано-нафтеновых структур.

Для известкования применяются различные горные породы – мел, мергель, молотый известняк, доломитовую муку и др. Наряду с этим в последнее время для известкования грунтов стали широко применяться известьсодержащие отходы свеклосахарного производства.

Известкование применяется и в комбинации с другими методами, в частности с биологическими. При этом необходимо также вносить минеральные удобрения для увеличения активности природной микрофлоры [18].

**Физико-химические методы** очистки грунтов от нефти и нефтепродук-

тов основаны на различных физико-химических процессах, происходящих на границах фаз грунта, – адсорбции, ионном обмене и др.

Среди физико-химических методов локализации нефти и нефтепродуктов наиболее широко применяются *сорбционные методы*. Эти методы применимы в основном для борьбы с плавающей нефтью на акваториях, а также с поверхностными разливами нефти. Классификация сорбентов, применяемых для очистки грунтов от нефти, показана в таблице 6.

В качестве сорбентов применяются различные искусственные и природные материалы: модифицированный торф, активированный уголь и отходы его производства, гидролизные лигнин и бурый уголь, брусит, известь, высокодисперсные грунты (глинистые, торфяные, цеолиты и др.), мох, а также древесные опилки, сечка пшеницы и камыша, каучуковая и кокосовая крошка, отходы шерстяной промышленности, базальтовое волокно, сорбенты на основе пенополистирола, по-

липропилена, поролона, синтепона и многое другое.

При оценке эффективности сорбентов обычно руководствуются тремя критериями – нефтеемкостью, влагоемкостью и плавучестью. Оценка эффективности может быть определена согласно ТУ 214-10942238-03-95 [20].

В России и других странах выпускается много промышленных искусственных сорбентов нефтепродуктов («Профсорб», «Профсорб-Ультра», Spill-Sorb, GO, «С-ВЕРАД», «АКВА-ВЕРАД», «Нью-Сорб», «Пирсорб», «Экосорб», «ЛАРН» и многие другие).

Среди сорбентов различают:

- 1) рассыпные (органические, неорганические и синтетические);
- 2) заключенные в оболочку (в сетчатые материалы);
- 3) сплошные (синтетические, в основном полипропилен);
- 4) волокнистые (на основе полипропилена).

Сорбенты очень эффективны при аварийной очистке от нефти. В таких случаях используют торф, органиче-

ский сапропель, молодые бурые угли. Получают сорбенты также из коры, жмыха, смолы. Все они подвергаются гидрофобизации.

Достоинством метода является повсеместное распространение природных сорбентов и возможность последующего извлечения из них собранных нефтепродуктов [21–23].

**Биологическая очистка грунтов** от нефтяных загрязнений основана на способности самовосстановления экосистем за счет естественных биоценозов, способности многих организмов разлагать (путем биодеструкции) или аккумулировать в своей биомассе углеводороды [10]. Механизм самовосстановления экосистемы после нефтяного загрязнения достаточно сложен. Процесс естественного самоочищения почвы под влиянием природной микрофлоры является длительным (более 10–25 лет) и зависит от физико-химических свойств почвы и нефти. Сокращение этого периода достигается путем применения системы биологической рекультивации, включающей в себя комплекс агротехнических мер рыхления, известкование, внесение сорбентов и удобрений, то есть механические и химические способы.

Методы микробиодеградации нефтяных загрязнителей основаны на деструкции токсичных загрязняющих компонентов различными видами микроорганизмов. Эффект достигается за счет:

- 1) либо активизации аборигенной микрофлоры;
- 2) либо внесения в грунт определенных культур микроорганизмов, а также всевозможных комплексных препаратов и методов.

*Методы очистки грунтов активизацией микрофлоры* основаны на активизации микрофлоры, уже существующей (аборигенной) в почве или ином грунте. В результате этой активизации микроорганизмы начинают активно поглощать загрязнитель и вызывать его деструкцию. Методы активизации аборигенной микрофлоры направлены на создание оптимальной среды для развития определенных групп микроорганизмов, разлагающих нефтяной загрязнитель. Эти методы могут быть использованы везде, где естественный микробиоценоз сохранил жизнеспособность и достаточное видовое разнообразие. Очистка за счет активизации микрофлоры является медленным, но очень эффективным процессом.

Простейшими способами активизации микрофлоры являются механические способы. Рыхление снижает дефицит кислорода и разрушает гидрофобную пленку поверхностных нефтяных компонентов, тем самым реально ускоряя физико-химическую и микробиологическую деструкцию нефти. Возможно также выделение из загрязненной среды микроорганизмов – деструкторов нефти и наращивание их биомассы в лабораторных условиях с последующим внесением в почву. Кроме того, можно увеличить численность микроорганизмов в природных условиях, используя замкнутую систему циркуляции воды, содержащей кислород и питательные вещества, необходимые для их жизнедеятельности, и проветривания почвы по вентиляционным каналам. Широко применяется внесение готовых биопрепаратов, содержащих углеводородпоглощающие микроорганизмы, не имеющие отношения к микробной биоте загрязненного участка. Но в настоящий момент нет доступных методов отслеживания процесса взаимодействия внесимых микроорганизмов с естественной микрофлорой.

Для удаления из массивов грунтов летучих углеводородов через горизонтальные скважины вместе с воздухом подается газообразная питательная смесь. Другим вариантом этого метода является разбрызгивание микрокапель питательного раствора. Высокую эффективность имеет активизация углеводородоксилирующих микроорганизмов за счет закачки в грунты химически активных пен благодаря их комплексному воздействию: улучшению условий дыхания, оптимизации баланса питательных веществ, а также увеличению подвижности и доступности водонерастворимых органических загрязнений.

Активизация биодegradации в нефтезагрязненных почвах и грунтовых водах достигается за счет внесения минеральных удобрений [24]. Однако необходимо отметить, что реакция микроорганизмов сильно варьирует в зависимости как от конкретного загрязнителя, так и от свойств добавки. Был опыт закачки в загрязненный нефтью грунт обогащенных нитратами (до 0,5 г/л) сточных вод для активизации биодegradации. При этом концентрация алифатических соединений снизилась с 1,5 до 0,5 мг/л, ароматических – с 5,0 до 0,5 мг/л. При внесении азота в дозе 600 кг/га степень degradation нефтяных углеводородов в целинных почвах возросла в среднем на 45% [24]. Моче-

вина и мочевины, покрытая серой, ускоряют биодegradацию нефти с 14,8 до 58,6% за 21 сутки, что применяется на железнодорожных магистралях и на дренированных песчаных почвах. В серых лесных почвах наиболее эффективно биодegradацию ускоряет комплекс азотных, фосфорных, калийных удобрений и перегноя [24]. Для активизации микрофлоры с целью очистки от хлорсодержащих растворителей также применяются добавки в воду азота, кислорода и метана.

Одним из методов, обеспечивающих диспергацию нефти и вследствие этого улучшающих ее контакт с микроорганизмами, является внесение поверхностно-активных веществ (ПАВ). Мощные вещества вымывают мазут из почвы вместе с водой и влияют на активность микроорганизмов, но повышение концентрации ПАВ до 5% вызывает угнетение микрофлоры.

Эмульгатор нефти ЭПН-5 стимулировал численность спорообразующих грибов и бактерий при дозе 20–40%, а увеличение дозы до 60–100% приводило к их угнетению. С целью активизации биодegradации нефти в почве применяются также ПАВ-С1, неонол АФ-14, ПАВ ОП-10, полиакрилонитрил.

Хлористый калий улучшает экстракцию нефти из почвенных агрегатов в раствор.

Сочетание применения ПАВ с внесением минеральных удобрений, особенно аммонийных форм азота и фосфора, ускоряет биодegradацию нефти [24].

При поверхностном нефтяном загрязнении можно использовать препарат «Фаерзайн», содержащий ферменты, активизирующие микрофлору. Мощность слоя обработки без выемки грунта – 30–40 см, срок очистки – около 4 недель. Препарат вносится с помощью брандспойга из машины, желательна также обработка грунта рыхлением. Используют «Фаерзайн» и для очистки вод и донных осадков.

Активное влияние на биодegradацию нефти в почвах оказывают сточные воды ферм, однако в каждом конкретном случае должно быть дано экологическое обоснование.

Ускоряют биодegradацию нефти также целлюлозосодержащие отходы – солома, опилки. Эффективным является внесение опилок со стимуляторами разложения нефти [24].

В результате исследования способности почв к самоочищению установлено, что тяжелые фракции нефтепродуктов в почве являются стойкими и

мало подвергаются деструктивным изменениям.

Методы очистки грунтов внесением культур микрофлоры применяются в тех случаях, когда необходимая аборигенная микрофлора отсутствует. Они могут использоваться при массивном и аварийном нефтяном загрязнении, в сложных условиях, при отсутствии развитого естественного биоценоза.

Часто для борьбы с нефтяными загрязнениями применяют комплексные биопрепараты, которые содержат не только целый набор культур, но и питательные вещества. В последнее время именно разработка искусственных биопрепаратов – деструкторов углеводородов получила во всем мире широкое распространение.

Нефтезагрязненные почвы и иные грунты обрабатывают такими микробными сообществами, как *Acinetobacter sp.*, *Alcaligenes sp.*, *Pseudomonas sp.*, одновременно вносят растворы фосфорных и аммонийных солей. Нефть на поверхности почвы уничтожают *Actinomyces elegans* и *Geotrichum marinum* [24]. Использование *Actinebacter sp.* дает 80%-ный эффект очистки от ароматических соединений по истечении пяти недель. Для деструкции нефти выделены штаммы галотолерантных и галофильных археобактерий. В условиях относительно высоких температур можно использовать *Bacillus thero-moleovorans*. Бактерии *Streptomyces al-biaxialis* разлагают углеводороды нефти при содержании соли до 30%, эффективность при оптимальной температуре 28–30 °С достигает 50%. Деградиацию ароматических углеводородов осуществляют некоторые виды *Mycobacterium*, а также вид *Pseudomonas alcaligenes*, который разлагает и галоуглеводороды.

Биодеградиация нефтяных загрязнений применяется в комплексе с другими методами борьбы с углеводородными загрязнителями.

В сложных случаях наиболее эффективна очистка комплексными биопрепаратами. При нефтяном загрязнении они используются наиболее широко. Рабочие растворы биопрепаратов готовятся на месте на специальных станциях (рис. 16).

Сроки проведения технического этапа рекультивации определяются органами, предоставившими землю и давшими разрешение на проведение работ, связанных с нарушением почвенного покрова, на основе соответствующих проектных материалов и календарных



Рис. 16. Блок для приготовления рабочих растворов биопрепаратов (источник фото: www.newchemistry.ru)

Таблица 7. Сроки проведения работ по ликвидации последствий разлива нефтепродуктов и время начала технического этапа рекультивации [25]

Время загрязнения в текущем году	Окончание технического этапа
Осень – зима	Первая весна через год после загрязнения
Весна – лето	Весна следующего года

планов. Время окончания технического этапа зависит от времени загрязнения. Ориентировочно его можно прогнозировать по таблице 7.

Биологический этап осуществляется после полного завершения технического этапа по восстановлению плодородного слоя почвы в соответствии с ГОСТ 17.5.3.06-85 [26] и в комплексе с механическими методами. При проведении данного этапа должны быть учтены требования к рекультивации земель по направлениям их использования.

На сильно загрязненных участках для ускорения процесса биодеградации нефтепродуктов могут вноситься биологические препараты, по которым есть разрешения государственных служб (таблица 8). Использовать препараты следует согласно инструкции по их применению и по технологии, согласованной с местными органами Федерального агентства кадастра объектов недвижимости. Необходимым условием для успешной переработки нефти и нефтепродуктов нефтеокисляющими бактериями является величина активной реакции (рН) почвы – рН должен быть не меньше 6.5.

Количество новых биопрепаратов растет с каждым годом. Так суспензия, содержащая *Pseudomonas*, *Nocardia*, *Flavobacterium* и *Candida*, практически полностью очищает от нефти верхние 20 см почвы за 7 лет. Смесь *Candida*

*matlosa*, ВКМУ-1506, *Pseudomonas sp.* и бактерии № 15 в питательной среде также разлагает нефтяное загрязнение. Можно использовать препарат Noggies предназначенный для разложения в почве мазута, дизельного топлива, бензина, керосина, различных фенолов и формальдегидов.

Препарат Hydrobas за пять дней снижает загрязнение на 60%, однако массив нужно держать постоянно увлажненным. Биопены фирмы Biodetox проникают на глубину 30–40 см, разлагая керосин, бензин, натуральные масла. Готовые биопены хранятся очень долго. Внесение в почву отходов дрожжевого производства в 2–10 раз увеличивает разложение нефти. То же установлено и для молочной сыворотки. Также используется активный ил и белково-витаминный концентрат – особо обработанная масса дрожжей родов *Candida*, *Rhodotoruba*.

Эффективным является применение *Candida guilliermondii* с целлюлозоразрушающим субстратом [24]. Биопрепарат с сочетанием дрожжей и актинобактерий за 4 дня снижает на 40–60% содержание гексадекана, парафинов, сырой нефти в воде с соленостью до 12 г/л.

Препарат «Родер» используется для очистки вод (в дозе 0,1 кг/м<sup>2</sup>), а также почв и других грунтов (в дозе 1 кг/м<sup>2</sup>) от 0,1–0,5% нефтяного загрязнения. В России для очистки почв от нефти

Таблица 8. Сводная таблица показателей биопрепаратов [27]

Показатель	Биопрепарат		
	«Путидойл»	«Деворойл»	«Биоприн» («Олеворин»)
Исходный материал	Природный штамм «Псевдомоном путида»	Микроорганизмы	Штамм «Олеворум»
Вид	Порошок	Порошок	Порошок
Среда нефтеокисления	Вода, почва	Вода, почва	Вода, почва
Максимальное содержание нефти и нефтепродуктов в воде (г/л)	20	н/о	н/о
Срок хранения (мес.)	12	н/о	12
Удобрение	«Нитроаммофос»	«Диаммофос»	«Диаммофос», «аммофос»
Рабочие температуры, °С)	от +10 до +40	от +10 до +40	от +1 до +35
Продолжительность обработки (дней)	24	н/о	24
Разработчик	ЗапсибНИГНИ, г. Тюмень	НПП «Биотехинвест», г. Москва	ВНИИсинтезбелок, г. Санкт-Петербург



Рис. 17. Проведение работ по мульчированию торфом с использованием экскаваторов (фото В.С. Королева)



Рис. 18. Внесение на поверхность торфа гумата натрия (фото В.С. Королева)

также применяются «Деворойл», «Дестройл», «Биоприн» («Олеварин»), «Путидойл», «Универсал», «Суперкомпост ПИКСА», «Охримин» и другие биопрепараты [10].

Биологическая рекультивация в промышленных масштабах обычно является заключительной стадией восстановления нефтезагрязненных грунтов, поскольку большинство микроорганизмов, применяемых для очистки, не может «справиться» с большой концентрацией нефти и нефтепродуктов.

Согласно разным нормативным документам (например, по положению АО «Самотлорнефтегаз» № ПЗ.15-10 [28]) к данному виду работ относятся:

- 1) агротехническая обработка участка, мульчирование участка торфом;
- 2) агрохимическая обработка участка жидкими и сыпучими препаратами;
- 3) работы по фитомелиорации.

Необходимые требования, проводимые операции, а также объемы выполняемых работ излагаются в плане производства работ (ППР) для конкретного участка. Работы могут длиться несколько месяцев. Вначале происходит агротехническая обработка участка. Данный рекультивационный процесс включает в себя фрезерование, дискование, вспашку или рыхление ручным или механизированным способом верхней части почвы, подпочвенного грунта, торфяной залежи на глубину не менее 30 см. Задача – перемешать обнажившийся после срезки торфяной слой, чтобы уменьшить или рассредоточить концентрацию содержания нефтепродуктов. Данные виды работ также относятся к механическим способам очистки [10].

Основным видом работ на этом этапе является мульчирование торфом. На место срезанных нефтезагрязненных

торфяных слоев помещается привезенный на самосвалах чистый торф (или чистая почва). Поверх перекопанных ранее слоев осуществляется разбрасывание торфа ручным или механизированным способом с созданием равномерного слоя, имеющего толщину согласно проекту рекультивации или ППР (в местах, установленных проектом рекультивации или ППР) (рис. 17). Одной из важнейших задач на данной стадии является планировка территории.

Агрохимическая обработка участка жидкими и сыпучими препаратами (например, гуматом натрия) проводится с целью повышения плодородия, насыщения грунтов питательными компонентами для биоты (рис. 18) и сыпучими препаратами для повышения pH среды (рис. 19).

Например, среди жидких препаратов на Самотлорском месторождении для рекультивационных работ чаще всего



Рис. 19. Внесение доломитовой муки на поверхность торфа (фото В.С. Королева)



Рис. 20. Работы по фитомелиорации – посев семян ручным способом (фото В.С. Королева)



Рис. 21. Вид зоны участка работ до (а) и после (б) фитомелиорации (фото В.С. Королева)

используют гумат натрия (в концентрации 20%). Среди сыпучих реагентов используется доломитовая мука, селитра аммиачная, нитроаммофоска и нитроазофоска. Внесение всех этих реагентов также способствует активизации аборигенной микрофлоры – существующие в торфе микроорганизмы начинают активно размножаться, а метанотрофные и нефтетрофные бактерии начинают разлагать углеводороды. Таким образом на этой стадии также начинается и микробиологическая очистка.

Использование сыпучих препаратов необходимо, потому что под воздействием нефти изменяются свойства торфа и иных загрязняемых грунтов. Происходит утяжеление грунта в результате заполнения порового пространства торфа нефтью, изменяется гранулометрический состав, нарушается водно-воздушный режим вследствие вытеснения порового воздуха нефтью. Также, отмечается процесс закупоривания порового пространства, что влияет на изменение гидрофизических характеристик торфа,

происходит снижение значений влагоемкости, водонепроницаемости. И, как следствие, возникает анаэробизм, который вызывает образование органических кислот и снижение рН. Поскольку многим растениям некомфортно существовать в кислой среде, то рекультивация включает в себя стадию восстановления уровня рН.

Конечный процесс на этапе биологической рекультивации – работы по *фитомелиорации*. Данный вид производственной стадии включает в себя посев обработанной смеси семян с использованием специальной техники или ручную с одновременным внесением удобрений и заделку семян в почву механизированным или ручным способом (при необходимости) (рис. 20).

Для борьбы с нефтяными загрязнениями используются следующие направления *фиторемедиации* [24]:

1) *фитозэкстракция* – поглощение, транслокация и аккумуляция нефтяного загрязнителя в растении (для рекультивации окружающей среды этим мето-

дом применяют растения-гипераккумуляторы;

2) *фитостабилизация* – перевод нефтяных веществ из растворимой формы в нерастворимую в корневой зоне растений;

3) *фитодеградация* – «внутреннее» разрушение нефтяных поллютантов растениями при участии растительных ферментов.

Наиболее распространенными культурами при фитомелиорации нефтезагрязненных грунтов, например на Самолорском месторождении, являются семена овса, ржи и смеси многолетних трав. Основная проблема заключается в том, что многие травы не приспособлены к данным климатическим условиям (хотя их выбор с учетом климата регламентирован правилами). Тем не менее результат работ по фитомелиорации наглядно виден уже в течение 1–2 недель в зависимости от погодных условий (рис. 21).

Заключительный этап фитомелиорации состоит в уборке территории. Во вре-

мя данного производственного процесса разбираются постеленные и проложенные ранее насыпные и лежневые дороги.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

В результате приведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Очистка геологической среды от нефтяных загрязнений вдоль трасс нефтепроводов представляет собой актуальную и сложную проблему.

2. Изложенное в статье показывает, что из имеющихся сейчас в арсенале способов очистки грунтов от нефтяных загрязнений вдоль трасс нефтепроводов *ни один не является универсальным*. В этой связи весьма актуальны разработка и применение *комплексных методов* очистки от нефтяных загрязнений, позволяющих добиться наилучших результатов.

3. Методы очистки грунтов от углеводородных загрязнений должны учи-

тывать различные формы нахождения в грунтах нефтяных загрязнений и их «возраст».

4. Важнейшим региональным фактором, который необходимо учитывать при очистке грунтов от углеводородных загрязнений, является наличие или отсутствие многолетнемерзлых грунтов. Методы очистки внутри и вне криолитозоны существенно различаются. **И**

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова. Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.

The study was conducted under the state assignment of Lomonosov Moscow University. This work was supported in part by M.V.Lomonosov Moscow State University Program of Development. The authors acknowledge (partial) support from M.V.Lomonosov Moscow State University Program of Development).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ►

1. Гольдберг В.М. и др. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия. М., 2001. 322 с.
2. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984. 262 с.
3. Лодоло А., Гречищева Н.Ю., Мещеряков С.В. и др. Технологии восстановления почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. М.: РЭФИА, НИА-Природа, 2003. 258 с.
4. Ананьева Г.В., Дроздов Д.С., Инстанес А., Чувилин Е.М. Нефтяное загрязнение слоя сезонного оттаивания и верхних горизонтов многолетнемерзлых пород на опытной площадке «Мыс Болванский» в устье р. Печора // Криосфера Земли. 2003. Т. VII. № 1. С. 49–59.
5. Ершов Э.Д., Чувилин Е.М., Смирнова О.Г., Налетова Н.С. Экспериментальные исследования взаимодействия нефти с криогенными породами // Материалы Первой конференции геокриологов России. М., 1996. Книга 2. С. 298–320.
6. Biggar K.W. The effects of petroleum spills on permafrost // Proc. of conf. at the Royal Military College of Canada “Hydrocarbon Remediation in Cold and Arctic Climates”, Kingston, Ontario. Kingston: Federal Government Printer, 1995. P. 2–11.
7. Biggar KW., Haidar S., Nahir M., Jarrett P.M. Site investigations of fuel spill migration into permafrost // J. Cold Regions Eng. 1998. Vol. 12. № 2. P. 84–104.
8. Гречищев С.Е. Вечная мерзлота и загрязнение территорий // Криосфера Земли. 2003. Т. VII. № 1. С. 89–90.
9. Нефедьева Ю.А. Роль трансформации нефтяного загрязнения в изменении свойств грунтов слоев сезонного оттаивания и сезонного промерзания: автореф. дисс. ... к. г.-м. н. М.: геологический факультет МГУ, 2010. 24 с.
10. Королев В.А. Очистка грунтов от загрязнений. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 365 с.
11. Артемов А.В. Современные технологии очистки от нефтяных загрязнений // Нефть. Газ. Промышленность. 2004. № 5. С. 24.
12. Королев В.А. Очистка и восстановление геологической среды: учебное пособие для вузов. М.: ООО «Сампринт», 2019. 430 с.
13. Королев В.А. Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем: учебное пособие (2-е изд.). М.: КДУ, 2015. 416 с.
14. ИТС 9-2015. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Обезвреживание отходов термическим способом (сжигание отходов). М.: Бюро НДТ, 2015. 258 с.
15. ИТС 15-2016. Утилизация и обезвреживание отходов (кроме обезвреживания термическим способом (сжигания отходов)). М.: Бюро НДТ, 2016. 208 с.
16. Королев В.А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение (изд. 2-е, перераб. и доп.). Москва: КДУ, 2023. 498 с.
17. Королев В.А., Некрасова М.А. Очистка глинистых грунтов от углеводородных загрязнений с помощью электрического тока // Труды Международной научно-практ. конференции «Инженерно-геологическое обеспечение недропользования и охраны окружающей среды». Пермь: ПГУ, 1997. С. 70–72.
18. Обобрин А.А., Калачникова И.Г., Масливец Т.А. и др. Нефтяное загрязнение почвы и способы рекультивации // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду. М.: Наука, 1987. С. 284–291.
19. Аренс В.Ж. и др. Очистка окружающей среды от углеводородных загрязнений. М.: Интербук, 1999. 373 с.
20. ТУ 214-10942238-03-95. Оценка эффективности сорбента. М.: Стандартиформ, 1995. 16 с.

21. Гридин О.М. О нефтяных разливах и спасательных сорбентах // Нефть и бизнес. 1996. № 5. С. 10.
22. Гридин О.М. Как выбирать нефтяные сорбенты // Экология и промышленность России. 1999. № 9. С. 18–20.
23. Каменщиков Ф.А., Богомольный Е.И. Нефтяные сорбенты. Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2003. 268 с.
24. Киреева Н.А. Микробиологические процессы в нефтезагрязненных почвах. Уфа: Башк. гос. ун-т, 1994. 172 с.
25. РД 39-00147105-006-97. Инструкция по рекультивации земель, нарушенных и загрязненных при аварийном и капитальном ремонте магистральных нефтепроводов. М.: Транснефть, 1997. 22 с.
26. ГОСТ 17.5.3.06-85. Охрана природы. Земли. Требования к определению норм снятия плодородного слоя почвы при производстве земляных работ. М.: Изд-во стандартов, 2002. 4 с.
27. РД 153-39.4-074-01. Инструкция по ликвидации аварий и повреждений на подводных переходах магистральных нефтепродуктопроводов. М.: Минэнерго, 2001. 70 с.
28. Стандарт АО «Самотлорнефтегаз» № ПЗ-05 С-0223 ЮЛ-413 «Нормативы качества рекультивации земель, загрязненных нефтью и нефтепродуктами». Нижневартовск, 2018. 84 с.

## REFERENCES ►

1. Gol'dberg V.M. i dr. Tekhnogennoe zagryaznenie prirodnykh vod uglevodorodami i ego ehkologicheskie posledstviya [Man-made pollution of natural waters with hydrocarbons and its environmental consequences]. M., 2001. 322 s. (in Rus.).
2. Gol'dberg V.M., Gazda S. Gidrogeologicheskie osnovy okhrany podzemnykh vod ot zagryazneniya [Hydrogeological foundations for protecting groundwater against pollution]. M.: Nedra, 1984. 262 s. (in Rus.).
3. Lodolo A., Grechishcheva N.YU., Meshcheryakov S.V. i dr. Tekhnologii vosstanovleniya pochv, zagryaznennykh нефтью i нефтепродуктами [Technologies for restoring soils contaminated with oil and oil products]. M.: REHFIA, NIA-Priroda, 2003. 258 s. (in Rus.).
4. Anan'eva G.V., Drozdov D.S., Instanes A., Chuvilin E.M. Neftyanoe zagryaznenie sloya sezonnogo ottaivaniya i verkhnikh gorizontov mnogoletnemerzlykh porod na opytnoi ploshchadke «Mys Bolvanski» v ust'e r. Pechora [Oil pollution of the seasonal thawing layer and upper horizons of permafrost rocks at the Mys Bolvansky experimental site at the mouth of the Pechora River] // Kriosfera Zemli. 2003. T. VII. № 1. S. 49–59. (in Rus.).
5. Ershov Eh.D., Chuvilin E.M., Smirnova O.G., Naletova N.S. Ehksperimental'nye issledovaniya vzaimodeistviya nefiti s kriogennymi porodami [Experimental studies of interacting oil with cryogenic rocks] // Materialy Pervoi konferentsii geokriologov Rossii. M., 1996. Kniga 2. S. 298–320. (in Rus.).
6. Biggar K.W. The effects of petroleum spills on permafrost // Proc. of conf. at the Royal Military College of Canada “Hydrocarbon Remediation in Cold and Arctic Climates”, Kingston, Ontario. Kingston: Federal Government Printer, 1995. P. 2–11.
7. Biggar K.W., Haidar S., Nahir M., Jarrett R.M. Site investigations of fuel spill migration into permafrost // J. Cold Regions Eng. 1998. Vol. 12. № 2. P. 84–104.
8. Grechishchev S.E. Vechnaya merzlota i zagryaznenie territorii [Permafrost and pollution of territories] // Kriosfera Zemli. 2003. T. VII. № 1. S. 89–90 (in Rus.).
9. Nefed'eva Yu.A. Rol' transformatsii neftyanogo zagryazneniya v izmenenii svoystv gruntov sloev sezonnogo ottaivaniya i sezonnogo promerzaniya: avtoref. diss. ... k. g.-m. n. [The role of oil pollution transformation in changing soil properties in the seasonal thawing and seasonal freezing layers: author's abstract of PhD thesis (Geology and Mineralogy)]. M.: geologicheskii fakul'tet MGU, 2010. 24 s. (in Rus.).
10. Korolev V.A. Ochistka gruntov ot zagryaznenii [Cleaning away pollution from soils]. M.: MAIK “Nauka/Interperiodika”, 2001. 365 s. (in Rus.).
11. Artemov A.V. Sovremennyye tekhnologii ochistki ot neftnykh zagryaznenii [Modern technologies for cleaning away oil pollution] // Neft'. Gaz. Promyshlennost'. 2004. № 5. S. 24 (in Rus.).
12. Korolev V.A. Ochistka i vosstanovlenie geologicheskoi sredy: uchebnoe posobie dlya vuzov [Cleaning and restoration of the geological environment: a textbook for institutes of higher education]. M.: ООО «SamprinT», 2019. 430 s. (in Rus.).
13. Korolev V.A. Monitoring geologicheskikh, litotekhnicheskikh i ehkologo-geologicheskikh sistem: uchebnoe posobie (2-e izd.) [Monitoring of geological, lithotechnical and ecological-geological systems: a textbook (2nd ed.)]. M.: KDU, 2015. 416 s. (in Rus.).
14. ITS 9-2015. Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnykh tekhnologiyam. Obezvrezhivanie otkhodov termicheskim sposobom (szhiganiye otkhodov) [ITS 9-2015. Information-technical reference book on the best available technologies. Thermal waste disposal (waste incineration)]. M.: Byuro NDT, 2015. 258 s. (in Rus.).
15. ITS 15-2016. Utilizatsiya i obezvrezhivaniye otkhodov (krome obezvrezhivaniya termicheskim sposobom (szhiganiye otkhodov) [ITS 15-2016. Waste disposal and neutralization (besides thermal neutralization (waste incineration))]. M.: Byuro NDT, 2016. 208 s. (in Rus.).
16. Korolev V.A. Teoriya ehlektropoverkhnostnykh yavlenii v gruntakh i ikh primeneniye (izd. 2-e, pererab. i dop.) [Theory of electro-surface phenomena in soils and application of them (2nd ed., revised and enlarged)]. Moskva: KDU, 2023. 498 s. (in Rus.).
17. Korolev V.A., Nekrasova M.A. Ochistka glinistykh gruntov ot uglevodorodnykh zagryaznenii s pomoshch'yu ehlektricheskogo toka [Cleaning hydrocarbon pollution away from clay soils using electric current] // Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-prakt. konferentsii «Inzhenerno-geologicheskoe obespecheniye nedropol'zovaniya i okhrany okruzhayushchei sredy». Perm': PGU, 1997. S. 70–72. (in Rus.).

18. Obobrin A.A., Kalachnikova I.G., Maslivets T.A. i dr. Neftyanoe zagryaznenie pochvy i sposoby rekul'tivatsii [Oil pollution of soils and methods of reclamation] // Vliyanie promyshlennykh predpriyatii na okruzhayushchuyu sredu. M.: Nauka, 1987. S. 284–291 (in Rus.).
19. Arens V.ZH. i dr. Ochistka okruzhayushchei sredy ot uglevodorodnykh zagryaznenii [Cleaning hydrocarbon pollution away from the environment]. M.: Interbuk, 1999. 373 s. (in Rus.).
20. TU 214-10942238-03-95. Otsenka ehffektivnosti sorbenta [TU 214-10942238-03-95. Assessment of sorbent efficiency]. M.: Standartinform, 1995. 16 s.
21. Gridin O.M. O neftyanykh razlivakh i spasatel'nykh sorbentakh [On oil spills and rescue sorbents] // Neft' i biznes. 1996. № 5. S. 10 (in Rus.).
22. Gridin O.M. Kak vybirat' neftyanye sorbenty [How to choose oil sorbents] // Ehkologiya i promyshlennost' Rossii. 1999. № 9. S. 18–20 (in Rus.).
23. Kamenshchikov F.A., Bogomol'nyi E.I. Neftyanye sorbenty [Oil sorbents]. Moskva – Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy. 2003. 268 s. (in Rus.).
24. Kireeva N.A. Mikrobiologicheskie protsessy v neftezagryaznennykh pochvakh [Microbiological processes in oil-polluted soils]. Ufa: Bashk. gos. un-t, 1994. 172 s. (in Rus.).
25. RD 39-00147105-006-97. Instruktsiya po rekul'tivatsii zemel', narushennykh i zagryaznennykh pri avariinom i kapital'nom remonte magistral'nykh nefteprovodov [RD 39-00147105-006-97. Instructions for the reclamation of lands disturbed and contaminated due to emergency and major repairs of main oil pipelines]. M.: Transneft', 1997. 22 s. (in Rus.).
26. GOST 17.5.3.06-85. Okhrana prirody. Zemli. Trebovaniya k opredeleniyu norm snyatiya plodorodnogo sloya pochvy pri proizvodstve zemlyanykh rabot [GOST 17.5.3.06-85. Nature conservation. Lands. Requirements for determining the standards for removing the fertile soil layer by excavation work]. M.: Izd-vo standartov, 2002. 4 s. (in Rus.).
27. RD 153-39.4-074-01. Instruktsiya po likvidatsii avarii i povrezhdenii na podvodnykh perekhodakh magistral'nykh nefteproduktoprovodov [RD 153-39.4-074-01. Instructions for the elimination of accidents and damage at underwater crossings of main oil pipelines]. M.: Minehnergo, 2001. 70 s. (in Rus.).
28. Standart AO "Samotlorneftegaz" № PZ-05 S-0223 YUL-413 "Normativy kachestva rekul'tivatsii zemel', zagryaznennykh neft'yu i nefteproduktami" [Standard of JSC "Samotlorneftegaz" № PZ-05 S-0223 YUL-413 "Quality standards for the reclamation of lands polluted with oil and oil products"]. Nizhnevartovsk, 2018. 84 s. (in Rus.).



Telegram-канал журнала

Независимый электронный журнал  
**ГеоИнфо**

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>

ПЕРВАЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

# «ПРАКТИЧЕСКАЯ ГЕОТЕХНИКА: РАСЧЕТЫ, КОТОРЫЕ РЕШАЮТ»

3 июня 2025 года

Москва

Приглашаем принять участие в одном из ключевых событий отрасли — конференции «Практическая геотехника. Расчеты, которые решают». Это отличная возможность встретиться с ведущими специалистами страны, обменяться опытом и обсудить актуальные вопросы, стоящие перед профессиональным сообществом. Главное, на что мы обратим внимание в докладах – как реализовывать сложные проекты максимально эффективно и выгодно с точки зрения геотехники.

Организаторы:

Независимый электронный журнал  
**Геоинфо**



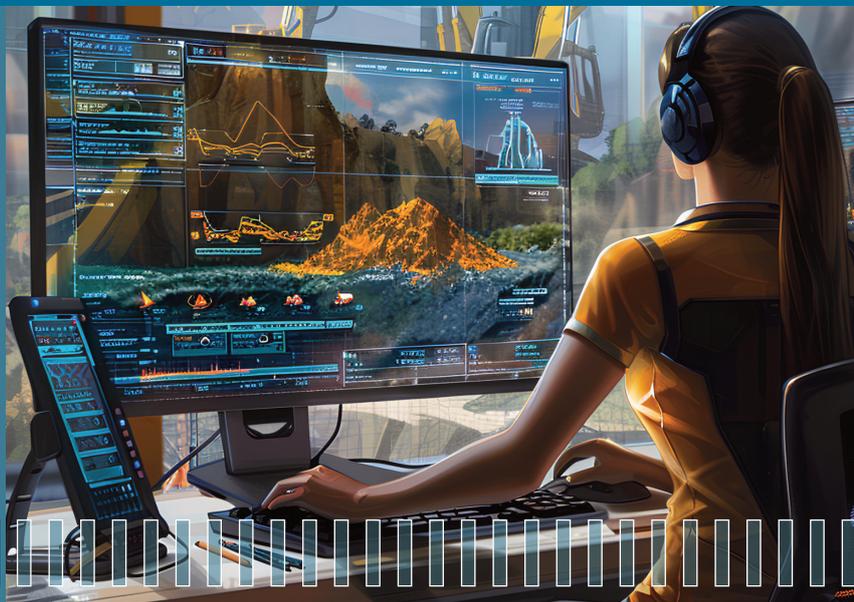
[geoinfo.ru](http://geoinfo.ru)

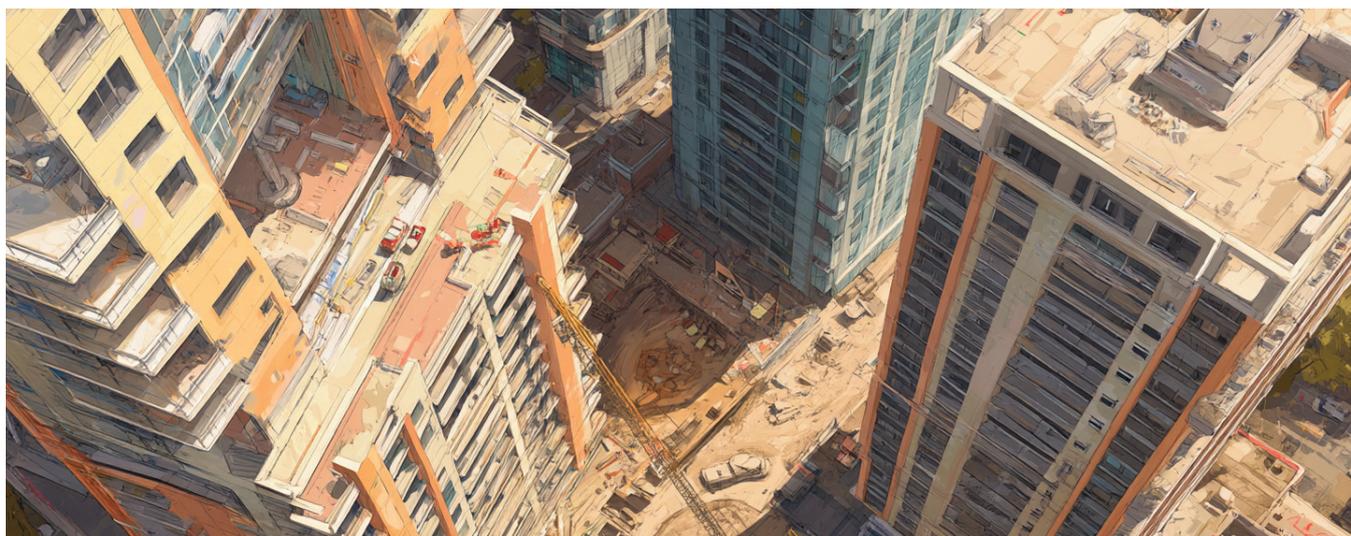
## II практическая конференция

«АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЦИФРОВИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ  
ИЗЫСКАНИЙ И ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ  
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

18 ноября 2025 года, Москва

Наша конференция по автоматизации и цифровизации инженерно-геологических изысканий в 2024 году вызвала большой интерес среди специалистов. Участниками мероприятия стали более 100 человек, а хедлайнерами – представители ООО «Газпром нефть». По отзывам слушателей, они получили много новой, полезной и интересной информации, а значительную часть полученных знаний смогут успешно интегрировать в собственную работу. В связи с этим мы приняли решение провести в 2025 году вторую тематическую конференцию. Тем более, что за год с момента проведения первой конференции, мы уверены, будет сделан гигантский шаг вперед в области цифровизации.





# АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОСАДКИ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Принята к публикации 30.05.2025

Опубликована: 16.06.2025

## МИРНЫЙ А.Ю.

Доцент Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, к.т.н., г. Москва, Россия  
MirnyyAY@mail.ru

## КАЛУГИНА Ю.А.

Главный специалист  
ООО «Независимая геотехника», г. Москва, Россия  
zvezdaneba@yandex.ru

## АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается развитие метода послойного суммирования (МПС), позволяющего проводить расчет осадок с учетом нелинейности деформирования без применения численных методов. Метод основан на предложении З.Г. Тер-Мартirosяна об учете сдвиговой и объемной составляющей деформации с использованием соответственно модуля сдвига и модуля объемного сжатия при расчете методом послойного суммирования.

На основании аналитического решения задачи о распределении компонентов напряжений в грунтовом массиве выполнен расчет объемной и сдвиговой составляющих осадки для загруженных площадей различной конфигурации. Полученное решение сопоставлено с ранее известными аналитическими решениями и с численными расчетами с использованием различных моделей деформирования.

Сопоставление результатов использования предложенной методики расчета и аналитического решения показало, что предлагаемый метод приближает получаемое решение к точному решению Шлейхера – Польшина. Сопоставление с решением, полученным с применением метода конечных элементов (МКЭ) на основе различных упругопластических моделей, показало, что учет деформации сдвига приближает решение методом послойного суммирования к численному решению без введения дополнительных корреляционных коэффициентов.

Использование предложенного нелинейного решения позволяет получить результаты, сопоставимые с результатами численного моделирования при расчете простейших задач фундаментостроения с применением меньшего количества допущений. Дальнейшее развитие метода может позволить уточнить линейные решения, предписываемые на настоящий момент нормативными документами.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

расчет осадки; метод послойного суммирования; задача Лява; жесткость; средние напряжения; нелинейная жесткость грунтов.

## ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мирный А.Ю., Калугина Ю.А.. Аналитический метод расчета осадки с учетом нелинейности деформирования // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 1. С. 26–32. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-26-32.

# ANALYTICAL METHOD FOR SETTLEMENT CALCULATION TAKING INTO ACCOUNT NONLINEAR DEFORMATION

Accepted for publication 30.05.2025

Published 16.06.2025

## MIRNYY A.Yu.

PhD, assistant professor, Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
MirnyyAY@mail.ru

## KALUGINA Yu.A.

Chief specialist, "Nezavisimaya geotekhnika" LLC ("Independent Geotechnics" LLC), Moscow, Russia  
zvezdaneba@yandex.ru

## ABSTRACT

The paper considers the development of the layer-by-layer summation method, which makes it possible to calculate settlements taking into account nonlinear deformation without using numerical methods. This method is based on the proposal of Z.G. Ter-Martirosyan on taking into account the shear and volumetric components of deformation using, respectively, the shear modulus and the volumetric compression modulus for the calculation by the layer-by-layer summation method.

The volumetric and shear components of settlements for loaded areas of various configurations were calculated on the basis of an analytical solution of the problem of stress components distribution in a soil mass. The obtained solution was compared with previously known analytical solutions with the use of various deformation models.

Comparing the results of using the proposed calculation method and the analytical solution was shown that the proposed method brings the obtained solution closer to the exact Shleikher-Pol'shin solution. The comparison with the solution obtained using the finite element method (FEM) on the basis of various elastoplastic models showed that the consideration of shear deformation brings the solution by the layer-by-layer summation method closer to the numerical solution without introducing additional correlation coefficients.

The use of the proposed nonlinear solution makes it possible to obtain results that are comparable to the results of numerical modeling when calculating the simplest problems of foundation engineering using fewer assumptions. Further development of the method can make more precise the linear solutions that are currently prescribed by regulatory documents.

## KEYWORDS:

settlement calculation; layer-by-layer summation method; Love's problem; stiffness; mean stress; nonlinear soil stiffness.

## FOR CITATION:

Mirnyy A.Yu., Kalugina Yu.A. Analiticheskii metod rascheta osadki s uchëtom nelineinosti deformirovaniya [Analytical method for settlement calculation taking into account nonlinear deformation] // GeolInfo. 2025. T. 7. № 1. S. 26–32. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-26-32 (in Rus.).

## ВВЕДЕНИЕ ►

Несмотря на широкое распространение численных методов в практике геотехнического проектирования, аналитические решения задач по-прежнему актуальны – именно эти методы расчета осадки и устойчивости основания сооружения хорошо апробированы и являются достаточным обоснованием безопасности и надежности. В частности, метод послойного суммирования (МПС) на протяжении 50 лет является основным рекомендованным методом расчета осадки отдельно стоящих и ленточных фундаментов.

Ограничения аналитических методов хорошо известны: в большинстве случаев расчет не учитывает негоризонтального залегания инженерно-геологических элементов (ИГЭ), а поведение отдельных элементов моделируется на основании теории линейного деформирования. Метод послойного суммирования предполагает, что каждый элементарный слой находится в состоянии компрессионного сжатия и не испытывает бокового расширения. Это предположение справедливо лишь отчасти, для фундаментов достаточно большой ширины по отношению к сжимаемой толще

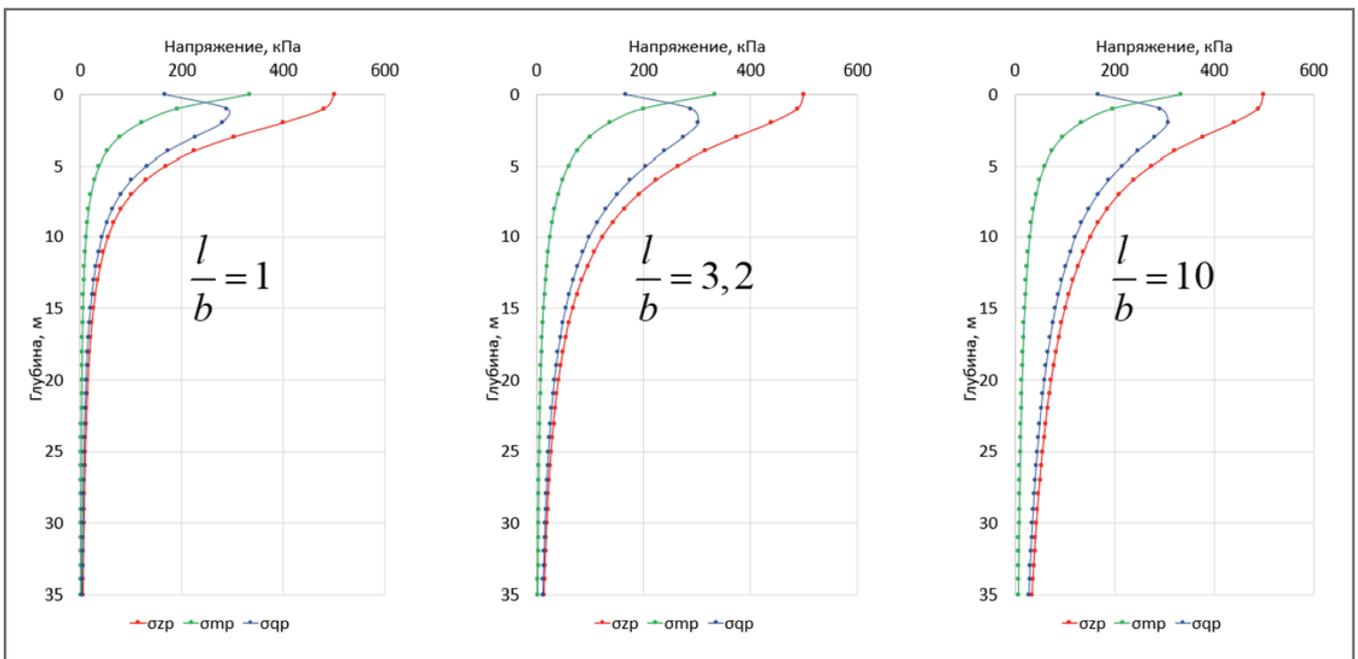
основания. Анализ напряженного состояния основания даже на основании теории линейно-деформируемой среды показывает, что области роста касательных напряжений хоть и не распространяются на ту же глубину, что нормальные напряжения, но не могут игнорироваться при расчете деформаций.

Профессором З.Г. Тер-Мартirosyan была предложена модификация этого метода, позволяющая учитывать развитие в каждом элементарном слое сдвиговых деформаций. Преимуществом данного метода является возможность учета деформации основания за



**Таблица 1. Коэффициенты влияния  $\alpha_m$  для расчета средних напряжений  $\Delta\sigma_{mp,i}$  по оси загруженной площади (при  $\nu = 0,3$ )**

$\xi = 2z/b$	Круг	Прямоугольник с соотношением сторон $\eta = l/b$ , равным						Лента ( $\eta \geq 10$ )
		1,0	1,4	1,8	2,4	3,2	5,0	
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,552	0,573	0,593	0,599	0,601	0,599	0,596	0,590
0,8	0,331	0,362	0,395	0,407	0,412	0,412	0,408	0,400
1,2	0,204	0,233	0,269	0,286	0,296	0,298	0,295	0,289
1,6	0,133	0,157	0,190	0,208	0,222	0,227	0,227	0,222
2	0,092	0,111	0,139	0,157	0,172	0,180	0,183	0,179
2,4	0,067	0,082	0,105	0,122	0,137	0,147	0,152	0,149
2,8	0,051	0,063	0,082	0,096	0,111	0,122	0,129	0,128
3,2	0,040	0,049	0,065	0,078	0,092	0,103	0,112	0,112
3,6	0,032	0,040	0,053	0,064	0,077	0,088	0,098	0,100
4	0,026	0,032	0,044	0,054	0,065	0,076	0,086	0,090
4,4	0,022	0,027	0,037	0,045	0,056	0,066	0,077	0,081
4,8	0,018	0,023	0,031	0,039	0,048	0,058	0,069	0,074
5,2	0,016	0,020	0,027	0,034	0,042	0,051	0,062	0,068
5,6	0,014	0,017	0,023	0,029	0,037	0,045	0,056	0,063
6	0,012	0,015	0,021	0,026	0,033	0,040	0,051	0,059



**Рис. 1.** Затухание вертикальных, средних и девиаторных напряжений с глубиной для загруженной площади с различным соотношением сторон

счет формоизменения – даже при коэффициенте относительного поперечного расширения  $\nu = 0,5$ , то есть при бесконечной объемной жесткости осадка не будет нулевой за счет деформации сдвига. Помимо этого использование параметров объемной и сдвиговой жесткости лучше соответствует физическим процессам, протекающим при деформировании скелета грунта (изменению

пористости и взаимному смещению частиц). Однако сохраняется и общий недостаток теории линейного деформирования: в пределах одного ИГЭ жесткость не зависит от уровня действующих напряжений и величина осадки напрямую зависит от выбора мощности сжимаемой толщи.

В качестве логичного дальнейшего шага можно воспользоваться хорошо

известной в рамках нелинейной механики грунтов степенной зависимостью жесткости от уровня средних напряжений. Предлагаемая модификация позволит расширить область применения метода послойного суммирования, а также снизит зависимость результата расчета от выбора мощности сжимаемой толщи, так как с увеличением напряжений с глубиной жесткость будет

возрастать и затухание осадки будет происходить быстрее.

В настоящей работе приведены результаты сопоставления решений тестовой задачи различными методами.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ►

По предложению З.Г. Тер-Мартirosяна осадка определялась по двучленной формуле, в которой для каждого элементарного слоя отдельно определялась деформация за счет объемного сжатия, вызванная изменением среднего напряжения, и деформация сдвига, вызванная девиатором напряжений:

$$s = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta\sigma_{zp,i} - \Delta\sigma_{mp,i}}{2G_i} + \frac{\Delta\sigma_{mp,i}}{3K_i} \right) h_i, \quad (1)$$

где  $s$  – осадка элементарного слоя;  $\Delta\sigma_{zp,i}$  – приращение дополнительного вертикального напряжения в середине  $i$ -го слоя;  $\Delta\sigma_{mp,i}$  – приращение дополнительного среднего напряжения в середине  $i$ -го слоя;  $G_i$  – модуль сдвига  $i$ -го слоя;  $K_i$  – модуль объемного сжатия  $i$ -го слоя;  $h_i$  – мощность  $i$ -го слоя.

Некоторые вопросы в этой методике вызывает определение среднего напряжения для  $i$ -го слоя. В исходной редакции его предлагается рассчитывать на основании компонент напряженного состояния для данной точки [1]. Это может быть выполнено на основании решения задачи А. Лява [2], развитого впоследствии В.Г. Короткиным [3] – в его публикации приведены полные аналитические решения для всех компонентов напряженно-деформированного состояния (НДС). Несмотря на громоздкость этих решений, величина приращений дополнительных напряжений определяется исключительно интенсивностью распределенной нагрузки, формой загруженной площади и координатами рассматриваемой точки, что позволяет выразить средние напряжения с помощью коэффициентов влияния. Принимая во внимание то, что метод послойного суммирования исходно рассматривает только центральную ось, проходящую через загруженную площадь, можно также не рассматривать точки вне этой оси ( $x, y = 0$ ). Таким образом, для определения  $\Delta\sigma_{zp,i}$  можно использовать табличные значения коэффициента влияния  $\alpha$  (по таблице 5.8. СП 22.13330.2016), а для определения  $\Delta\sigma_{mp,i}$  – получить свои значения коэффициентов, представленные в таблице 1. При необходимости значения коэффициентов могут быть рассчитаны и для больших глубин.

Характерно, что по мере увеличения соотношения сторон прямоугольной загруженной площади среднее напряжение с глубиной затухает медленнее (рис. 1). Для близкой к квадрату загруженной площади, напротив, наблюдается концентрация среднего напряжения в пределах глубины, равной ширине фундамента. Этот вывод вполне логичен, так как хорошо известно, что приращение горизонтальных напряжений с глубиной затухают крайне быстро, а степень затухания вертикальных напряжений непосредственно зависит от конфигурации загруженной площади. На этом основании можно предположить, что наибольшее расхождение между предлагаемым методом и классическим МПС будет наблюдаться для ленточных фундаментов, так как предлагаемое решение основано на пространственной, а не на плоской задаче.

Следует отметить, что, в отличие от вертикального напряжения, горизонтальные напряжения (а, как следствие, и средние) зависят от величины коэффициента относительного поперечного расширения  $\nu$ . В.А. Флорин [4] указывает, что влияние коэффициента поперечного расширения несущественно влияет на значения напряжений, однако это верно только для квадратной загруженной площади. По мере увеличения соотношения  $l/b$  влияние увеличивается и для ленточного фундамента ( $l/b > 10$ ) расхождение между средними напряжениями при  $\nu = 0,2$  и  $\nu = 0,4$  достигает 21%.

Нелинейность деформирования в предлагаемом методе проще всего учесть путем введения степенной зависимости модулей жесткости от уровня средних напряжений. При этом авторам представляется более корректным использовать независимые показатели степени для сдвига и объемного сжатия – аналогично тому, как это сделано в модели UBCSand и ее модификациях [5–8]:

$$\begin{aligned} G_i &= G^{ref} \left( \frac{\sigma_{m,i}}{\sigma^{ref}} \right)^n; \\ K_i &= K^{ref} \left( \frac{\sigma_{m,i}}{\sigma^{ref}} \right)^m, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $G^{ref}$ ,  $K^{ref}$  – опорные значения модулей сдвига и объемного сжатия соответственно;  $\sigma^{ref}$  – опорное среднее давление;  $n$ ,  $m$  – степенные показатели.

В отличие от широко распространенной в настоящее время модели Hardening Soil [9, 10], независимые степенные

показатели жесткости позволяют учитывать различие физических процессов, влияющих на изменение жесткости грунта при уплотнении. Сдвиговая жесткость обусловлена в первую очередь трением, и в грунтах с большими значениями угла внутреннего трения зависимость будет более сильной. Объемная жесткость определяется пористостью, и для грунтов с плотной упаковкой частиц зависимость будет слабой. Данные степенные показатели могут быть определены по результатам испытаний трехосного и компрессионного сжатия в результате расчета соответственно параметров сдвиговой и объемной жесткости при различных уровнях средних напряжений и последующей аппроксимации полученных частных значений степенной функцией.

Начальное (бытовое) среднее напряжение  $\sigma_{m,i}$  в каждом элементарном слое, необходимое для учета нелинейной жесткости, целесообразно определять на основании бытового вертикального напряжения и величины коэффициента бокового давления в массиве  $K_0$ . В этом случае в расчете может быть учтено и переуплотненное состояние.

$$\sigma_{m,i} = \sigma_{zp,i} \left( \frac{1 + 2K_0}{3} \right). \quad (3)$$

Порядок расчета практически не отличается от изложенного в СП 22.13330.2016. После построения эпюр природного и дополнительного давления и определения мощности сжимаемой толщи вся она разделяется на элементарные слои. Для уровня середины каждого слоя рассчитывается величина среднего бытового напряжения  $\sigma_{m,i}$ , на основании которого определяются величины модулей сдвига и объемного сжатия. Расчет может быть легко выполнен в табличной форме.

С целью сопоставления различных методов было выполнено три группы расчетов.

1. Для проверки точности аналитического решения выполнен строгий расчет для невесомого основания для линейно-упругой среды методом послойного суммирования, методом З.Г. Тер-Мартirosяна и по решению Шлейхера – Польшина [11, 12]. Авторами была рассмотрена задача об осадке в центре загруженной площади шириной 1 м, нагрузка составила 500 кПа. Рассмотрено три случая соотношения сторон – загруженный квадрат, прямоугольник с соотношением сторон  $l/b = 3,2$  и условно бесконечная лента. Нагрузка принята бесконечно гибкой для лучшего соответствия условиям

Таблица 2. Принятые для расчета параметры физико-механических свойств

Параметр	Размерность	Модель		
		Linear-elastic (LE)	Mohr-Coulomb	Hardening soil
$\gamma$	кН/м <sup>3</sup>	20	20	20
$E_0$	МПа	30	30	-
$\nu$	-	0,3	0,3	-
$G$	МПа	11,5	11,5	-
$K$	МПа	25	25	-
$\phi$	°	-	30	30
$c$	МПа	-	0,005	0,005
$E_{50}^{ref}$	МПа	-	-	24
$E_{oed}^{ref}$	МПа	-	-	40,4
$E_{ur}^{ref}$	МПа	-	-	225
$n, m$	-	-	-	0,5
$K_0$	-	0,428	0,428	0,428

Таблица 3. Значения осадки поверхности в центре загруженной площади, полученные аналитическими методами

Соотношение сторон загруженной площади $l/b$	Метод послойного суммирования	Решение Шлейхера – Польшина	Метод З.Г. Тер-Мартirosяна
1	0,013	0,017	0,019
3,2	0,020	0,027	0,031
>10	0,024	0,038	0,039

метода послойного суммирования и аналитического решения задачи. Для наглядности рассматривался только случай первичного нагружения, без разгрузки, а сама нагрузка прикладывалась к дневной поверхности массива. Мощность элементарного слоя принята равной 0,2 м. Мощность сжимаемой толщи в данном случае искусственно не ограничивалась и составляла 7 м (дополнительные напряжения от внешней нагрузки на этой глубине не превышают 1,5%).

2. Инженерный расчет в линейной постановке, учитывающий вес основания и более реалистичные геометрические параметры, выполнялся методом послойного суммирования по СП 22.13330.2016, предлагаемым аналитическим методом и численно в программном комплексе Plaxis. Использовалась линейно-упругая модель, расчет выполнялся методом послойного суммирования, методом З.Г. Тер-Мартirosяна в линейной постановке и численно. Ширина фундамента была принята равной 5 м, глубина заложения – также 5 м. Как и для аналитического расчета, рассматривались соотношения сторон  $l/b = 1; 3,2; 10$ . Мощность сжимаемой толщи определялась по методике СП 22.13330.2016 и использовалась для

установления нижней границы расчетной модели. Для квадратной загруженной площади она составила 6 м; для прямоугольной – 9 м; для ленты – 10 м. Мощность элементарных слоев принималась равной  $0,2b = 1$  м.

3. Для проверки учета нелинейности деформирования был выполнен расчет той же задачи предлагаемым нелинейным методом и с применением модели Hardening Soil, использующей аналогичный степенной закон изменения жесткости. Геометрические параметры задачи были приняты аналогично предыдущему варианту расчета.

Для корректного сопоставления результатов расчетов были приняты параметры физико-механических свойств, представленные в таблице 2 при опорном давлении 100 кПа.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Результаты расчета осадки загруженной площади для первого сопоставительного расчета представлены в таблице 3.

Сопоставление результатов расчетов показывает, что классический метод послойного суммирования (с учетом фактического коэффициента невозможности бокового расширения  $\beta = 0,74$ ) занижает осадку относительно аналитиче-

ского решения Шлейхера – Польшина на 24–37% в зависимости от соотношения сторон фундамента. Это может объясняться как неточностью исходной предпосылки метода о компрессионном режиме сжатия каждого элементарного слоя, так и неизбежной погрешностью, связанной с дискретизацией непрерывной функции изменения напряжений по глубине. Метод З.Г. Тер-Мартirosяна значительно ближе к аналитическому решению – расхождение составляет от 3 до 15%, причем в сторону завышения расчетной осадки (таблица 3). На основании этого сопоставления можно заключить, что метод З.Г. Тер-Мартirosяна больше соответствует фактическому НДС в линейно-упругой среде, однако не учитывает, что интенсивность девиаторной составляющей напряжений в пределах одного элементарного слоя по ширине неодинакова, что и приводит к завышению деформации.

Второй расчет, демонстрирующий практическую реализацию инженерного метода в линейной постановке, учитывал вес основания и более реалистичные геометрические параметры. Результаты расчета приведены в таблице 4.

Для предлагаемого нелинейного метода начальные значения модулей были

**Таблица 4. Значения осадки поверхности, м, в центре загруженной площади, полученные инженерными и численными методами в линейной постановке**

Соотношение сторон загруженной площади $l/b$	МПС (по СП 22.13330.2016)		Метод З.Г. Тер-Мартirosяна		МКЭ (модель LE)
	без разгрузки	с разгрузкой	без разгрузки	с разгрузкой	
1	0,050	0,043	0,062	0,054	0,058
3,2	0,074	0,063	0,095	0,082	0,086
10	0,081	0,069	0,139	0,091	0,091

**Таблица 5. Значения осадки поверхности в центре загруженной площади, полученные инженерными и численными методами**

Соотношение сторон загруженной площади $l/b$	Метод З.Г. Тер-Мартirosяна		МКЭ (модель Hardening Soil)
	без учета давления связности	с учетом давления связности	
1	0,042	0,044	0,045
3,2	0,063	0,066	0,066
10	0,070	0,073	0,074

приняты по таблице 2, а степенной коэффициент – равным  $m = n = 0,5$ . Как и в случае МПС, из компонент напряжений от внешней нагрузки  $\sigma_p$  вычитались соответствующие компоненты бытовых напряжений  $\sigma_g$ .

В связи с тем что в численном расчете для устойчивости решения потребовалось ввести ненулевое значение сцепления, третий сопоставительный расчет был выполнен в двух вариантах – с учетом и без учета давления связности в степенном законе жесткости [9]. Из таблицы 5 видно, что в случае учета давления связности результат расчета практически совпадает с результатом нелинейного численного расчета.

В качестве дальнейшего развития метода можно учесть и разгрузку дна котлована. При этом опорное давление  $p^{ref}$ , при котором приняты опорные значения модулей  $G$  и  $K$ , должно быть не меньше, чем вертикальное бытовое давление  $\sigma_{zg}$  на уровне дна котлована. В этом случае до достижения данного уровня нагрузки все модули принимаются постоянными, а при превышении его начнут возрастать.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

В результате сопоставления результатов расчетов аналитическими и численными методами в линейно-упругой и нелинейной постановках установлено, что учет сдвиговой деформации наиболее принципиален для фундаментов небольшой ширины. По мере увеличения ширины загруженной площади режим работы каждого элементарного слоя приближается к компрессионному сжатию и сдвиговая составляющая деформации не вносит существенного вклада в общую осадку, так как размер зон сдвига уменьшается от носителя области компрессионного сжатия.

Учет нелинейного изменения жесткости с глубиной уточняет значение осадки и приближает результат расчета к результатам численного моделирования с применением нелинейной модели. При этом результат может быть получен в простой табличной форме без применения специализированного программного обеспечения.

Расхождение предложенного метода

в линейной постановке с точным решением Шлейхера – Польшина составляет от 3 до 15%, в то время как для классического МПС – от 24 до 37%, что доказывает корректность выполненных вычислений и полученных значений коэффициентов. В нелинейной постановке метод дает результаты расчета осадки, приближенные к результатам численного решения, и **большие**, чем МПС, так как учитывает развитие сдвиговых деформаций. Учет нелинейной жесткости грунтов приводит к более реалистичной оценке деформации основания.

Предложенный модифицированный метод нелинейного инженерного расчета осадки позволяет:

- учесть зависимость объемной и сдвиговой жесткости от уровня средних напряжений;
- учесть отклонение фактического напряженного состояния от гипотезы о компрессионном сжатии элементарного слоя;
- снизить зависимость результата расчета от выбора мощности сжимаемой толщи. **И**

## Список литературы ►

1. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. М.: АСВ, 2009. 552 с.
2. Ляв А. Математическая теория упругости. Ленинград: ОНТИ, 1935. 672 с.
3. Короткин В.Г. Объемная задача для упруго-изотропного полупространства // Труды Гидроэнергопроекта. 1938. № 4. С. 92–98.
4. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Том 1. Ленинград: Госстройиздат, 1959. 360 с.
5. Puebla H., Byrne P.M. Analysis of CANLEX liquefaction embankments: prototype and centrifuge models // Canadian Geotechnical Journal. 1997. Vol. 34. P. 641–657.
6. Beaty M.H., Byrne P.M. UBCSAND constitutive model // Itasca UDM Web Site. 2011.

7. Petalas A., Galavi V. Plaxis Liquefaction Model UBC3D-PLM. PLAXIS, 2012.
8. Galavi V., Petalas A., Brinkgreve R.B.J. Finite element modelling of seismic liquefaction in soils // Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS AGSSEA. 2013. Vol. 44. № 3. P. 55–64.
9. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The hardening soil model: formulation and verification // Beyond 2000 in Computational Geotechnics – 10 years of PLAXIS. Rotterdam: Balkema, 1999. P. 281–290.
10. Benz T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences. Stuttgart, Germany: Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart, 2007. 193 p.
11. Schleicher F. Taschenbuch für Bauingenieure. 1. Band.. Berlin: Springer, 1955. 1087 p.
12. Польшин Д.Е. Определение напряжения в грунте при загрузке части его поверхности // Труды ВИОС. Основания и фундаменты. 1933. № 1.

## References ▶

1. Ter-Martirosyan Z.G. Mekhanika gruntov [Soil Mechanics]. M.: ASV, 2009. 552 s. (in Rus.).
2. Love A. Matematicheskaya teoriya uprugosti [Mathematical theory of elasticity]. Leningrad: ONTI, 1935. 672 s. (in Rus.).
3. Korotkin V.G. Ob"emnaya zadacha dlya uprugo-izotropnogo poluprostranstva [Three dimensional problem for an elastically isotropic half-space] // Trudy Gidroenergoproekta. 1938. № 4. С. 92–98 (in Rus.).
4. Florin V.A. Osnovy mekhaniki gruntov. Tom 1 [Fundamentals of soil mechanics. Volume 1]. Leningrad: Gosstroizdat, 1959. 360 s. (in Rus.).
5. Puebla H., Byrne P.M. Analysis of CANLEX liquefaction embankments: prototype and centrifuge models // Canadian Geotechnical Journal. 1997. Vol. 34. P. 641–657.
6. Beaty M.H., Byrne P.M. UBCSAND constitutive model // Itasca UDM Web Site. 2011.
7. Petalas A., Galavi V. Plaxis Liquefaction Model UBC3D-PLM. PLAXIS, 2012.
8. Galavi V., Petalas A., Brinkgreve R.B.J. Finite element modelling of seismic liquefaction in soils // Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS AGSSEA. 2013. Vol. 44. № 3. P. 55–64.
9. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The hardening soil model: formulation and verification // Beyond 2000 in Computational Geotechnics – 10 years of PLAXIS. Rotterdam: Balkema, 1999. P. 281–290.
10. Benz T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences. Stuttgart, Germany: Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart, 2007. 193 p.
11. Schleicher F. Taschenbuch für Bauingenieure. 1. Band.. Berlin: Springer, 1955. 1087 p.
12. Pol'shin D.E. Opredelenie napryazheniya v grunte pri zagruzke chasti ego poverkhnosti [Determination of stress in the soil when loading a part of its surface] // Trudy VIOS. Osnovaniya i fundamenti. 1933. № 1 (in Rus.).



Telegram-канал журнала

Независимый электронный журнал  
**ГеоИнфо**

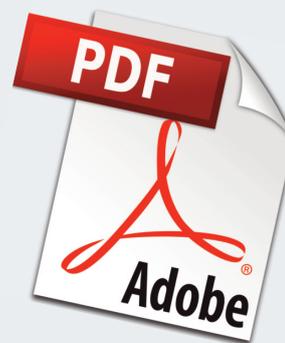
- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>

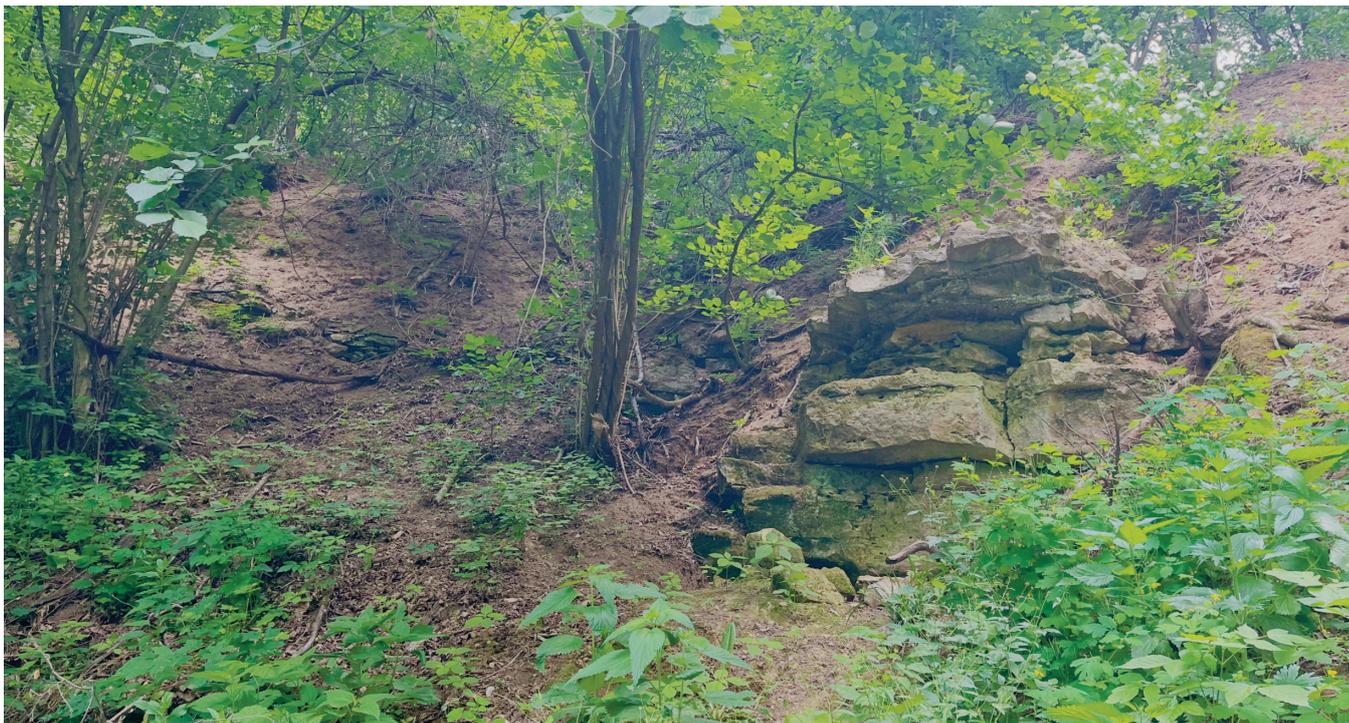
# Независимый электронный журнал

# ГеоИнфо

С 2025 года журнал «ГеоИнфо»  
выходит в формате \*PDF.  
4 выпуска в год.



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



## РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГЕНЕЗИСА ВОРОНОК НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ ТРОИЦКОГО И НОВОМОСКОВСКОГО ОКРУГОВ, г. МОСКВА)

Принята к публикации 30.05.2025

Опубликована: 16.06.2025

### РОМАНОВА Е.Р.

Младший научный сотрудник  
Института геоэкологии имени  
Е.М. Сергеева РАН, преподаватель  
Московского государственного  
строительного университета, г. Москва,  
Россия  
romanova.elizaveta.r@yandex.ru

### ЖИДКОВ Р.Ю.

Главный инженер отдела  
картографирования и ведения Единой  
городской картографической основы  
Москвы ГБУ «Мосгоргеотрест»,  
к. г.-м. н., Москва, Россия  
rzhidkov@gmail.com

### АБАКУМОВА Н.В.

Инженер первой категории  
лаборатории грунтоведения и  
технической мелиорации грунтов  
геологического факультета  
Московского государственного  
университета имени М.В. Ломоносова,  
к. г.-м. н., г. Москва, Россия  
abakumova.nv@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

Плотность и размеры поверхностных проявлений карста, карстово-суффозионного и суффозионного (не связанного с карстом) процессов – необходимая информация для районирования территории по категориям опасности. Для природных территорий, мало затронутых человеческой деятельностью, задача заключается только в поиске понижений. На территориях с богатой историей, отсутствием современной строительной и сельскохозяйственной деятельности актуально установление происхождения обнаруженных бессточных впадин, так как люди за века своего проживания, не всегда мирного, сильно изменяют ландшафт. При этом определение происхождения формы рельефа на основе морфометрического анализа не всегда эффективно.

В данной работе рассматриваются примеры установления происхождения локальных понижений рельефа, обнаруженных в Троицком и Новомосковском административных округах (ТиНАО) г. Москвы на участках, свободных от современной застройки и сельскохозяйственной деятельности. Методика базируется на ретроспективном изучении антропогенного освоения территории и включает изучение архивных топографических и военных карт, аэрофотоснимков, информации о подземной добыче строительных материалов и о проводившихся на территории археологических работах.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

опасные геологические процессы; карст; воронки; генезис; каменоломни, суффозия.

### ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Романова Е.Р., Жидков Р.Ю., Абакумова Н.В. Ретроспективный подход к определению генезиса воронок на земной поверхности (на примере Троицкого и Новомосковского округов, г. Москва) // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 1. С. 34–47. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-34-47.

# RETROSPECTIVE APPROACH TO DETERMINING THE GENESIS OF SINKHOLES ON THE EARTH SURFACE (BY THE EXAMPLE OF TROITSK AND NOVOMOSKOVSK DISTRICTS, MOSCOW)

Accepted for publication 30.05.2025

Published 16.06.2025

## ROMANOVA E.R.

Junior researcher, Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences; lecturer, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia  
romanova.elizaveta.r@yandex.ru

## ZHIDKOV R.Yu.

PhD, chief engineer, Department of Mapping and Maintenance of the Unified City Cartographic Base of Moscow, State Budgetary Institution "Mosgorgeotrest", Moscow, Russia  
rzhidkov@gmail.com

## ABAKUMOVA N.V.

PhD, first category engineer, Laboratory of Soil Science and Technical Soil Reclamation, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
abakumova.nv@mail.ru

## ABSTRACT

The density and sizes of surface manifestations of karst, karst-suffusion and suffusion (not related to karst) processes are the necessary information for zoning territories according to hazard categories. For natural areas, that are little affected by human activities, the task is only to find depressions. In a territory, which is characterized by a rich history and lack of modern construction and agricultural activities, it is relevant to determine the origin of the detected drainless depressions, because people have greatly change the landscape over the centuries of their residence (not always peaceful). At the same time, determining the origin of a relief form on the basis of morphometric analysis is not always effective.

This paper considers examples of determining the origin of local relief depressions found in areas that are free from modern development and agricultural activities in the the Troitsk and Novomoskovsk administrative districts (TiNAO) of Moscow. The technique is based on the retrospective study of anthropogenic development of the territory and includes studying of archival topographic and military maps, aerial photographs, information on underground mining of construction materials and archaeological works carried out in the territory.

## KEYWORDS:

dangerous geological processes; karst; sinkholes; genesis; quarries, suffosion.

## FOR CITATION:

Romanova E.R., Zhidkov R.Yu., Abakumova N.V. Retrospektivnyi podkhod k opredeleniyu genezisa voronok na zemnoi poverkhnosti (na primere Troitskogo i Novomoskovskogo okrugov, g. Moskva) [Retrospective approach to determining the genesis of sinkholes on the earth surface (by the example of Troitsk and Novomoskovsk districts, Moscow)] // *GeoInfo*. 2025. T. 7. № 1. S. 34–47. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-34-47 (in Rus.).

## ВВЕДЕНИЕ ►

Наличие или отсутствие поверхностных проявлений карста и связанной с ним суффозии является одним из признаков районирования территории по категориям опасности [1]. По информации о количестве и расположении поверхностных проявлений процесса исследователи выделяют участки наиболее вероятного образования новых форм рельефа. Это основано на том допущении, что процесс обрушения или оседания земной поверхности имеет потенциально рецидивный характер.

При проведении рекогносцировочных работ на территориях, характеризующихся минимальной степенью антропогенного вмешательства, для которых свойственно образование поверхностных проявлений процессов карста и суффозии, у исследователей обычно не возникает сомнения о происхождении обнаруженных локальных пониже-

ний. Совершенно иначе дело обстоит с давно освоенными территориями. В процессе своего существования люди ведут строительную и сельскохозяйственную деятельность, извлекают, переносят, выравнивают, складывают грунты – и вся эта деятельность меняет природный рельеф. Поэтому на заселенных людьми территориях, в границах которых природные условия благоприятствуют протеканию карстовых процессов, выявленные локальные понижения рельефа могут иметь как природное, так и антропогенное происхождение. Для установления причины их образования необходимо проведение дорогостоящих полевых и лабораторных исследований. Однако предположительное происхождение некоторых форм рельефа может быть определено на основе ретроспективного анализа хозяйственной деятельности на данной территории.

Таким образом, к антропогенно измененным участкам в рамках данной работы авторы относят: территории, свободные от застройки, на которых ранее существовали сооружения и участки, где были обнаружены археологические ценности; подработанные территории.

Предлагаемая методология ретроспективного анализа включает изучение архивных топографических планов и военных карт, аэрофотоснимков, информации о подземной добыче строительных материалов и о проводившихся на исследуемой территории археологических работах. Только если исключить возможность образования на земной поверхности воронок в результате вышеперечисленных причин, можно предположить их природное происхождение. После этого можно планировать проведение полевых исследований для подтверждения или опровержения данной гипотезы. Такой

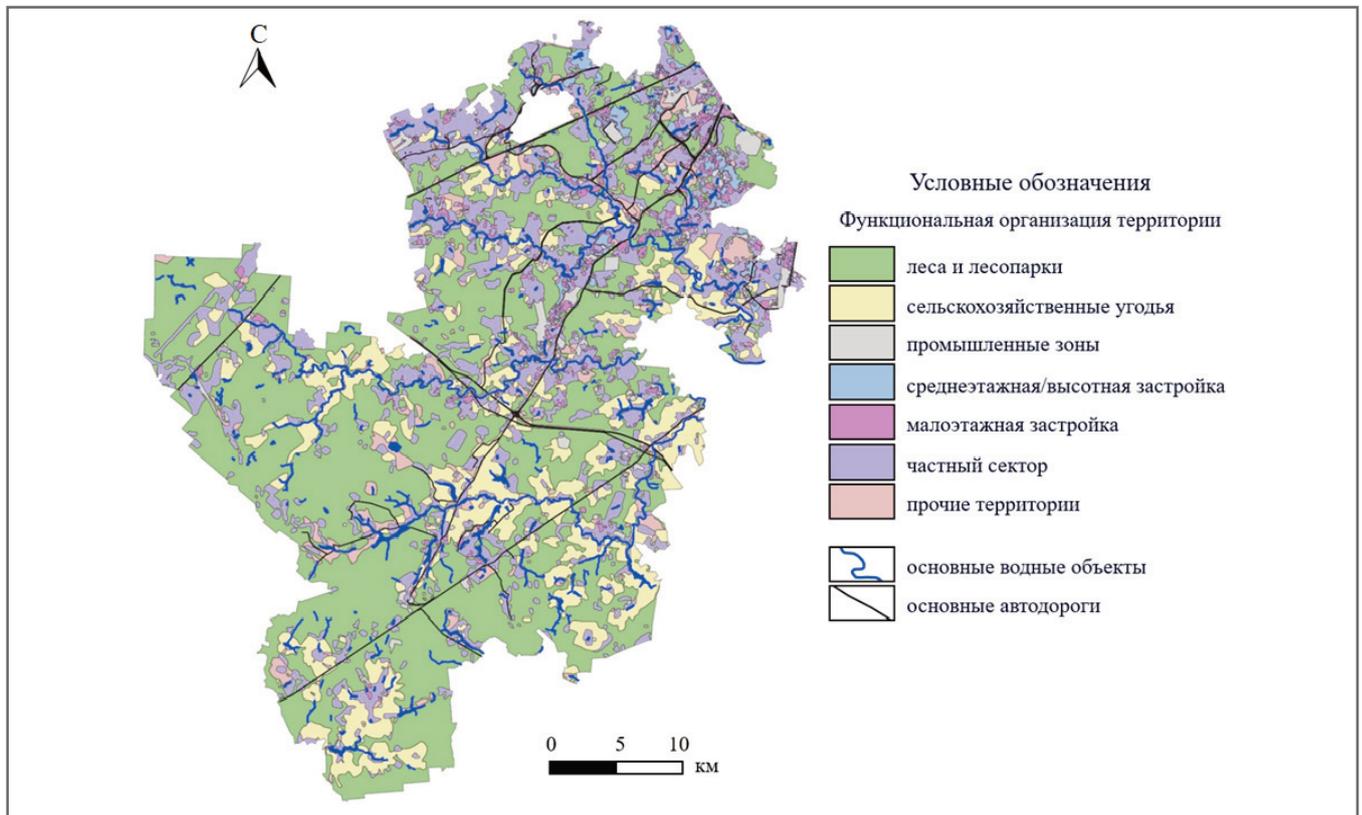


Рис. 1. Схема функциональной организации территории ТиНАО, составленная авторами на основе единой городской картографической основы г. Москвы ГБУ «Мосгоргеотрест» [2]

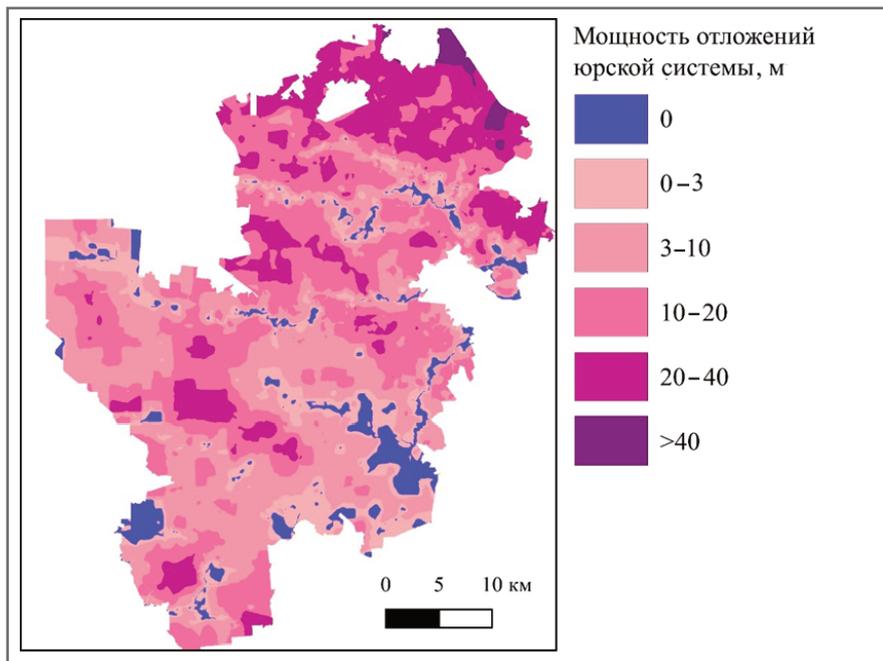


Рис. 2. Карта мощности юрских отложений (составлена авторами на основе данных цифровой трехмерной геологической модели ГБУ «Мосгоргеотрест»)

ретроспективный подход позволит исследовать и анализировать большие по площади территории, уменьшить количество маршрутных наблюдений и сократить объем дорогостоящих полевых работ, что, несомненно, приведет к повышению достоверности и обоснованности полученных результатов.

#### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ▶

В 2012 году площадь территории г. Москвы увеличилась с 1081 до 2561 км<sup>2</sup> за счет присоединения земель, до этого входивших в состав Московской области. Эти территории образовали 2 административных округа –

Троицкий и Новомосковский (ТиНАО) – и получили негласное название «Новая Москва».

«Москва не сразу строилась» – так звучит строчка песни из кинофильма «Москва слезам не верит», и новые территории города, несмотря на то что с момента их присоединения прошло более 10 лет, по большей части остаются небольшими разрозненными поселениями, а южные ее районы практически лишены современного антропогенного вмешательства и покрыты лесом (рис. 1).

В геологическом строении территории ТиНАО принимают участие отложения четвертичной, меловой, юрской и каменноугольной систем.

*Четвертичные отложения* представлены преимущественно моренными, разделяющими их межледниковыми и перекрывающим их покровным горизонтами, аллювиальными отложениями в современных речных долинах. Дочетвертичные ложбины и долины заполнены древними аллювиально-флювиогляциальными отложениями. Локально развиты склоновые, болотные, овражные и техногенные отложения. В среднем мощность чехла четвертичных отложений изменяется в пределах 15–20 м, достигая на участках перекрытия древних долин 40 м.

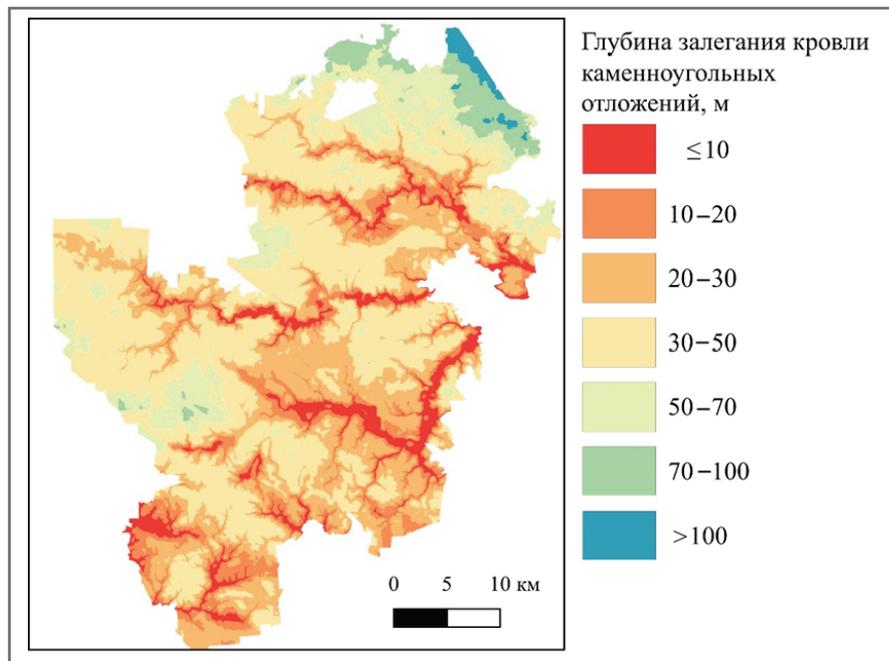
*Меловые отложения* распространены не повсеместно, размыты по доли-

нам крупных рек, имеют мощность до 15–23 м (здесь и далее – по данным ГБУ «Мосгоргеотрест»). Представлены серо-зелеными мелкими и пылеватыми песками и глинами полутвердыми, с прослоями песка и песчаника низкой прочности.

*Юрские отложения*, как и меловые, размыты по долинам рек Десна, Незайка, Пахра, Моча (рис. 2). На таких участках размыва под покровом четвертичных отложений, мощность которых достигает первых метров, залегают карбонатные отложения среднего отдела каменноугольной системы (рис. 3). Отложения представлены серо-зелеными мелкими песками, черно-зелеными и черными глинами от полутвердой до твердой консистенции со следами аммонитов, детритом, конкрециями марказита. Мощность отложений различна, от первых метров до 15–20 м, местами может достигать 25–45 м.

*Каменноугольная система* в пределах глубины исследования представлена отложениями каширского и подольско-мячковского горизонтов. Подольско-мячковские отложения каменноугольной системы представлены известняками от светло-серых до белых, органогенными, с прослоями мелкокристаллических, скрытокристаллических, местами доломитизированными. Мощность отложений достигает 40–50 м и более. Они подстилаются пестроцветными мергелями, доломитами и глинами каширской свиты суммарной мощностью 55–58 м. Именно к этим породам приурочены подземные проявления карста. Однако, стоит отметить, что при наличии такой мощной толщи труднорастворимых пород, известняков, в Московском регионе правильнее говорить о древнем карсте, то есть о таких его подземных проявлениях (полостях и трещинах), которые образовались в прошлые геологические эпохи. На протяжении периода существования сооружений и человеческой жизни значительного увеличения естественных подземных полостей и трещин не происходит [3]. Эти породы правильнее называть «закарстованными», как бы акцентируя внимание на том, что в данный момент скорость их растворения крайне мала.

Несмотря на наличие карбонатных пород и благоприятных условий для развития карста в прошлом, поверхностные проявления этого процесса на территории Московского региона встречаются редко. Так, по литературным данным, в г. Москве в пределах Мос-



**Рис. 3.** Карта глубины залегания кровли каменноугольных закарстованных отложений (составлена авторами на основе данных цифровой трехмерной геологической модели ГБУ «Мосгоргеотрест»)

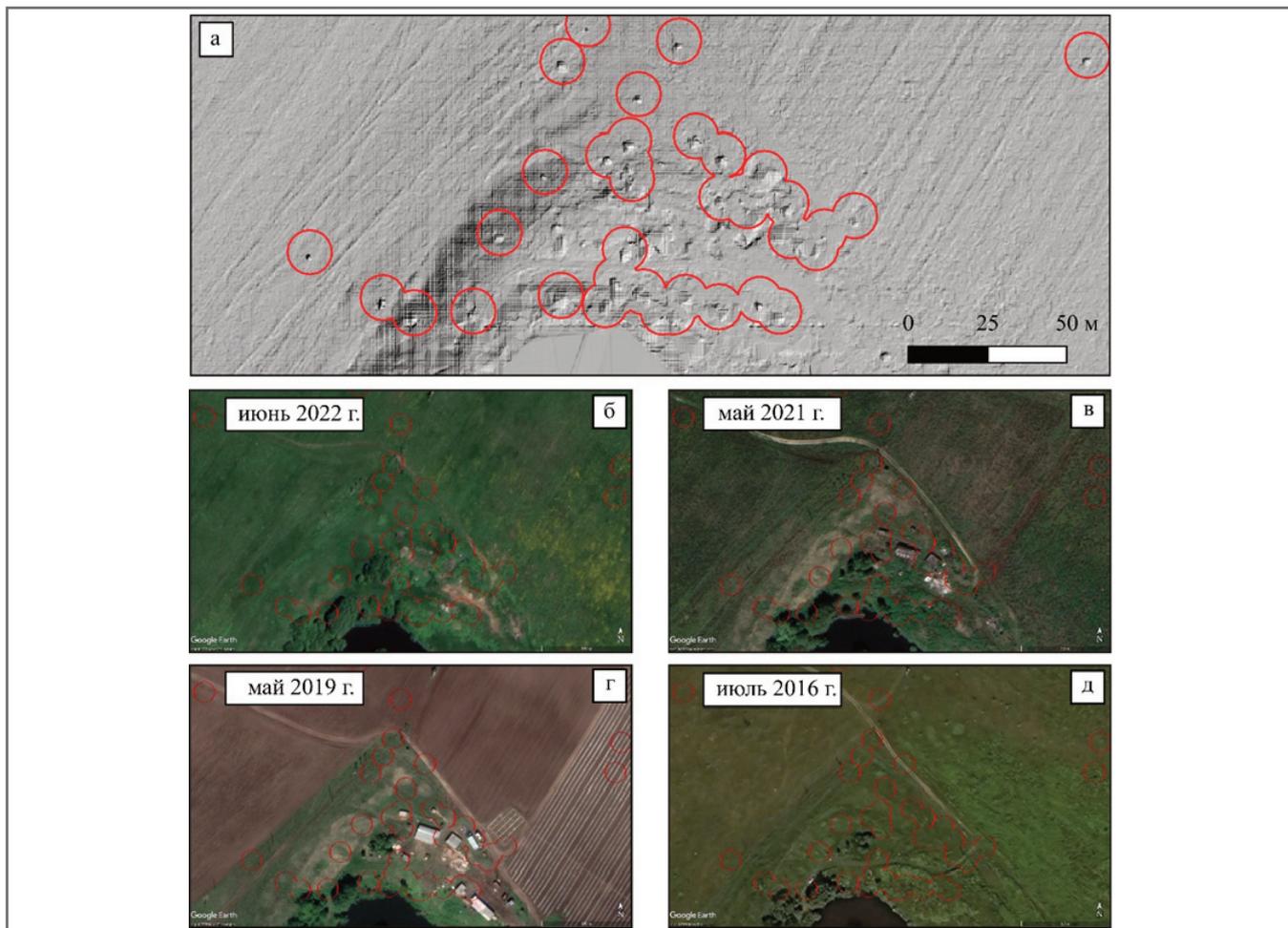
ковской кольцевой автомобильной дороги (МКАД) было выявлено порядка 39 провалов карстового и карстово-суффозионного происхождения [3–7]. Все они образовались во второй половине XX века на северо-западе города. Площадь, затронутая тогда этими процессами, составила 4,9 км<sup>2</sup>. В результате большого количества исследований были установлены факторы, которые привели к их активизации. В качестве причин были названы: увеличение объема откачек подземных вод и последующее образование большой депрессионной воронки; уменьшенная мощность юрских отложений на участке и увеличение градиента вертикальной фильтрации. На основе этой информации в 2012 году Институтом геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН была разработана «Карта опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов» [9], на которой территория города поделена на опасную, потенциально опасную и неопасную категории по «опасности древних карстовых и современных карстово-суффозионных форм». Критериями для выделения категории опасности современных процессов карста и суффозии послужили: наличие или отсутствие на земной поверхности проявлений в виде воронок и мульд оседания; приуроченность к доледниковым и современным речным долинам; отсутствие, прерывистость и мощность слабопроницаемого слоя глинистых пород, разделяющего

грунтовые и трещинно-карстовый водоносные горизонты. Практически вся территория города относится к неопасной или потенциально опасной категориям, к опасной отнесен лишь небольшой участок, в пределах которого и образовались все поверхностные проявления на территории города.

Несмотря на то что ТиНАО входят в состав г. Москвы уже более 10 лет, полностью их покрывающей карты районирования по степени карстовой и карстово-суффозионной опасности построено не было. Одна из причин заключается в недостаточной изученности пораженности этой территории поверхностными проявлениями карстовых и карстово-суффозионных процессов.

Количество, местоположение и морфометрические параметры понижений рельефа природного происхождения являются важнейшими показателями при оценке карстовой, карстово-суффозионной и суффозионной опасности. Авторами в прошлых работах уже была собрана информация о карстовых и карстово-суффозионных воронках на рассматриваемой территории [10]. Однако обнаруженные в ходе исследования данные по ее пораженности были фрагментарными.

Есть две причины того, что ответы на вопросы «Есть ли такие проявления на этой территории?» и «Сколько их?» не были получены до сих пор. Первая причина заключается в значительной площади, на которой невозможно про-



**Рис. 4.** ЦМР 2022 года с разрешением 0,2 м/пикс, составленная авторами на основе данных лидарной съемки ГБУ «Мосгоргеотрест» (а), и космические снимки, полученные с помощью сервиса Google Earth (б–д). Красным обведены оцифрованные по ЦМР локальные понижения земной поверхности

вести рекогносцировку с достаточной степенью полноты результатов. Вторая причина состоит в том, что территория покрыта лесом, который не позволяет использовать панхроматические и мультиспектральные космические снимки для дистанционного поиска.

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПОНИЖЕНИЙ РЕЛЬЕФА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА АНТРОПОГЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ►**

В 2019, 2020 и 2022 годах ГБУ «Мосгоргеотрест» для целей городского планирования проводил лидарную съемку территории ТиНАО. Результатом лидарной съемки является облако точек, преобразуемое в цифровую модель рельефа (ЦМР). Получаемая модель представляет собой растровое изображение, каждый пиксель которого несет в себе информацию о среднем абсолютном значении отметок земной поверхности в его пределах. Такие

модели позволяют проводить автоматизированную идентификацию объектов, однако размер идентифицируемых объектов зависит от разрешающей способности исходных данных. Минимальный размер объекта должен составлять 1–3 пикс [11]. Максимальным разрешением обладают результаты лидарной съемки 2022 года (около 9 млн точек на 1 км<sup>2</sup>, или в среднем 1 точка на участок 10 см × 10 см, что позволяет хорошо различать объекты размером от 30 см). Благодаря этим данным появилась возможность решить вопрос поиска локальных понижений земной поверхности природного происхождения.

Обрабатываются и анализируются такие данные в геоинформационных системах (ГИС), и вопрос автоматической оцифровки по ЦМР замкнутых локальных понижений рельефа не настолько сложен, насколько затруднительно определение происхождения понижений.

Так, на участках территории ТиНАО, свободных от современной антропогенной (строительной и сельскохозяйственной) деятельности, локальные пониже-

ния рельефа могут образоваться в результате:

- деятельности экзогенных геологических процессов – карста и суффозии;
- поверхностной экскавации грунтов – открытой разработки природных строительных материалов для целей современного строительства, археологических раскопок, строительства фортификационных сооружений и т.д.;
- обрушения и оседания кровли горных выработок, проходка которых производилась для целей подземной добычи строительных материалов;
- военных действий (образования воронок от взрывов) и военных учений.

Чтобы установить происхождение небольших понижений рельефа, необходимо изучить историю техногенной трансформации рассматриваемой территории, то есть провести ретроспективный анализ человеческой деятельности, которая могла привести к появлению таких форм рельефа. При отсутствии информации об антропогенном вмешательстве можно сделать вывод об их возможном естественном формиро-

вании и выбрать такие участки как наиболее перспективные для проведения полевых и лабораторных исследований с целью определения генезиса воронок.

### **ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭКСКАВАЦИЯ ГРУНТОВ КАК ПРИЧИНА ОБРАЗОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ Понижений РЕЛЬЕФА ►**

Добыча строительных материалов открытым способом ведется на территории Москвы и области очень давно. Основными объектами добычи являются строительные и стекольные пески четвертичного и мелового возраста, а также известняки и доломиты московского яруса среднего карбона. Поверхностная экскавация грунтов для добычи строительных материалов – масштабное извлечение грунта с предварительным снятием слоя перекрывающих отложений. В рамках исследования, целью которого является поиск понижений земной поверхности природного происхождения, такие участки вряд ли будут рассматриваться, так как данные понижения слишком велики, чтобы предполагать их природное происхождение.

Понижения земной поверхности как результат строительной деятельности могут характеризоваться значительно меньшими габаритами и ввести в заблуждение исследователей. Изучить историю антропогенной деятельности на территории за последние 10–15 лет можно с использованием аэрофотоснимков, например с помощью сервиса Google Earth. На рисунке 4 представлен участок изгиба р. Десны около пос. Рыбино. Берега р. Десны были известным местом добычи строительных материалов подземным способом. Известняк тут залегает на глубине первых метров. Глинистые экранирующие отложения, которые могут препятствовать перемещению вышележащего несвязного грунта в полости и трещины в закарстованных породах, отсутствуют. Таким образом, на участке выявлены условия для образования поверхностных понижений природного происхождения. На рисунке 4, а представлены результаты лидарной съемки 2022 года в отображении с так называемым оттененным рельефом, которое симулирует падение солнечных лучей на земную поверхность, подчеркивая особенности рельефа. На ЦМР видно некоторое количество понижений рельефа, которые можно принять за природные. На рисунках 4, б–д показаны аэрофотоснимки, сделанные в период с 2016 по 2022 год. По снимку 2022 года (см. рис. 4, б) этот участок ви-

зуально оценивается, как техногенно нетронутый, однако в интервале 2018–2021 гг. на этой же территории заметны небольшие сооружения, которые были возведены в связи со строительством проспекта Славского. Таким образом, все понижения на данном участке должны быть отнесены к образованным в результате строительной деятельности человека и, вероятно, не имеющим ничего общего с формами рельефа, которые ищут авторы исследования.

На территории ТиНАО находится ряд памятников археологического наследия, сведения о точном местоположении которых не публикуются в открытых источниках. Вероятно, эта информация скрыта для обеспечения сохранности погребенных в их границах артефактов. Наличие на участке объекта археологического наследия или археологического объекта иного статуса говорит о том, что ранее территория была подвержена деятельности человека. Кроме того, на таких участках возможно проведение несанкционированных раскопок «черными археологами». Их деятельность отличается тем, что она направлена именно на поиск артефактов и их дальнейшую продажу или коллекционирование, а не на тщательное восстановление, слой за слоем, истории разворачивавшихся событий, при котором так важно подмечать последовательность напластований культурного слоя. В результате такой деятельности часто остаются неликвидированные шурфы, а изъятый и сложенный рядом грунт со временем размывается, что делает невозможным определение (даже в полевых условиях) причин их возникновения.

Авторам удалось найти и оцифровать места расположения объектов, представляющих археологический интерес, по данным на 1993 год (рис. 5) [12, 13]. При составлении рисунка 5 авторы придерживались терминологии карт [12, 13]. Остатки неукрепленных поселений раннего железного века и средневековья – селища, укрепленные городища (кроме ныне существующих городов), могильники с насыпью (курганы).

Таким образом, на данный момент авторами собрана информация о 44 селищах, 2 городищах и 33 курганах. С помощью интернет-ресурса «Археологическая карта России» [14], данные для которого собирает и публикует Институт археологии РАН, с 1993 года на территории ТиНАО было выявлено еще некоторое количество объектов археологического наследия, точное количе-

ство и примерное местоположение которых еще предстоит установить.

Например, в мае 2020 года на сайте mos.ru сообщалось, что в ТиНАО на границе с Калужской областью было обнаружено 4 кургана, датируемые серединой XII – началом XIII столетия. Они представляют собой холмы высотой примерно 1,5 м, а в диаметре достигают 10–15 м [15]. Авторы этого исследования считают, что холмы такого размера, не свойственные для данной территории, также можно автоматизированно идентифицировать по ЦМР, построенной по результатам лидарной съемки. Данная задача идентична автоматическому поиску бугров пучения (локальных повышений рельефа), которую авторы уже решали по открытым данным дистанционного зондирования Земли [16].

В настоящем исследовании принимается, что участки, в пределах которых ранее располагались поселения и проходили боевые действия, имеют антропогенно измененный рельеф.

К такому выводу авторы пришли после раскопки воронки, происхождение которой было предварительно определено как карстово-суффозионное. Понижение оказалась подполом бывшей постройки: по контурам были обнаружены обработанные блоки известняка, установленные в качестве фундамента, угловой камень с монетой под ним, а также остатки щепы, угля, ржавые гвозди и обломки керамики. Благодаря двухверстной топографической карте Московской губернии 1860 года, построенной Ф.Ф. Шубертом, стало известно, что на этой территории находилось поселение с мельницей (рис. 6, а) (Федор Федорович Шуберт (1789–1865) – русский ученый-геодезист, генерал от инфантерии, директор Военно-топографического и гидрографического депо, первый руководитель Корпуса топографов и действительный член Русского географического общества.) Данная карта находится в открытом доступе [17].

### **ПОДРАБОТКА ТЕРРИТОРИИ КАК ПРИЧИНА ОБРАЗОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ Понижений РЕЛЬЕФА ►**

С XII века на территории Московской области, которой ранее принадлежала территория нынешних ТиНАО, велась активная добыча «белого камня» – известняков и доломитов из различных по возрасту пластов. В зависимости от качества камень распределялся на три сорта – стеной (для кладки),

известковый (для получения извести путем обжига) и бутовый (мелкая колотая плита). С первой половины XVIII века начала развиваться подземная разработка стенового и облицовочного камня, использовавшегося для производства цоколей, колонн, надгробий, белокаменных фигурных украшений и т.д. [18]. Самые ранние горные выработки находятся около села Мячково. Выемка «белого камня» таким способом производилась преимущественно по высокому берегу р. Пахры, по долине Москвы-реки от железнодорожной станции Тучково до г. Звенигорода и по р. Наре.

Подземная добыча камня начиналась с выкапывания ям с поверхности до кровли известняка. Затем по слою пробивались горизонтальные выработки – штольни. И параллельно, если позволяли свойства камня, производилась его добыча. Выбор добываемого слоя зависел от его близости к поверхности и от качества известняка. Штольни располагались конформно разрабатываемому слою. В наиболее поздних каменоломнях начала – середины XX века производилось полное извлечение полезного пласта, а для поддержания сводов каменоломни и организации пространства для возможности ориентирования формирующееся подземное пространство закладывалось бутовым камнем. В более ранних выработках оставались нетронутые целики известняков.

Ширина штолен в забое составляла 7–8 м, в высоту они могли достигать 1,9 м. Добытые блоки перемещались на поверхность на маленьких тележках, волокушах вручную или с помощью лошадей. Отходы камня размещались в виде бутовой кладки, которой плотно выкладывали выработанное пространство, в результате чего оставались проходы шириной не менее 1,4 м, что позволяло транспортировать блоки крупных размеров.

Субгоризонтальное расположение пластов каменноугольных отложений определяло и пространственное расположение выработок. Подъем крупных блоков камня вертикально с помощью «колодцев» требовал больших усилий, поэтому выемка камня производилась горизонтально там, где полезный пласт известняков был естественным образом ограничен рельефом – чаще всего входы в каменоломни располагались по крутым берегам рек, где обнажались выходы каменноугольных отложений или мощность перекрывающих их четвертичных отложений была мала. Одним из свидетельств добычи камня являются

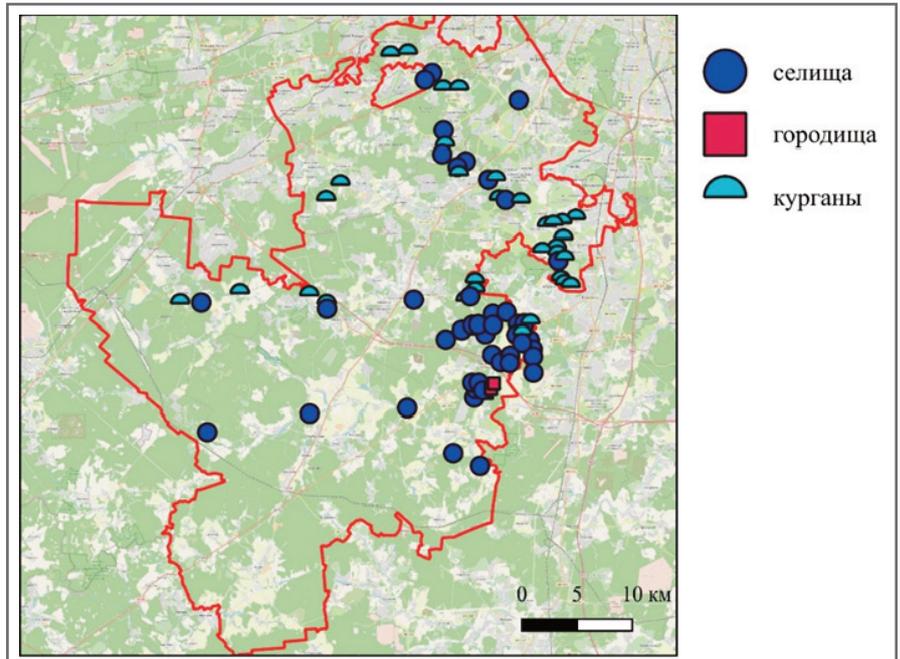


Рис. 5. Карта расположения археологических памятников на территории ТиНАО по данным 1993 года (составлена авторами по данным карт [12, 13])

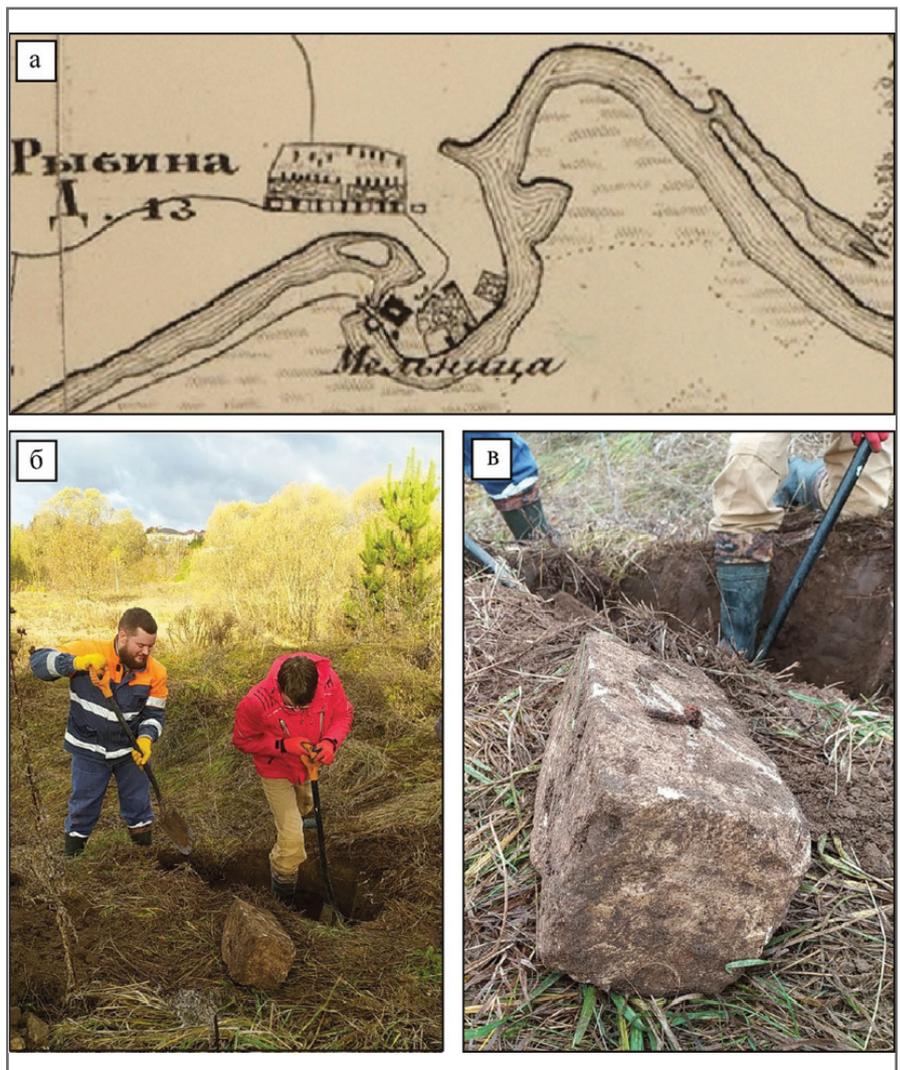


Рис. 6. Фрагмент двухверстной карты Ф.Ф. Шуберта для территории Московской губернии 1860 года [17] (а); раскопка понижения, генезис которого был предварительно определен как карстово-суффозионный (фото Н.В. Абакумовой) (б); старинные блок известняка, часть фундамента мельницы и гвоздь (фото Н.В. Абакумовой) (в)

«точные рвы» – горизонтальные канавы, идущие перпендикулярно от реки в сторону водораздела, позволявшие безопасно и с наименьшими трудозатратами извлекать готовую каменную продукцию на поверхность и транспортировать ее по рекам потребителю. Таким образом, зная особенности добычи «белого камня», можно определить области, в которых возможно наличие каменоломен на территории ТиНАО.

Официально каменоломни не существуют – они не являются памятниками культурного наследия, архитектуры, природы или геологическими памятниками, не имеют никакого охранного статуса. Поэтому все сведения известны благодаря исследовательским группам, таким как «Черное Солнце» и «Легучая мышь».

По результатам анализа опубликованной литературы были собраны сведения об известных на территории ТиНАО системах каменоломен (см. таблицу) и составлена схема их расположения (рис. 7).

Каменоломни, представляющие собой пустоты и полости в карбонатных отложениях каменноугольной системы, являются областями выноса вышележащих грунтов и ослабленными зонами, которые могут вызывать обрушение кровли штреков. Полости, в которые может переместиться или обвалиться грунт, имеют большие объемы, поэтому на земной поверхности присутствуют характерные замкнутые понижения, которые очень хорошо идентифицируются на ЦМР. На рисунке 8 представлена ЦМР территории Еринских каменоломен, расположенных около поселка Ерино на берегу р. Десны.

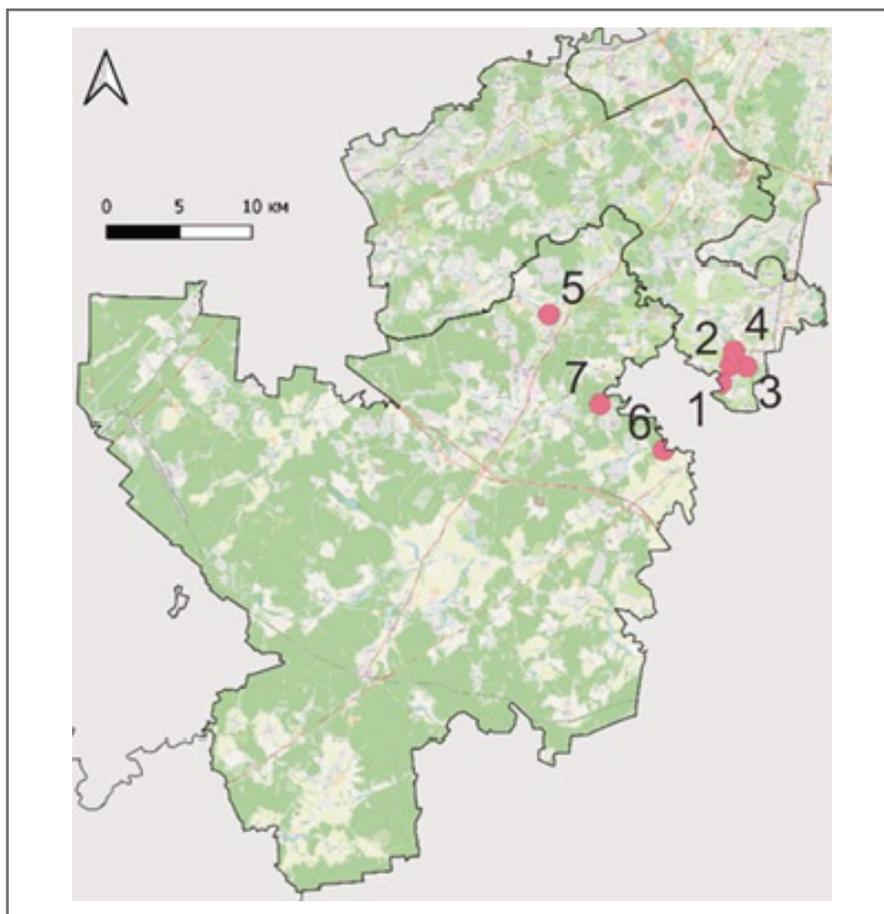
### ПОНИЖЕНИЯ РЕЛЬЕФА, ОБРАЗОВАННЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ ►

На рисунке 9 представлен участок на юге ТиНАО, на границе с Калужской областью. В геологическом строении территории согласно атласу, созданному ГБУ «Мосгоргеотрест» в масштабе 1:50 000, принимают участие отложения четвертичной, юрской и каменноугольной систем. Местами юрские породы полностью размыты – и под четвертичными отложениями сразу залегают закарстованные отложения среднего отдела каменноугольной системы. Маленькая мощность юрских пород и местами их отсутствие создают все условия для образования карстовых провалов и связанных с карстом суффозионных воронок.

По данным дистанционного зондирования Земли, выполненного по заказу

**Таблица. Наиболее изученные подземные горные выработки на территории Новой Москвы**

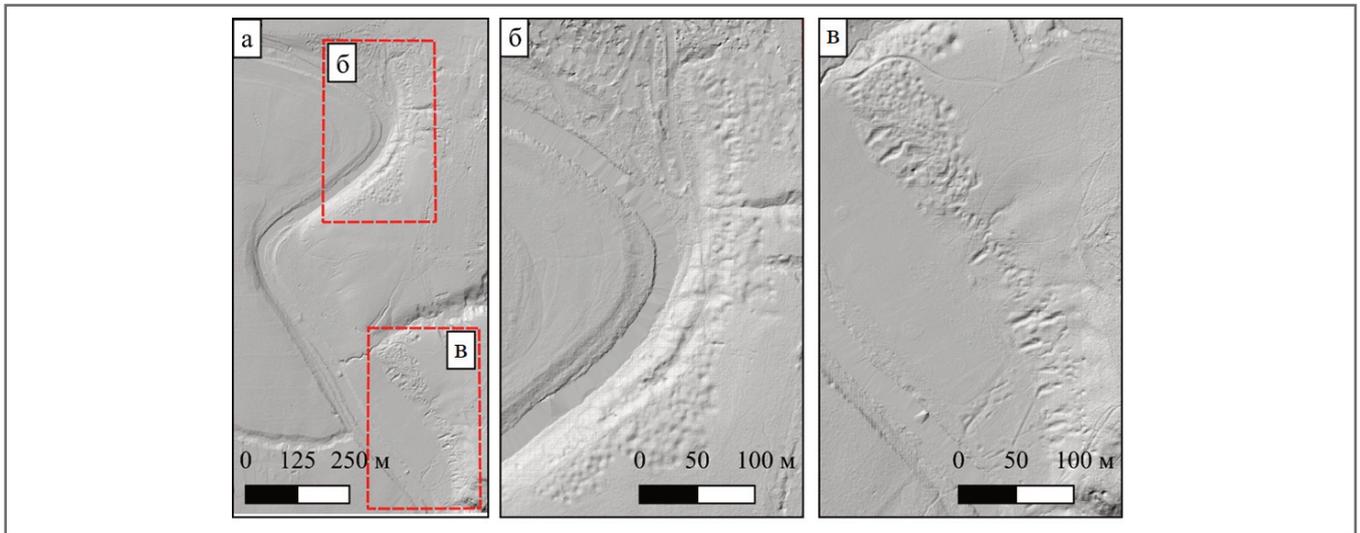
Название	Протяженность, м	Источник
Системы Еринских каменоломен	518	[19]
Рыбинские	2 385	[20]
Девятская (Силикаты)	13 400	[21]
Алхимовские	432	[22]
Богородская (Ватутинки)	394	[21]
Солнечная (Лубянка)	2 109+184	[21]
Гагаринская	20	[21]



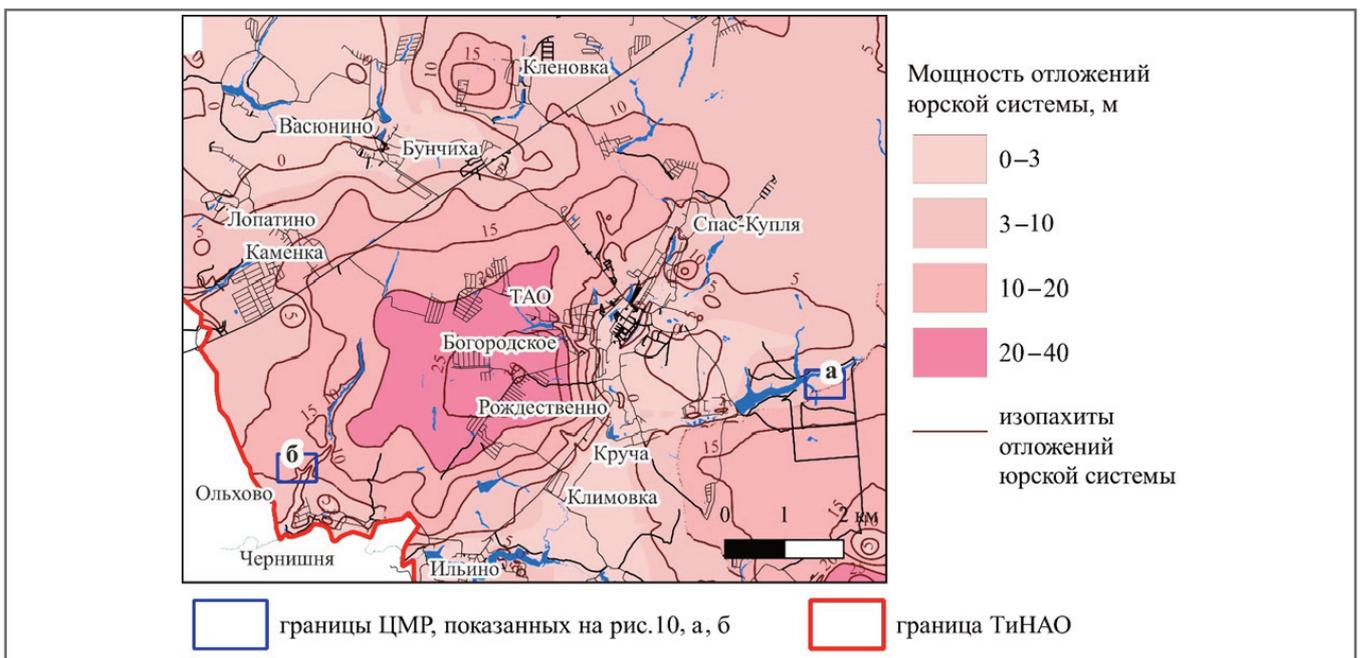
**Рис. 7.** Карта расположения известных каменоломен (составлена авторами на основе данных таблицы)

ГБУ «Мосгоргеотрест», были построены ЦМР для двух фрагментов этого участка (обведенных на рисунке 9 синими рамками) и проведено автоматизированное выделение локальных замкнутых понижений. Эти участки покрыты густым лесом, который даже зимой делает невозможным использование аэро- и космоснимков. На рисунке 10 красным обведены оцифрованные понижения рельефа глубиной 0,3 м и более, обладающие близкой к кругу формой. На рисунке 10, а оцифровано 25 понижений, на рисунке 10, б – 126 понижений. Некоторые из них имеют глубину до 1,3 м.

Погрузимся в историю этой территории. Последний раз боевые действия на исследуемых участках проходили в 1941 году при попытке немецких войск захватить Москву. Основные бои шли на западе от города, но коснулись и присоединенных к нему в 2012 году территорий. В ходе битвы за Москву к середине октября 1941 года поселения Кузовлево, Ильино и Тетеринки были почти захвачены немецкими войсками [23]. 24 октября немецкие войска, прорвавшись через Рождествено и Богородское в Бунчиху, вышли на Варшавское шоссе. Утром 25 октября они вышли на южную окраину деревни Кресты, которая



**Рис. 8.** Фрагменты ЦМР 2022 года (с разрешением 0,2 м/пикс): а – участок, на котором располагаются системы Еринских каменоломен; б, в – увеличенные участки, обведенные на рисунке «а» соответствующими красными рамками (составлено авторами на основе данных лидарной съемки ГБУ «Мосгоргеотрест»)



**Рис. 9.** Карта мощности отложений юрской системы на участке, расположенном на юге ТиНАО (составлена авторами на основе данных цифровой трехмерной геологической модели ГБУ «Мосгоргеотрест»)

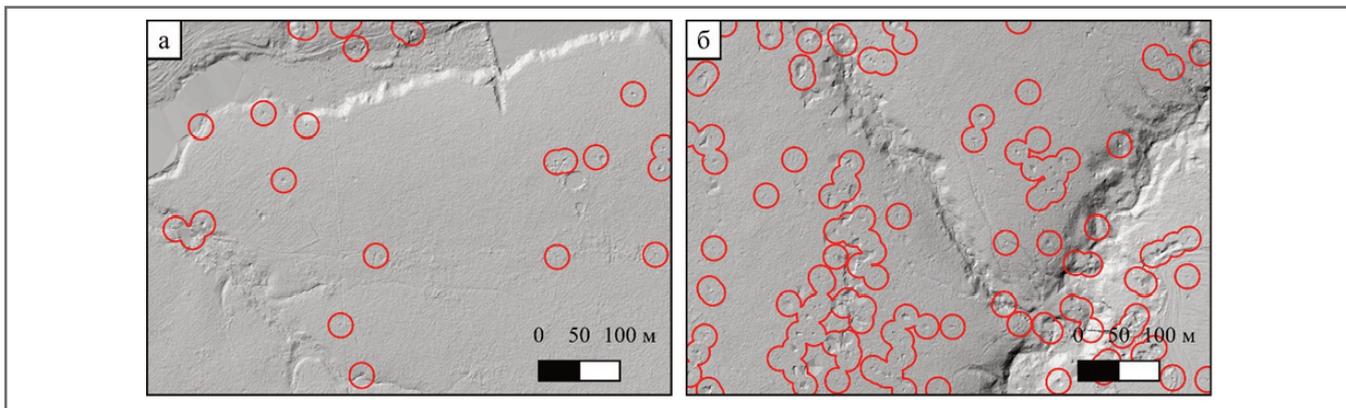
находится на пересечении Варшавского шоссе и старой Калужской дороги. Захватчикам представлялась возможность развить стремительное наступление на Подольск и через Косовку – Вороново на Красную Пахру. И, возможно, это бы у них получилось, если бы в Кресты в это же время не входили передовые подразделения 93-й Восточно-Сибирской стрелковой дивизии. В течение 25 и 26 октября в местности Кресты – Бунчиха шло кровопролитное сражение. Особенно тяжелым оно было за деревню Бунчиха. Вражеские войска ожесточенно бомбили позиции дивизии, деревню Кресты и прилегающие окрест-

ности, непосредственно полосу шоссе от Ясенок до Бунчихи. В бомбардировках участвовали одновременно до 30 немецких самолетов. 27 октября 226-й, 129-й стрелковые полки и часть 51-го, поддерживаемые 100-м и 128-м артиллерийскими полками и танкистами 26-й танковой бригады, выбили немцев из Бунчихи и в течение дня отбросили их на 8 км, на рубеж Ольхово – Кузовлево (северный берег р. Десенки). «Опрокинуть» немцев за р. Нару на этом участке не удалось, до нее оставалось около 2 км [24].

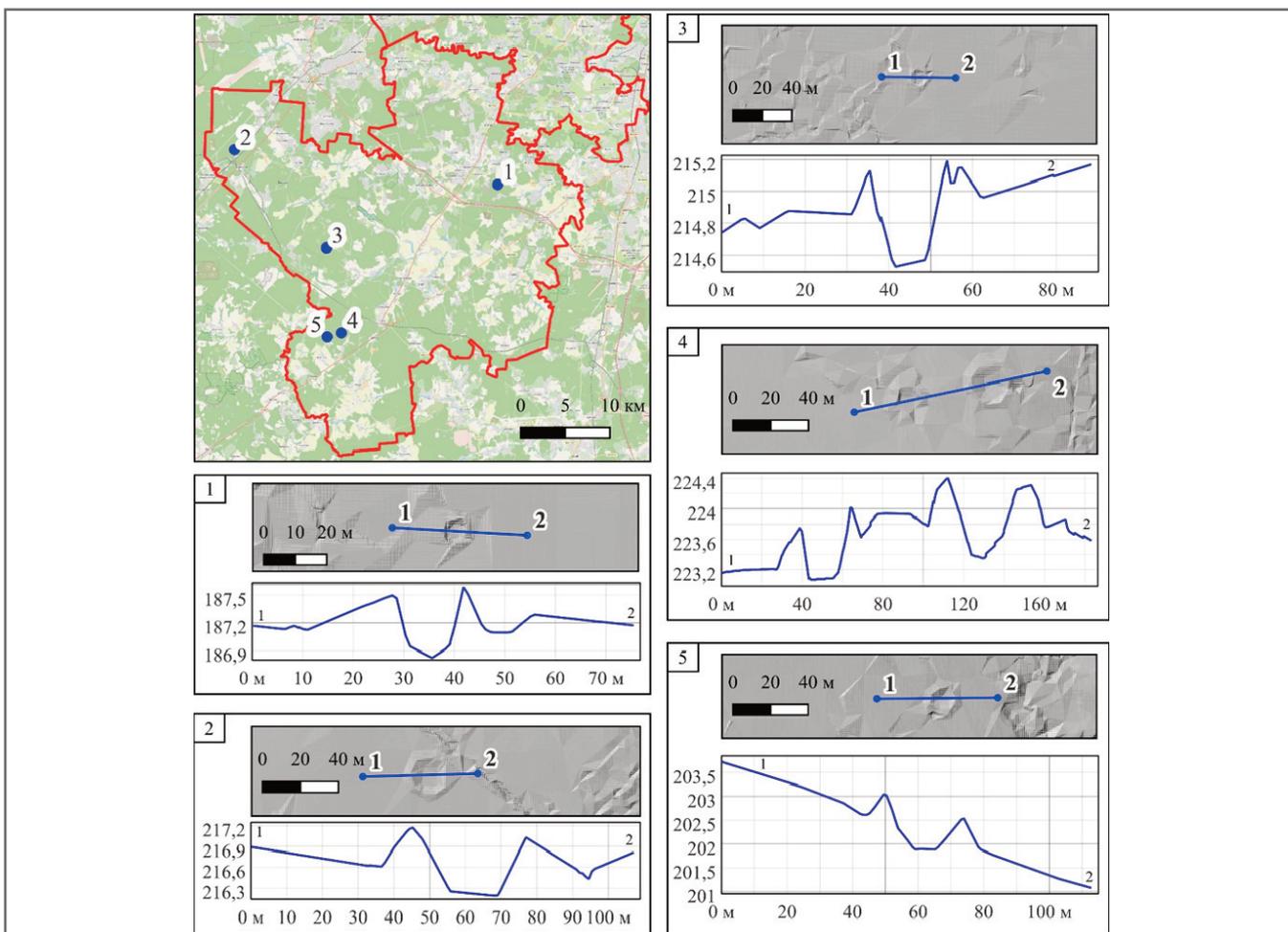
27 октября 1941 года разбился самолет лейтенанта 177-го авиаполка Вик-

тора Талахилина. Над р. Нарой легчик совершил первый в истории ночной таран, сбив машину врага. Посмертно ему было присвоено звание Героя Советского Союза. В Лопатине, на месте гибели героя, установлен крест и памятный знак – крыло боевого самолета [25].

В интервью, взятом у краеведов в 2019 году изданием «Новые округа» [26], сообщается, что немецким войскам удалось перейти р. Нару, создать плацдарм и переправить танки через водный поток у пос. Рогово. Согласно плану оттуда враги пытались выйти на Подольск, а дальше – на Москву. С начала ноября по декабрь 1941 года



**Рис. 10.** ЦМР участков, обведенных синими рамками соответственно «а» и «б» на рисунке 9. Красным обведены локальные понижения рельефа (составлено авторами на основе данных лидарной съемки ГБУ «Мосгоргеотрест»)



**Рис. 11.** ЦМР рассматриваемой территории, имеющая разрешение 0,5 м/пикс, с указанием точек расположения изученных понижений, имеющих вали по периметрам, и продольные профили этих понижений в соответствующих местах (составлено авторами на основе данных лидарной съемки ГБУ «Мосгоргеотрест»)

солдатам 43-й армии удалось ликвидировать немецкий плацдарм. В этой же новости сообщается, что активные горожане из поисковых отделений регулярно принимают участие во Всероссийской акции «Вахта памяти». Активисты выезжают на те места, где прошли битвы времен Второй мировой войны. В ходе поисковых сезонов работ горожане стараются установить имена и

судьбы защитников Родины в годы Великой Отечественной войны.

Участок «б», выделенный синей рамкой на рисунке 9, находится между р. Нарой и пос. Рогово. Вероятно, такое большое количество локальных понижений рельефа на нем, как показано на рисунке 10, б, связано с боевыми действиями, проводившимися на данной территории. Участок «а», выделенный

синей рамкой на рисунке 9, находится за д. Горнево, и активных сражений в его границах не происходило, чем и объясняется меньшее количество бессточных впадин на нем (см. рис. 10, а).

В этих местах в 1812 году генерал М.А. Милорадович дал французам бой при Спас-Купле, здесь под командованием М.И. Кутузова был совершен знаменитый Тарутинский маневр, который

во многом положил начало победам русской армии над Наполеоном [23]. Согласно картам-схемам из книги Федора Андреевича Макшеева 1912 года издания [27], после того как Наполеон с войском покинул Москву, он прошел через территорию нынешнего ТиНАО. Однако авторы не предполагают, что эти исторические события проявляются в современном рельефе.

Также во время Великой Отечественной войны небо над современной территорией ТиНАО было полем для сражения. Поверхность земли подвергалась бомбардировкам. В результате падения авиационной бомбы на земной поверхности возникла воронка и в большинстве случаев по ее периметру образовывался вал [28–30].

Так как образование валов по контуру понижений противоречит гипотезе о природном их происхождении, то все такие понижения будут классифицированы как понижения искусственного происхождения. На рисунке 11 представлены примеры форм рельефа, вокруг которых наблюдаются земляные валы. Так, форма рельефа 3 (см. рис. 11) имеет общий диаметр (в границах внешних краев вала) 30,9 м, плоская внутренняя часть дна имеет диаметр 7,4 м, высота вала над обычным уровнем земли составляет 0,3 м, глубина воронки от обычного уровня земли – 0,3 м. Форма рельефа 2 (см. рис. 11) имеет общий диаметр (вместе с внешними краями вала) 56,67 м, диаметр плоского дна составляет 13,4 м, высота вала – 0,5 м, глубина понижения – 0,5 м.

Таким образом, для оконтуривания участков, в границах которых пониже-

ния рельефа предположительно имеют природное происхождение, авторы предлагают придерживаться описанной ниже последовательности действий:

- 1) выявление на основе архивных карт участков, на которых к сегодняшнему дню не сохранились существовавшие ранее здания и сооружения;
- 2) сбор пространственной информации об объектах археологического наследия и археологических объектах иного статуса, о подземных выработках;
- 3) выделение на основе данных о геологическом строении территории областей, где теоретически могут образовываться локальные понижения поверхности природного происхождения;
- 4) исключение участков, антропогенное изменение которых можно наблюдать в современном ландшафте, из полученных на предыдущем шаге областей (исключение участков, занятых современной одиночной и массовой застройкой, линейными сооружениями);
- 5) автоматизированная оцифровка локальных замкнутых понижений рельефа на оставшихся территориях на основе ЦМР, построенной по данным лидарной съемки;
- 6) построение карты плотности локальных понижений земной поверхности на участках с минимальной степенью антропогенных изменений;
- 7) полевое обследование участков с повышенной плотностью понижений.

## Выводы ►

1. Проведенные авторами исследования показали, что на сегодняшний день из всех обследованных замкнутых понижений в рельефе ни одно не является

проявлением карстовых и суффозионных процессов. Основной причиной их образования является разного рода хозяйственная деятельность человека. Однако наличие условий, благоприятствующих развитию этих процессов, не исключает возможности наличия воронок природного генезиса на исследуемой территории.

2. На примере ТиНАО было показано, что наличие условий для протекания карстовых и суффозионных процессов и присутствие локальных понижений рельефа могут быть не связанными друг с другом фактами. Локальные понижения рельефа, похожие по форме на природные, могут быть результатами строительной деятельности человека, экскавации грунтов в результате археологических работ, обрушения кровли подземных выработок. Описанная в работе методика позволяет предположить происхождение обнаруженных локальных понижений и минимизировать ошибки в интерпретации результатов. С ее помощью можно выделить территории, которые в наименьшей степени подверглись антропогенным изменениям.

3. Стоит принять во внимание, что при современном уровне развития методов дистанционного зондирования Земли и при наличии спутниковых снимков высокого разрешения образовавшиеся в космическую эпоху воронки будут идентифицированы гораздо проще, что позволит вести более тщательный мониторинг развивающихся природных и антропогенных геологических процессов и применять принцип актуализма для анализа существовавших ранее воронок. ■

## Список литературы ►

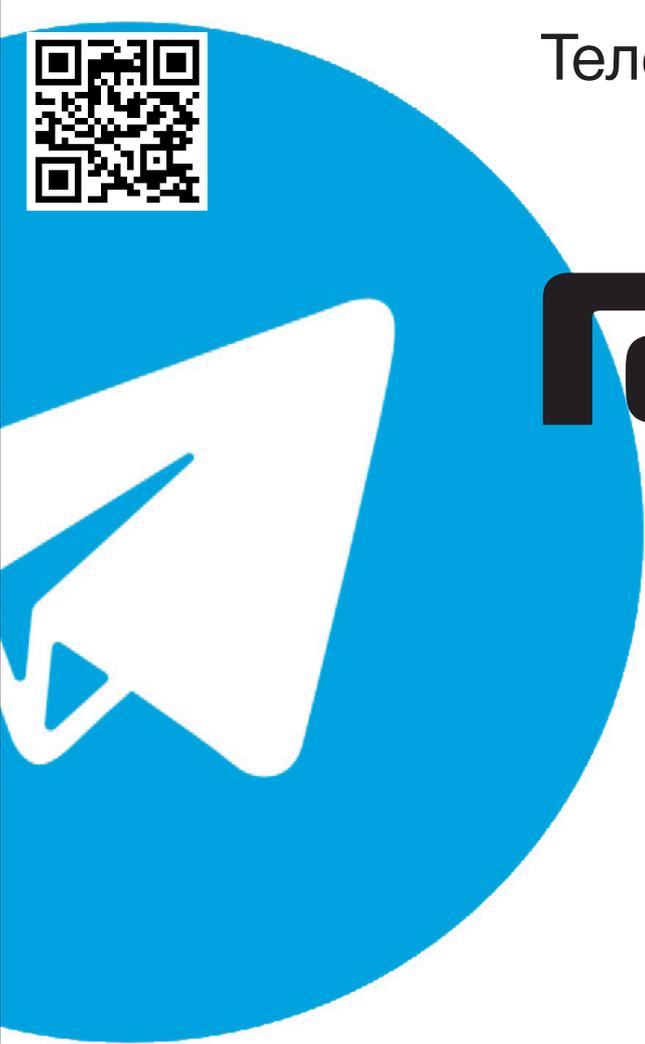
1. СП 22.13330.2016 (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*). Основания зданий и сооружений. 2016.
2. Жидков Р.Ю., Романова Е.Р., Абакумова Н.В., Рекунов В.С., Лесников Г.А. Применение данных дистанционного зондирования Земли для идентификации опасных геологических процессов на территории Новой Москвы // Инженерная геология. 2023. Т. XVIII. № 4. С. 18–37. DOI: 10.25296/1993-5056-2023-18-4-18-37.
3. Аникеев А.В. О роли карстового процесса в образовании карстово-суффозионных воронок // Сергеевские чтения. Развитие научных идей Е.М. Сергеева на современном этапе: юб. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. акад. Е.М. Сергеева. Вып. 16. М.: РУДН, 2014. С. 224–229.
4. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска: монография. М.: РУДН, 2017. 328 с.
5. Кочев А.Д. Зоны доломитизированных известняков и линеаменты как индикаторы повышенной закарстованности карбонатных пород // Инженерная геология. 2022. № 2. С. 28–41. DOI: 10.25296/1993-5056-2022-17-2-28-4.
6. Кочев А.Д. Изучение механизма образования карстово-суффозионных воронок в г. Москве // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: матер. XVI Общерос. научно-практ. конф. М.: ООО «Геомаркетинг», 2021. С. 105–120.
7. Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зойнонц И.Л. К вопросу инженерно-геологического районирования территории северо-запада г. Москвы по степени опасности развития карстово-суффозионных процессов // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения. М.: ООО «Геомаркетинг», 2017. С. 24–40.

8. Инструкция по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов. М.: Картолитография, 1984. 15 с.
9. Кутепов В.М., Анисимова Н.Г., Грибов Е.М., Кожевникова И.А., Козлякова И.В. и др. Карта опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов. Масштаб 1:10 000 (2-я ред.). М.: ГУП «Мосгоргеотрест», ИГЭ РАН, 2012.
10. Романова Е.Р., Абакумова Н.В., Жидков Р.Ю. О возможности применения данных дистанционного зондирования для идентификации поверхностных проявлений процессов карста и суффозии на территории Новой Москвы // Сергеевские чтения. Региональная инженерная геология и геоэкология. Вып. 25. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, 28–29 марта 2024 г. Москва: Геоинфо, 2024. С. 446–450.
11. Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учебное пособие. Пермь: Издательский центр Пермского государственного национального исследовательского университета, 2020. 191 с. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovaniye-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>.
12. Археологическая карта России: Московская область. Часть 1 / сост. Г.Г. Король, Ю.А. Краснов, Т.Д. Николаенко, Б.Е. Янишевский. Институт археологии РАН, 1994. 320 с.
13. Археологическая карта России: Московская область. Часть 2 / сост. Г.Г. Король, Ю.А. Краснов, Т.Д. Николаенко, Б.Е. Янишевский. М.: Институт археологии РАН, 1995. 240 с.
14. Археологическая карта России // Интернет-ресурс [home.archaeolog.ru](http://home.archaeolog.ru). Дата последнего обращения: 10.12.2024. URL: <https://home.archaeolog.ru/oanmap/?g=t&ll=55.297444,36.438873&z=5&m=0>.
15. Здесь жили потомки вятичей: в ТиНАО археологи нашли древние курганы // [mos.ru/news](http://mos.ru/news). 21.05.2020. URL: <https://www.mos.ru/news/item/74359073/?ysclid=m7m1kfqz309921256>
16. Романова Е.Р., Жидков Р.Ю. Автоматическая идентификация бугров пучения на основе данных ЦМР Arctic DEM // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2024 г.
17. 1860. Карта Шуберта – Подмосковье. 1:84К // [retromap.ru](http://retromap.ru). Старые карты России и зарубежья. Дата последнего обращения: 10.12.2024. URL: [https://retromap.ru/0818601\\_55.751401,37.62141](https://retromap.ru/0818601_55.751401,37.62141).
18. Звягинцев Л.И., Викторов А.М. Белый камень Подмосковья. М.: Недра, 1989. 118 с.
19. Парфенов А.А. Еринский спелестологический участок // Спелеология и спелестология: Сборник материалов 2-й Международной научной заочной конференции. Набережные Челны: НИСПТР, 2011. С. 132–138.
20. Долотов Ю.А., Парфенов А.А. Рыбинский спелестологический блок // Пещеры: сб. науч. тр. Перм. гос. нац. иссл. ун-та. Вып. 35. Пермь, 2012. С. 53–60.
21. Сохин М.Ю., Долотов Ю.А. Спелестологическая изученность бассейна реки Пахры (Московская область). Часть 1: Верхнепахринский и Подольский спелестологические районы // Спелеология и спелестология: сборник материалов конференций. Набережные Челны: НГПУ, 2016. № 7. С. 253–274.
22. Яновская Е.Г. Каменоломни в д. Алхимово // Спелеология и спелестология: сборник материалов 3-й Международной научной конференции. Набережные Челны: НИСПТР, 2012. С. 157–162.
23. Поселение Роговское в городе Москве. Историческая справка // [Rogovskoe.ru](http://Rogovskoe.ru). Дата последнего обращения: 10.12.2024. URL: [https://rogovskoe.ru/o\\_poselenii/istoricheskaya\\_spravka/](https://rogovskoe.ru/o_poselenii/istoricheskaya_spravka/).
24. Кольванов Б. Подольский рубеж (глазами очевидца и участника событий) // [Podolsk.ru](http://Podolsk.ru). 11.03.2014. URL: <https://www.podolsk.ru/about/n16080.html>.
25. Эхо войны: как проходили сражения на подступах к Москве. Поселение Роговское // Москва24. 17.04.2015. URL: <https://www.m24.ru/articles/Den-Pobedy/17042015/71276>.
26. Абдурахманова П. Поселение Роговское: как защищали Москву от противников на границе нынешней Новой Москвы // Новые округа. 07.05.2019. URL: <https://nov-okruga.ru/poselenie-rogovskoe-kak-zashhishhali-moskvu-ot-protivnikov-na-granitse-nyineshney-novoy-moskvyi/>.
27. Макшеев Ф.А. За веру, царя и отечество: отечественная война 1812 г. в картинах [альбом]. 1812–1912. Париж: И.С. Лапин, 1912.
28. Артиллерия / под общ. ред. маршала артиллерии М.Н. Чистякова. М.: Воен. изд-во, 1953. 480 с.
29. Вооружение самолета: сборник материалов по вооружению иностранных самолетов / сост. А.Ф. Боровиков, Г.И. Седленек (ред. П.А. Фомичев). М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1941. 368 с.
30. Михно Е.П. Восстановление разрушенных сооружений. М.: Воениздат, 1974. 272 с.

## References ►

1. SP 22.13330.2016 (aktualizirovannaya redaktsiya SNIP 2.02.01-83\*). Osnovaniya zdaniy i sooruzhenii [Earth foundations of buildings and structures]. 2016.
2. Zhidkov R.YU., Romanova E.R., Abakumova N.V., Rekun V.S., Lesnikov G.A. Primenenie dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya identifikatsii opasnykh geologicheskikh protsessov na territorii Novoi Moskvy [Application of Earth remote sensing data to identify hazardous geological processes in the territory of New Moscow] // Inzhenernaya geologiya. 2023. T. XVIII. № 4. S. 18–37. DOI: 10.25296/1993-5056-2023-18-4-18-37.
3. Anikeev A.V. O roli karstovogo protsessa v obrazovanii karstovo-suffozionnykh voronok [On the role of the karst process in the formation of karst-suffusion sinkholes] // Sergeevskie chteniya. Razvitie nauchnykh idei E.M. Sergeeva na sovremennom ehtape: yub. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhd. akad. E.M. Sergeeva. Vyp. 16. M.: RUDN, 2014. C. 224–229.
4. Anikeev A.V. Provaly i voronki osedaniya v karstovykh raionakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska: monografiya [Dolines and subsidence sinkholes in karst areas: formation mechanisms, forecast and risk assessment: monograph]. M.: RUDN, 2017. 328 s.
5. Kochev A.D. Zony dolomitizirovannykh izvestnyakov i lineamenty kak indikatory povyshennoi zakarstovannosti karbonatnykh porod [Zones of dolomitized limestones and lineaments as indicators of increased karstification of carbonate rocks] // Inzhenernaya geologiya. 2022. № 2. C. 28–41. DOI: 10.25296/1993-5056-2022-17-2-28-4.
6. Kochev A.D. Izuchenie mekhanizma obrazovaniya karstovo-suffozionnykh voronok v g. Moskve [Studying the mechanism of formation of karst-suffusion sinkholes in Moscow] // Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiiskoi Federatsii: mater. XVI Obshcheros. nauchno-prakt. konf. M.: OOO «Geomarketing», 2021. C. 105–120.
7. Kochev A.D., Chertkov L.G., Zoionts I.L. K voprosu inzhenerno-geologicheskogo raionirovaniya territorii severo-zapada g. Moskvy po stepeni opasnosti razvitiya karstovo-suffozionnykh protsessov [On the issue of engineering-geological zoning of the territory of the north-west of Moscow according to the degree of danger of development of karst-suffusion processes] // Inzhenerno-geologicheskie zadachi sovremennosti i metody ikh resheniya. M: OOO «Geomarketing», 2017. S. 24–40.
8. Instruktsiya po proektirovaniyu zdaniy i sooruzheniy v raionakh g. Moskvy s proyavleniem karstovo-suffozionnykh protsessov [Instructions for the design of buildings and structures in the districts of Moscow with manifestations of karst-suffusion processes]. M.: Kartolitografiya, 1984. 15 s.
9. Kutepov V.M., Anisimova N.G., Gribov E.M., Kozhevnikova I.A., Kozlyakova I.V. i dr. Karta opasnosti drevnykh karstovykh form i sovremennykh karstovo-suffozionnykh protsessov. Mashtab 1:10 000 (2-ya red.) [Hazard map of ancient karst forms and modern karst-suffusion processes. Scale 1:10,000 (2nd ed.)]. M.: GUP «MosgorgeotresT», IGEH RAN. 2012.
10. Romanova E.R., Abakumova N.V., Zhidkov R.YU. O vozmozhnosti primeneniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya identifikatsii poverkhnostnykh proyavleniy protsessov karsta i suffozii na territorii Novoi Moskvy [On the possibility of using remote sensing data to identify surface manifestations of karst and suffusion processes in the territory of New Moscow] // Sergeevskie chteniya. Regional'naya inzhenernaya geologiya i geoekologiya. Vyp. 25. Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii, 28–29 marta 2024 g. Moskva: Geoinfo, 2024. S. 446–450.
11. Shikhov A.N., Gerasimov A.P., Ponomarchuk A.I., Perminova E.S. Tematicheskoe deshifirovanie i interpretatsiya kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo prostranstvennogo razresheniya: uchebnoe posobie [Thematic interpretation and interpretation of space images of medium and high spatial resolution: textbook]. Perm': Izdatel'skii tsentr Permskogo gosudarstvennogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta, 2020. 191 s. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifirovanie-i-interpretatsiya-kosmicheskikh-snimkov.pdf>.
12. Arkheologicheskaya karta Rossii: Moskovskaya oblast'. Chast' 1 [Archaeological map of Russia: Moscow region. Part 1] / sost. G.G. Korol', Yu.A. Krasnov, T.D. Nikolaenko, B.E. Yanishevskii. Institut arkheologii RAN, 1994. 320 s.
13. Arkheologicheskaya karta Rossii: Moskovskaya oblast'. Chast' 2 [Archaeological map of Russia: Moscow region. Part 2] / sost. G.G. Korol', Yu.A. Krasnov, T.D. Nikolaenko, B.E. Yanishevskii. M.: Institut arkheologii RAN, 1995. 240 s.
14. Arkheologicheskaya karta Rossii [Archaeological map of Russia] // Internet-resurs home.archaeolog.ru. Data poslednego obrashcheniya: 10.12.2024. URL: <https://home.archaeolog.ru/oanmap/?g=t&ll=55.297444,36.438873&z=5&m=0>.
15. Zdes' zhili potomki vyatichei: v TINAO arkheologi nashli drevnie kurgany [The descendants of the Vyatichi lived here: archaeologists found ancient burial mounds in TiNAO] // mos.ru/news. 21.05.2020. URL: <https://www.mos.ru/news/item/74359073/?ysclid=m7m1kfqz309921256>
16. Romanova E.R., Zhidkov R.Yu. Avtomaticheskaya identifikatsiya bugrov pucheniya na osnove dannykh TSMR Arctic DEM [Automatic identification of frost mounds based on Arctic DEM Data] // Materialy 22-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosA», Moskva, IKI RAN, 11–15 noyabrya 2024 g.
17. 1860. Karta Shuberta – Podmoskov'e. 1:84K [1860. Shubert's map of the Moscow region. 1:84K] // retromap.ru. Starye karty Rossii i zarubezh'ya. Data poslednego obrashcheniya: 10.12.2024. URL: [https://retromap.ru/0818601\\_55.751401,37.62141](https://retromap.ru/0818601_55.751401,37.62141).
18. Zvyagintsev L.I., Viktorov A.M. Belyi kamen' Podmoskov'ya [White stone of the Moscow region]. M.: Nedra, 1989. 118 s.
19. Parfenov A.A. Erinskii speleostologicheskii uchastok [Yerinsk speleological site] // Speleologiya i speleostologiya: Sbornik materialov 2-i Mezhdunarodnoi nauchnoi zaochnoi konferentsii. Naberezhnye Chelny: NISPTR, 2011. S. 132–138.
20. Dolotov Yu.A., Parfenov A.A. Rybinskii speleostologicheskii blok [Rybinsk speleological block] // Peshchery: sb. nauch. tr. Perm. gos. nats. issl. un-ta. Vyp. 35. Perm', 2012. S. 53–60.

21. Sokhin M.YU., Dolotov YU.A. Speleostologicheskaya izuchennost' basseina reki Pakhry (Moskovskaya oblast'). Chast' 1: Verkhnepakhrinskii i Podol'skii speleostologicheskie raiony [Speleological study of the Pakhra River basin (Moscow region). Part 1: Verkhnepakhrinsk and Podolsk speleological areas] // Speleologiya i speleostologiya: sbornik materialov konferentsii. Naberezhnye Chelny: NGPU, 2016. № 7. S. 253–274.
22. Yanovskaya E.G. Kamenolomni v d. Alkhimovo [Quarries in the village of Alkhimovo] // Speleologiya i speleostologiya: sbornik materialov 3-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. Naberezhnye Chelny: NISPTR, 2012. S. 157–162.
23. Poselenie Rogovskoe v gorode Moskve. Istoricheskaya spravka [Rogovskoye settlement in the city of Moscow. Historical background] // Rogovskoe.ru. Data poslednego obrashcheniya: 10.12.2024. URL: [https://rogovskoe.ru/o\\_poselenii/istoricheskaya\\_spravka/](https://rogovskoe.ru/o_poselenii/istoricheskaya_spravka/).
24. Kolyvanov B. Podol'skii rubezh (glazami ochevidtsa i uchastnika sobytii) [Podolsk frontier (through the eyes of an eyewitness and participant of the events)] // Podolsk.ru. 11.03.2014. URL: <https://www.podolsk.ru/about/n16080.html>.
25. Ehkho voiny: kak prokhodili srazheniya na podstupakh k Moskve. Poselenie Rogovskoe [Echo of the war: how the battles on the approaches to Moscow took place. Rogovskoye settlement] // Moskva24. 17.04.2015. URL: <https://www.m24.ru/articles/Den-Pobedy/17042015/71276>.
26. Abdurakhmanova P. Poselenie Rogovskoe: kak zashchishchali Moskvu ot protivnikov na granitse nyneshnei Novoi Moskvy [Rogovskoye settlement: how Moscow was defended against enemies on the border of the current New Moscow] // Novye okruga. 07.05.2019. URL: <https://nov-okruga.ru/poselenie-rogovskoe-kak-zashchishchali-moskvu-ot-protivnikov-na-granitse-nyineshney-novoy-moskvyi/>.
27. Maksheev F.A. Za veru, tsarya i otechestvo: otechestvennaya voina 1812 g. v kartinakh [al'bom]. 1812–1912 [For Faith, Tsar, and Fatherland: The Patriotic War of 1812 in Pictures [album]. 1812–1912.]. Parizh: I.S. Lapin, 1912.
28. Artilleriya [Artillery] / pod obshch. red. marshala artillerii M.N. Chistyakova. M.: Voen. izd-vo, 1953. 480 s.
29. Vooruzhenie samoleta: sbornik materialov po vooruzheniyu inostrannykh samoletov [Aircraft armament: a collection of materials on the armament of foreign aircrafts] / sost. A.F. Borovikov, G.I. Sedlenek (red. P.A. Fomichev). M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo oboronnoi promyshlennosti, 1941. 368 s.
30. Mikhno E.P. Vosstanovlenie razrushennykh sooruzhenii [Restoration of destroyed structures]. M.: Voenizdat, 1974. 272 s.



## Telegram-канал журнала

Независимый электронный журнал

# ГеоИнфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>





## ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАССИВОВ ГРАНИТОИДОВ СЕВЕРО- ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Принята к публикации 30.05.2025

Опубликована: 16.06.2025

### БАРЫКИНА О.С.

Доцент кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к. г.-м. н., г. Москва, Россия  
barykinaos@my.msu.ru

### ЗЕРКАЛЬ О.В.

Старший научный сотрудник лаборатории инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., г. Москва, Россия  
igzov@mail.ru

### САМАРИН Е.Н.

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

### АННОТАЦИЯ

Северо-Восточное Забайкалье – обширный среднегорный регион, расположенный в южной части Сибири севернее и восточнее озера Байкал. Он находится на стыке двух крупных литосферных структур (Байкальской рифтовой системы и Сибирского кратона) и характеризуется высокой тектонической активностью и сейсмичностью (с магнитудами до 8,0), контрастным рельефом. Климат региона резко континентальный – с суровой продолжительной зимой и умеренно теплым летом. Расположение горных хребтов способствует проникновению масс холодного арктического воздуха. В геологическом отношении рассматриваемая территория располагается в пределах Ангаро-Витимского гранитоидного ареал-плутона.

Суровость климата, высота и расчлененность рельефа, пестрота состава горных пород и их трещиноватость, вертикальная и горизонтальная подвижность блоков земной коры в регионе обусловили интенсивное развитие процессов древнего и современного выветривания – как площадного, так и линейного (по разломам и зонам трещиноватости). Интенсивное выветривание как характерная особенность региона приводит к тому, что массивы гранитоидов распадаются сразу на дресву и песок, не давая промежуточных продуктов разрушения – глыб и щебня.

В представленной статье приведены результаты изучения массивов гранитоидов в Северо-Восточном Забайкалье.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

гранитоиды; Северо-Восточное Забайкалье; выветривание; разрывные нарушения.

### ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Барыкина О.С., Зеркаль О.В., Самарин Е.Н. Инженерно-геологические особенности массивов гранитоидов Северо-Восточного Забайкалья // ГеоИнфо. 2025. Т. 7. № 1. С. 48–53. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-48-53.

# ENGINEERING-GEOLOGICAL FEATURES OF GRANITOID MASSES IN NORTHEASTERN TRANSBAIKALIA

Accepted for publication 30.05.2025

Published 16.06.2025

## BARYKINA O.S.

PhD, associate professor, Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
barykinaos@my.msu.ru

## ZERKAL' O.V.

DSc, senior researcher, Laboratory of Engineering Geodynamics and Justification of Engineering Protection of Territories, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
igzov@mail.ru

## SAMARIN E.N.

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

## ABSTRACT

North-Eastern Transbaikalia is a vast mid-mountain region situated in the southern part of Siberia to the north and east of Lake Baikal. This region is located at the junction of two large lithospheric structures (the Baikal rift system and the Siberian craton) and is characterized by high tectonic activity and seismicity (with magnitudes up to 8.0) and by contrasting relief. The climate of the region is sharply continental with severe long winters and moderately warm summers. The location of mountain ranges contributes to the penetration of cold arctic air masses. Regarding geology, the territory under consideration is located within the Angara-Vitim granitoid areal-pluton.

The severity climate, heigh and dissected relief, variegated composition and fracturing of soils and rocks, vertical and horizontal mobility of blocks of the Earth crust in the region have caused intensive development of processes of old and modern weathering (the last has been both areal and linear along faults and fracture zones). Intensive weathering as a characteristic feature of the region leads to the fact that the granitoids masses decompose into gruss and sand at once, without giving intermediate products of destruction such as blocks and crushed stone.

This article presents the results of studying granitoids masses in the North-Eastern Transbaikalia.

## KEYWORDS:

granitoids; North-Eastern Transbaikalia; weathering; faults.

## FOR CITATION:

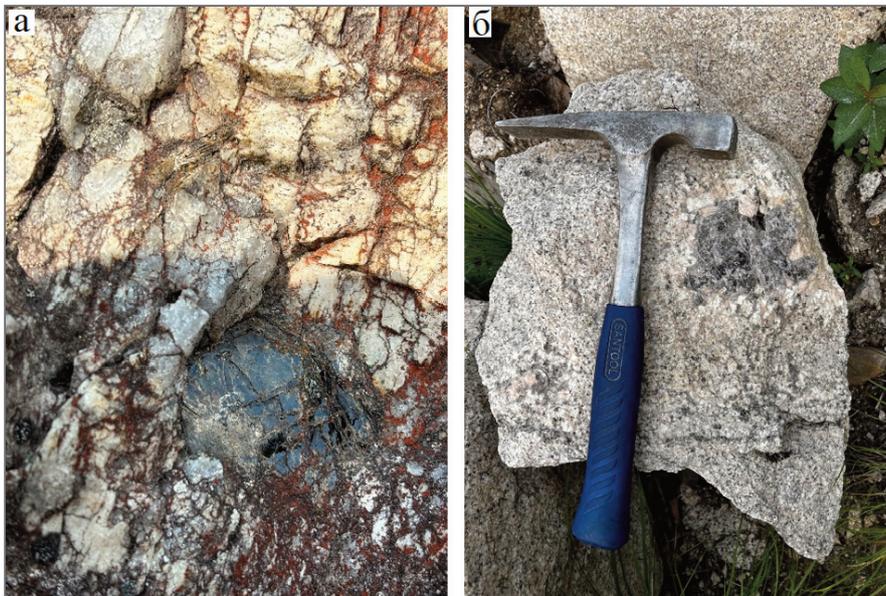
Barykina O.S., Zerkal' O.V., Samarin E.N. Inzhenerno-geologicheskie osobennosti massivov granitoidov Severo-Vostochnogo Zabaikal'ya [Engineering-geological features of granitoid masses in Northeastern Transbaikalia] // *GeoInfo*. 2025. T. 7. № 1. S. 48–53. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-48-53 (in Rus.).

## ВВЕДЕНИЕ ►

Территория Северо-Восточного Забайкалья приурочена к Байкальской рифтовой зоне и представляет собой регион с контрастным среднегорным рельефом. Орографически регион характеризуется чередованием альпийских горных хребтов и межгорных впадин (рис. 1), соединяющихся узкими сквозными долинами. Для Северо-Восточного Забайкалья характерна высокая тектоническая активность с широким развитием разломов и высокая сейсмичность (9 баллов) [1]. Климат региона резко континентальный – с суровой продолжительной зимой и умеренно теплым летом [2]. Расположение горных хребтов способствует проникновению масс холодного арктического воздуха. Все эти факторы формируют благоприятные условия для разви-



Рис. 1. Чередование альпийских горных хребтов и межгорных впадин



**Рис. 2.** Граниты: а – светло-серые биотитовые; б – серые крупнокристаллические порфириовидные

тия процесса выветривания – как площадного, так и линейного (по разломам и зонам трещиноватости).

В геологическом отношении рассматриваемая территория располагается в пределах Ангаро-Витимского гранитоидного ареал-плутона [3–5], сложенного породами каменноугольного возраста – биотитовыми гранитами светло-серыми, розовыми, от мелко- до крупнокристаллических, часто порфириовидными (рис. 2).

В порфириовидных разновидностях вкрапленники представлены микроклином, редко – плагиоклазом или кварцем. Размер вкрапленников – от 1 до 10 см. Иногда граниты характеризуются отчетливой гнейсовидной полосчатой текстурой, что определяет анизотропию их физико-механических свойств.

Гнейсовидная текстура с линейным расположением минералов, прежде все-

го слюды, снижает устойчивость пород в массиве, особенно в зоне выветривания. Это создает условия для развития пологопадающих пластовых трещин, что приводит к формированию в породе плитчатой отдельности [6]. Вне зон трещиноватости и выветривания массивы гранитоидов характеризуются высокой прочностью.

По минеральному составу граниты очень разнообразны (рис. 3). Как правило, максимальное содержание кварца составляет 26–35%, плагиоклаза – 25–34%, микроклина – 18–23%, биотита – 4–26%.

Высокая сейсмичность и сложная история геологического развития повлияли на формирование сети разломов. Рассматриваемый район представляет собой сильно деформированный блок земной коры с разнообразными по кинематическому типу тектоническими нарушениями [3].

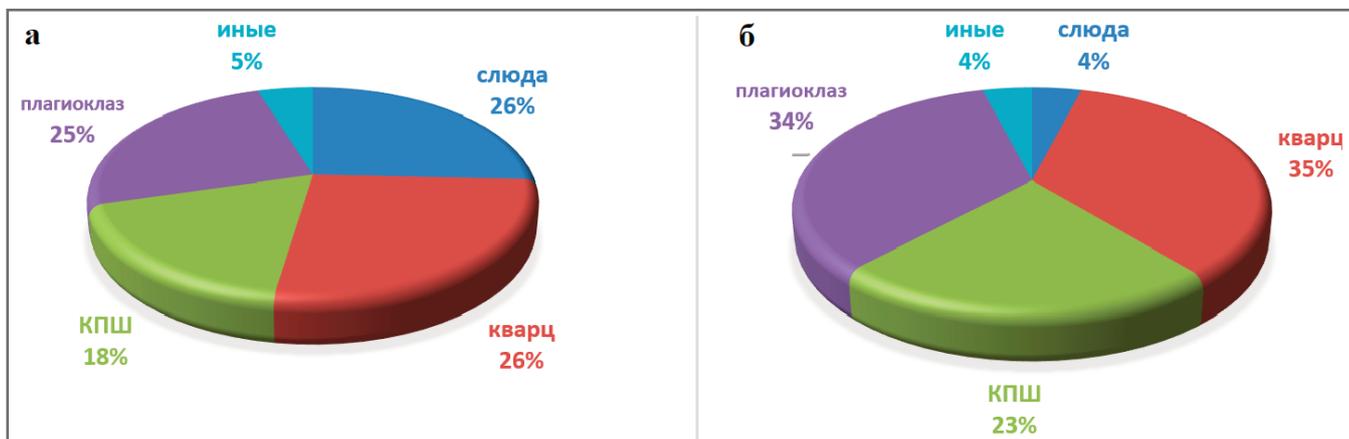
Формирование разломно-блоковой структуры этого участка происходило под воздействием сдвиговых и растягивающих региональных напряжений. Наиболее активные тектонические движения приурочены к зоне сочленения Перевального и Ангараканского разломов [7, 8]. Основной дизъюнктивной структурой района является Перевальный разлом, который представляет собой левый взбросо-сдвиг с падением сместителя в юго-западном направлении с углом падения 80° (рис. 4). К этому разлому приурочена система трещин наибольшей интенсивности, которая имеет элементы залегания, соответствующие элементам залегания сместителя Перевального разлома (рис. 4). Вторая наиболее значимая система крутопадающих на северо-запад трещин с углом падения 72°, по-видимому, соответствует элементам залегания сместителя Ангараканского разлома.

Помимо двух отмеченных основных систем трещин было выделено еще несколько менее проявленных, тяготеющих, по-видимому, к оперяющим разломам более низкого порядка.

Часто зоны тектонических нарушений представлены не отдельными трещинами, а достаточно широкими зонами дробления мощностью до нескольких метров, в пределах которых массивы гранитов разрушены до дресвы и разнозернистого песка. Для данной территории характерно три типа тектонических зон, сложенных [6]:

1) сильно выветрелыми до состояния песка, дресвы, щебня и реже до глины, водопроницаемыми;

2) умеренно выветрелыми и катаклизированными до дресвяно-щебнисто-глыбового состояния, полупроницаемыми;



**Рис. 3.** Минеральный состав двух разновидностей (а, б) гранитов (по результатам рентгенодифракционного количественного анализа, выполненного В.Л. Косоруковым) (КПШ – калиевый полевой шпат)

3) слабо выветрелыми и сильнотрещиноватыми с наличием полостей, полупроницаемыми.

Суровость климата, высота и расчлененность рельефа, пестрота состава горных пород и их трещиноватость, вертикальная и горизонтальная подвижность блоков земной коры обусловили интенсивное развитие процессов древнего и современного выветривания на рассматриваемой территории. Интенсивное выветривание как характерная особенность региона приводит к тому, что массивы гранитоидов распадаются сразу на дресву и песок, не давая промежуточных продуктов разрушения – глыб и щебня. Необходимо отметить, что изменение розово-серых гранитов за счет высокого содержания кварца идет больше по линии дезинтеграции, чем по линии изменения химического состава.

В зоне выветривания трещины обычно расширены и нередко достигают ширины 0,3–0,5 м и даже 1 м и глубины до нескольких метров. Часто трещины открытые. Скорости выветривания в большей степени зависят от структуры и минерального состава пород. Наиболее крепкими являются мелкокристаллические и светлоокрашенные разновидности гранитов, наиболее слабыми – крупнокристаллические, порфиридные. Генетические особенности массивов гранитоидов определяют их физико-механические свойства и поведение в зонах разломов.

Выветривание гранитов происходит сравнительно быстро. При их разрушении образуются россыпи крупных обломков более или менее сглаженной формы. Мощность элювия на относи-

тельно горизонтальных поверхностях обычно составляет 1,5–2 м, но местами достигает 4–5 м и более.

В ряде случаев зоны тектонических нарушений представлены не отдельными трещинами, а достаточно широкими зонами дробления (до нескольких метров), в пределах которых массивы гранитов являются разрушенными до дресвы и разнозернистого песка (рис. 5).

Интенсивное выветривание привело к формированию разнообразной по составу и строению линейной коры выветривания. При исследовании было выделено пять ее типов [6]:

1) граниты со слабой тектонической трещиноватостью (см. рис. 5, а), но с плотной сетью трещин отдельностей криогенного происхождения, на вид монолитные, устойчивые в массиве, в сухом состоянии легко разрушающиеся под динамической нагрузкой, превращаясь в дресву, щебень и песок;

2) граниты трещиноватые, слабо разрушенные до состояния щебня, в меньшей степени – дресвы, песка и глины;

3) граниты, разрушенные до состояния дресвы (см. рис. 5, б), умеренно дезинтегрированные (местами до состояния песка и глины), каолинизированные, слабо ожелезненные;

4) граниты сильно выветрелые (см. рис. 5, в), осложненные милонитами и катаклазитами, с гнездами каолина, ожелезнения, с пестрой текстурой;

5) граниты, полностью разрушенные до состояния каолиновой глины с зернами кварца, со слоистой текстурой, с коричневато-красным фоном со светлорозовыми включениями.

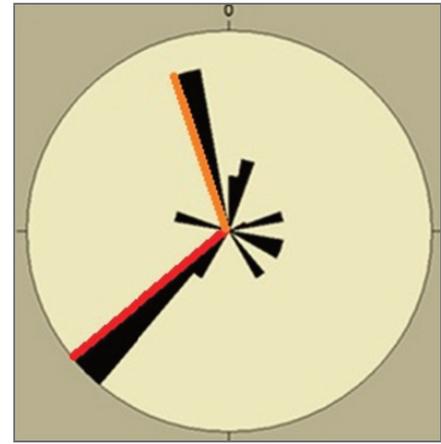


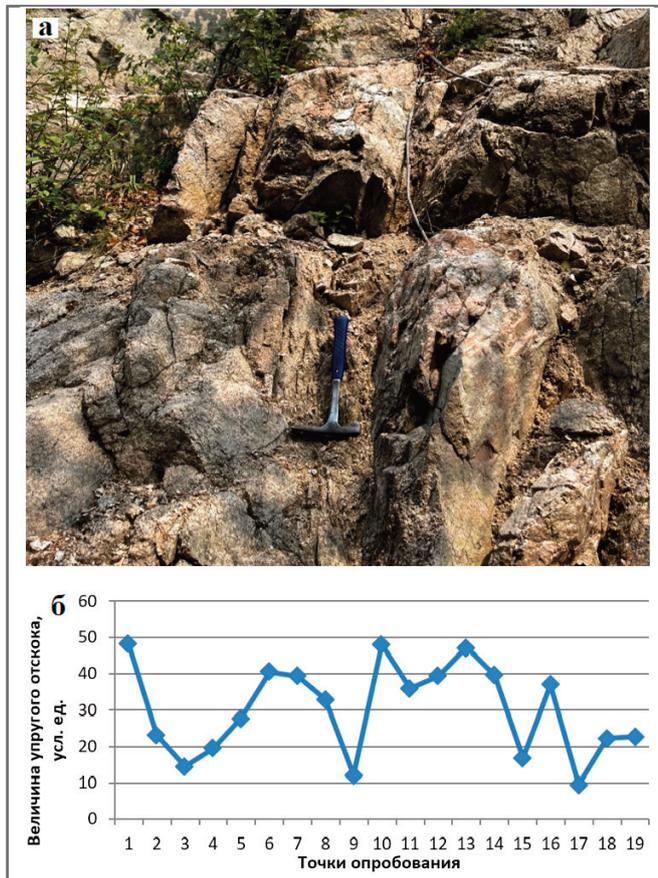
Рис. 4. Диаграмма трещиноватости по азимутам падения основных систем трещин и соответствующих им разломов Перевальный (красный цвет) и Ангараканский (оранжевый цвет)

Вместе с тем необходимо отметить, что выделенные зоны характеризуют не столько зону выветривания, для которой не типичны милониты и катаклазиты, сколько зону тектонического меланжа, для которой наиболее характерны высокотемпературные новообразования.

Для приближенной количественной характеристики изменения прочности пород в выветрелых зонах разрывных нарушений (рис. 6, а) был использован метод неразрушающего контроля, то есть испытания с помощью склерометра (молотка Шмидта), который позволяет на основании полученных показаний отскока по цифровой шкале склерометра и графиков корреляции определить прочность пород в массиве. Опробование проводилось перпендикулярно простиранию зон раз-



Рис. 5. Типы линейной коры выветривания: а – граниты со слабой тектонической трещиноватостью; б – граниты, разрушенные до состояния дресвы; в – сильно выветрелые граниты, осложненные милонитами и катаклазитами

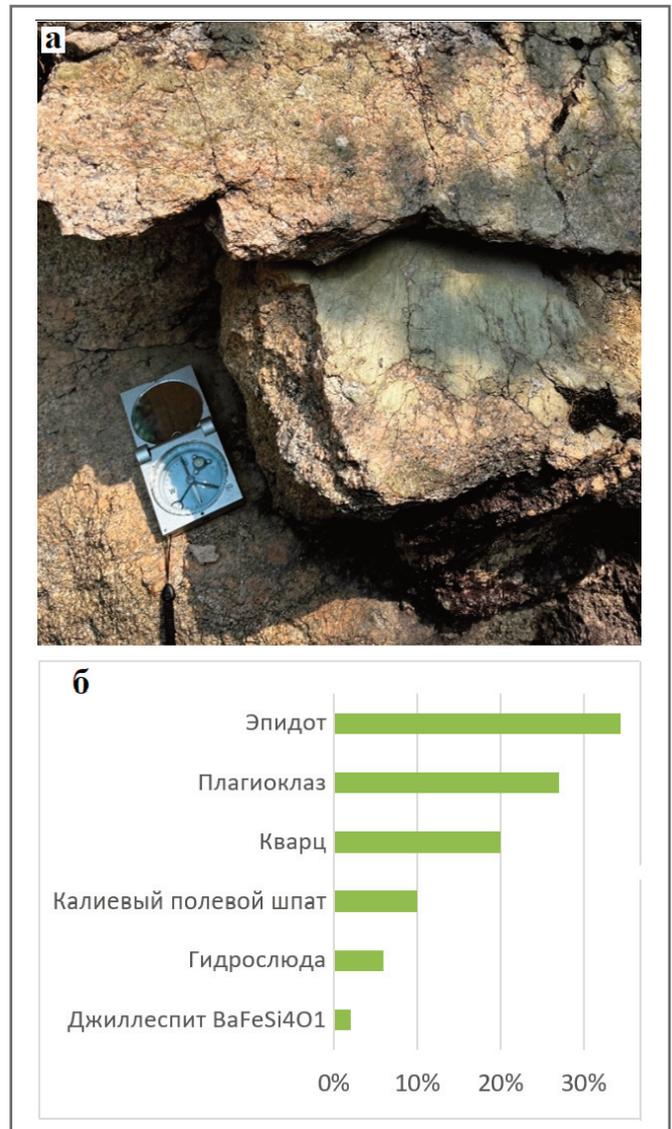


**Рис. 6.** Приближенная количественная характеристика выветрелых разрывных зон: а – фото участка опробования; б – величина упругого отскока в точках опробования

рывных нарушений. В линейных зонах выветривания было выявлено значительное падение значений упругого отскока, что указывает на снижение показателей прочности (рис. 6, б).

Массивы гранитоидов многократно подвергались тектоническим воздействиям, что отразилось на развитии разнообразных систем трещин. Выделяется до десяти систем трещин [10], 70% которых – крутопадающие, около 30% – пологопадающие. Наиболее развиты трещины С-СВ и З-СЗ простирания. Они имеют значительную длину как по простиранию, так и по падению; угол падения их близок к вертикальному (79–80°). Вдоль бортов долин по ним часто идет процесс отседания блоков пород высотой до 15 м. Трещины отрыва имеют ломаную линию разрыва пород и меняют пространственную ориентировку как по падению, так и по простиранию [9]. Стенки их обычно шероховатые. Ширина трещин колеблется от 1 мм до 0,2 м, 40–50% трещин заполнены дресвяным материалом или глиной трения. Большое распространение имеют крутопадающие трещины скола, а также пологопадающие трещины надвигового (взбросо-надвигового) типа и трещины межслоевого скольжения, сопровождаемые маломощными зонами брекчий. Плоскости трещин скола обычно ровные, протяженные, часто несущие следы притертости и зеркала скольжения (рис. 7, а).

Крутопадающие трещины часто имеют зеленовато-серый заполнитель, плотный, с явными зеркалами скольжения, не царапающийся ножом (с твердостью 6–7). Рентгенодифракционный количественный анализ (выполненный В.Л. Косоруковым) показал следующий минеральный состав: эпидот – 35%, плагиоклаз – 27%, кварц – 20%, калиевый полевой шпат – 10%, гидрослюда – 6% и др. (рис. 7, б). Вероятнее всего, за



**Рис. 7.** Плоскость крутопадающих трещин: а – поверхность стенок притертая, с заполнителем и зеркалами скольжения; б – минеральный состав зеленовато-серого заполнителя (выполнено В.Л. Косоруковым)

счет движения флюида по трещинам произошел процесс замещения минералами группы эпидота кальцийсодержащих породообразующих минералов — в нашем случае плагиоклаза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

В геологическом отношении рассматриваемая территория располагается в пределах Ангаро-Витимского ареал-плутона, слагаемого массивами гранитоидов. Этот регион характеризуется высокой сейсмичностью и активными тектоническими движениями, приведшими к формированию крупных разрывных нарушений с приуроченными к ним зонами повышенной трещиноватости. Помимо трещин отдельности наибольшим распространением пользуются крутопадающие трещины северо-восточного и северо-западного простирания, соответствующие направлению основных дизъюнктивов. Именно по таким ослабленным зонам происходит активное выветривание. Помимо линейного выветривания характерной особенностью региона является интенсивное площадное выветривание, при котором массивы гранитов распадаются сразу на дресву и песок, не давая промежуточных продуктов разрушения – глыб и щебня. В розово-серых гранитах за счет более

высокого содержания кварца трансформация пород идет больше по линии дезинтеграции, чем по линии изменения химического состава. Процессы изменений пород в приповерхностной зоне

приводят к ухудшению ряда свойств (разуплотнению, снижению прочности, повышению деформируемости).

Изучение и прогноз развития процессов выветривания необходимы

при проектировании и эксплуатации сооружений, оценке устойчивости склонов, прогнозе развития геологических и инженерно-геологических процессов. 

## Список литературы ►

1. Солоненко В.П. Сейсмогеологические условия зоны строительства БАМ. Иркутск, 1981.
2. Природные условия зоны освоения БАМ. М.: Изд-во МГУ, 1981.
3. Геология зоны БАМ. Том 1. Геологическое строение. Л.: Недра, 1988.
4. Геология зоны БАМ. Том 2. Гидрогеология и инженерная геология. Л.: Недра, 1988.
5. Митрофанова Н.Н., Болдырев В.И., Коробейников Н.К., Митрофанов Г.Л. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-49-Киренск. Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2012.
6. Барыкина О.С., Зеркаль О.В., Самарин Е.Н., Пензев А.П., Новиков П.Н. Массивы гранитоидов Северо-Восточного Забайкалья и процессы, в них протекающие. //Сергеевские чтения. Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества. Выпуск 26. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (27-28 марта 2025 г.). Москва: Издательство «Геоинфо», 2025. Выпуск 26. С.133-136.
7. Геология и сейсмичность зоны БАМ (от Байкала до Тынды). Глубинное строение. Новосибирск: Наука (Сиб. отделение), 1984.
8. Лунина О.В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 407–434.
9. Инженерная геология СССР (в 8 томах). Том 3. Восточная Сибирь. М.: Изд-во Московского университета, 1977. 657 с.

## References ►

1. Solonenko V.P. Seismogeologicheskies usloviya zony stroitel'stva BAM [Seismogeological conditions of the BAM construction zone]. Irkutsk, 1981 (in Rus.).
2. Prirodnye usloviya zony osvoeniya BAM [Natural conditions of the BAM development zone]. M.: Izd-vo MGU, 1981 (in Rus.).
3. Geologiya zony BAM. Tom 1. Geologicheskoe stroenie [Geology of the BAM zone. Volume 1. Geological structure]. L.: Nedra, 1988 (in Rus.).
4. Geologiya zony BAM. Tom 2. Gidrogeologiya i inzhenernaya geologiya [Geology of the BAM zone. Volume 2. Hydrogeology and engineering geology]. L.: Nedra, 1988 (in Rus.).
5. Mitrofanova N.N., Boldyrev V.I., Korobeinikov N.K., Mitrofanov G.L. i dr. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Aldano-Zabaikal'skaya. List O-49-Kirensk. Ob'yasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Aldan-Transbaikal Series. Sheet O-49-Kirensk. Explanatory note. SPb.: VSEGEI Cartography Factory, 2012 (in Rus.).
6. Барыкина О.С., Зеркаль О.В., Самарин Е.Н., Пензев А.П., Новиков П.Н. Массивы гранитоидов Северо-Восточного Забайкалья и процессы, в них протекающие. //Сергеевские чтения. Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества. Выпуск 26. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (27-28 марта 2025 г.). Москва: Издательство «Геоинфо», 2025. Выпуск 26. С.133-136..
7. Geologiya i seismichnost' zony BAM (ot Baikala do Tyndy). Glubinnoe stroenie [Geology and seismicity of the BAM zone (from Baikal to Tynda). Deep structure]. Novosibirsk: Nauka (Sib. otdelenie), 1984 (in Rus.).
8. Lunina O.V. Tsifrovaya karta razlomov dlya pliotseN-chetvertichnogo ehtapa razvitiya zemnoi kory yuga Vostochnoi Sibiri i sopredel'noi territorii Severnoi Mongolii [Digital map of faults for the Pliocene-Quaternary stage of the Earth crust development in the south of Eastern Siberia and the adjacent territory of Northern Mongolia] // Geodinamika i tektonofizika. 2016. T. 7. № 3. S. 407–434 (in Rus.).
9. Inzhenernaya geologiya SSSR (v 8 tomakh). Tom 3. Vostochnaya Sibir' [Engineering Geology of the USSR (in 8 volumes). Vol. 3. Eastern Siberia]. M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1977. 657 s. (in Rus.).



## МОДЕЛИРОВАНИЕ И КАРТИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА МНОГОЛЕТНЮЮ МЕРЗЛОТУ В РЕГИОНЕ СО СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Принята к публикации 30.05.2025

Опубликована: 16.06.2025

### ЧЖАН Ю.

Канадский центр дистанционного зондирования  
Министерства природных ресурсов Канады, г. Оттава, пров.  
Онтарио, Канада  
yu.zhang@nrcan.gc.ca

### ВАН С.

Колледж ресурсов и экологии Хэбэйского педагогического  
университета, г. Шицзячжуан, пров. Хэбэй, Китай

### ФРЕЙЗЕР Р.

Канадский центр дистанционного зондирования  
Министерства природных ресурсов Канады, г. Оттава, пров.  
Онтарио, Канада

### ОЛТХОФ И.

Канадский центр дистанционного зондирования  
Министерства природных ресурсов Канады, г. Оттава, пров.  
Онтарио, Канада

### ЧЭНЬ В.

Канадский центр дистанционного зондирования  
Министерства природных ресурсов Канады, г. Оттава, пров.  
Онтарио, Канада

### МАКЛЕННАН Д.

Агентство парков Канады, р-н Халл, г. Гатино, пров. Квебек,  
Канада

### ПОНОМАРЕНКО С.

Агентство парков Канады, р-н Халл, г. Гатино, пров. Квебек,  
Канада

### У В.

Северный сервисный центр для Северо-Западных  
территорий Канады Агентства парков Канады, г. Виннипег,  
пров. Манитоба, Канада

### АННОТАЦИЯ

Представляем немного сокращенный адаптированный перевод объемной статьи «Моделирование и картирование влияния изменений климата на многолетнюю мерзлоту в регионе со сложным рельефом с высоким пространственным разрешением». Эта статья была написана группой авторов из Канады и Китая (Zhang et al., 2013). Она была опубликована в 2013 году в журнале The Cryosphere («Криосфера») и находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и доплачивать ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Zhang et al., 2013) приводится в конце.

Пространственное моделирование влияния изменений климата на многолетнюю мерзлоту до подготовки и публикации переведенной статьи в 2012–2013 гг. в основном проводилось при разрешении по широте и долготы не лучше чем в полградуса. При таком грубом разрешении не может быть точно учтено влияние топографии на инсоляцию, поэтому оно не подходит для планирования освоения земель и экологических оценок. В данной статье сопоставлены воздействия изменений климата на многолетнюю мерзлоту с 1968 по 2100 год при разрешении 10 м с использованием модели, основанной на процессах, для национального парка «Иввавик» – арктического региона со сложным рельефом на севере Юкона (территории на северо-западе Канады). Характеристики грунта и его дренируемость определялись на основе типов экосистем, которые были закартированы с помощью изображений, полученных со спутников SPOT. Индексы листовой поверхности (LAI) картировались на основе снимков со спутников Landsat, и карт экосистем.

Пространственное распределение климата оценивалось на основе высотных отметок и наблюдений на метеорологических станциях, а влияние топографии на инсоляцию рассчитывалось на основе оценок крутизны склонов, их экспозиции и зон видимости. Чтобы сократить время вычислений, распределение климатических параметров и влияние топографии на инсоляцию группировались по отдельным типам/классам/кластерам.

Смоделированная толщина слоя сезонного протаивания/промерзания (деятельного, активного) и распределение многолетней мерзлоты были сопоставимы с результатами полевых наблюдений и других исследований. Полученная карта отобразила большие вариации в мощности деятельного слоя, причем наиболее важной контролирующей переменной были типы экосистем, за которыми следовали локальные климатические условия, включая влияние топографии на инсоляцию.

Результаты показали увеличение толщины активного слоя и прогрессирующую деградацию многолетней мерзлоты, хотя последняя сохранится на большей части территории парка в течение всего XXI века. Выполненные исследования также показали, что основными источниками неопределенности при картировании распределения многолетней мерзлоты с высоким разрешением являются грунтовые условия и сценарии изменений климата.

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

многолетняя мерзлота; климат; изменения климата; топография; грунтовые условия; деятельный слой; моделирование; картирование.

#### ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Чжан Ю., Ван С., Фрейзер Р., Олтоф И., Чэнь В., Макленнан Д., Пономаренко С., У В. Моделирование и картирование влияния изменений климата на многолетнюю мерзлоту в регионе со сложным рельефом с высоким пространственным разрешением (пер. с англ.) // Геоинфо. 2025. Т. 7. № 1. С. 54–75.  
DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-54-75.

## MODELLING AND MAPPING CLIMATE CHANGE IMPACTS ON PERMAFROST AT HIGH SPATIAL RESOLUTION FOR A REGION WITH COMPLEX TERRAIN

*Accepted for publication 30.05.2025*

*Published 16.06.2025*

#### ZHANG Yu.

Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, Canada  
yu.zhang@nrcan.gc.ca

#### WANG X.

College of Resources and Environmental Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei, China

#### FRASER R.

Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, Canada

#### OLTHOF I.

Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, Canada

#### CHEN W.

Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, Canada

#### MCLENNAN D.

Parks Canada Agency, Hull, Gatineau, Quebec, Canada

#### PONOMARENKO S.

Parks Canada Agency, Hull, Gatineau, Quebec, Canada

#### WU W.

Western and Northern Service Centre, Parks Canada Agency, Winnipeg, Manitoba, Canada

#### ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the long paper “Modelling and mapping climate change impacts on permafrost at high spatial resolution for a region with complex terrain” written by a group of Canadian and Chinese researchers (Zhang et al., 2013). It was published in 2013 in the “The Cryosphere” journal. It is an open access paper under the CC BY 3.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Zhang et al., 2013), which was used for the presented translation, is given in the end.

Most spatial modelling of climate change impacts on permafrost has been conducted at half-degree latitude/longitude or coarser spatial resolution. At such coarse resolution, topographic effects on insolation cannot be considered accurately and the results are not suitable for landuse planning and ecological assessment. Here the authors mapped climate change impacts on permafrost from 1968 to 2100 at 10 m resolution using a process-based model for Ivvavik National Park (an Arctic region with complex terrain in northern Yukon, Canada). Soil and



drainage conditions were defined based on ecosystem types, which were mapped using SPOT imagery. Leaf area indices were mapped using Landsat imagery and the ecosystem map. Climate distribution was estimated based on elevation and station observations, and the effects of topography on insolation were calculated based on slope, aspect and viewshed. To reduce computation time, the authors clustered climate distribution and topographic effects on insolation into discrete types.

The modelled active-layer thickness and permafrost distribution were comparable with field observations and other studies. The map portrayed large variations in active-layer thickness, with ecosystem types being the most important controlling variable, followed by climate, including topographic effects on insolation.

The results show deepening in active-layer thickness and progressive degradation of permafrost, although permafrost will persist in most of the park during the 21st century. This study also shows that ground conditions and climate scenarios are the major sources of uncertainty for high-resolution permafrost mapping.

**KEYWORDS:**

permafrost; climate; climate change; topography; ground conditions; soil conditions; active layer; modeling; mapping.

**FOR CITATION:**

Zhang Yu., Wang X., Fraser R., Olthof I., Chen W., McLennan D., Ponomarenko S., Wu W. Modelirovanie i kartirovanie vliyaniya izmenenii klimata na mnogoletnyuyu merzlotu v regione so slozhnym rel'efom s vysokim prostranstvennym razresheniem [Modelling and mapping climate change impacts on permafrost at high spatial resolution for a region with complex terrain (in Rus.)] // *GeoInfo*. 2025. T. 7. № 1. S. 54–75. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-54-75.

**ВВЕДЕНИЕ**

Потепление климата в высоких широтах в течение XX века было примерно в два раза выше, чем в среднем по миру [1]. Наблюдения показали увеличение температуры приповерхностного слоя грунта и толщины слоя сезонного протаивания/промерзания (деятельного, активного, сезонно-талого слоя), а в некоторых местах и исчезновение многолетней мерзлоты (ММ) (например, [2, 3]). Большинство климатических моделей прогнозирует, что потепление климата в высоких северных широтах будет продолжаться со скоростью, превышающей среднюю мировую, в течение XXI века [1], что вызовет еще большую деградацию ММ. Таяние ММ влияет на инфраструктуру, экосистемы, места обитания диких животных и имеет сильные обратные связи с климатической системой [1].

Эффективным подходом к пониманию распределения многолетней мерзлоты и его изменений с изменениями климата является пространственное моделирование. Пространственные модели ММ можно в целом разделить на равновесные и переходные [4, 5]. Из-за медленного реагирования термических режимов грунта на изменения климата состояние многолетней мерзлоты находится и будет продолжать находиться в XXI веке в неравновесии с климатом [6, 7]. Поэтому необходимо количественно оценивать изменения ММ на основе переходных моделей. Большинство исследований по переходному моделированию и картированию многолетней мерзлоты проводилось с использованием пространственного

разрешения в полградуса по широте и долготе или хуже (например, [7–10]). Исследования с грубым разрешением не могут точно учитывать влияние топографии на инсоляцию, поскольку топографические условия обычно меняются на более коротких расстояниях. Кроме того, результаты таких исследований трудно проверить путем сравнения с данными полевых наблюдений и они не подходят для планирования освоения земель и экологических оценок.

Моделирование и картирование последствий изменений климата для многолетней мерзлоты с высоким пространственным разрешением требуют подробных входных данных, эффективных схем вычислений и надежных моделей. Недавно в нескольких работах появились модели ММ с более высоким пространственным разрешением.

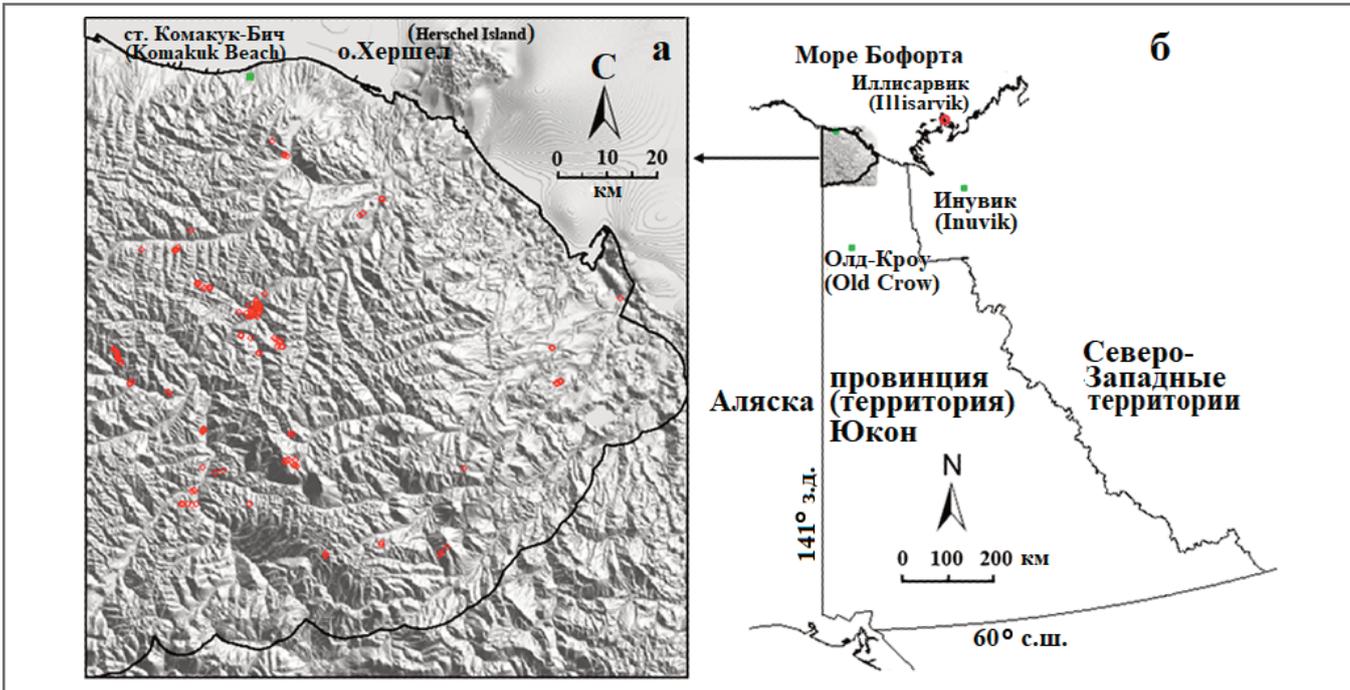
Так, авторы статьи [11] составили карту термических условий грунтов и их изменений с изменениями климата на Аляске с разрешением 2 км, используя неявную конечноразностную численную модель. Влияние снежного покрова учитывалось в явной форме, а влияние топографии на инсоляцию не учитывалось. Авторы доклада [12] составили карту многолетней мерзлоты и ее изменений с климатом в бассейне реки Маккензи с разрешением 30 м на основе модели процессов теплопроводности. В этой модели использовались сезонные *n*-факторы для оценки приповерхностной температуры грунта по температуре воздуха.

Авторы статей [13, 14] закартировали ММ северо-западной части Низмен-

ности Гудзонова залива (Hudson Bay Lowlands) с разрешением 30 м, для чего использовалась более подробная модель, в которой были интегрированы эффекты других климатических переменных (например, количества атмосферных осадков, солнечной радиации и давления пара) и изменений в снежном покрове и влажности грунтов. Данный регион в основном представляет собой равнину, сложенную с поверхности торфом, где толщина торфяного слоя может быть оценена на основе высотных отметок.

Однако арктические регионы обычно не плоские и на распределение толщины органического слоя влияют многие факторы. Что еще более важно, сложный рельеф оказывает значительное влияние на грунты, растительность и локальные климатические условия и, таким образом, характеризуется большими пространственными вариациями в распределении ММ. Поэтому для картирования многолетней мерзлоты в условиях сложного рельефа необходимо более высокое пространственное разрешение, особенно для планирования землепользования и оценки влияния ММ на гидрологию, гидрогеологию, экосистемы и геологические опасности.

Целями данного исследования являются: разработка подхода к моделированию и картированию многолетней мерзлоты с высоким пространственным разрешением для арктического региона со сложным рельефом, проверка эффектов пространственного разрешения и выявление пробелов во входных данных для будущих исследований.



**Рис. 1.** Карта рельефа национального парка «Иввавик» (а) и расположение парка (серый цвет) в провинции Юкон (б). Указаны точки размещения климатических станций (зеленые квадратики) и мест наблюдений за глубиной летнего протаивания (красные кружки), данные которых использовались в исследовании. Красный кружок на рисунке «б» – место наблюдений на озере Иллисарвик на острове Ричардс

## МЕТОДЫ И ДАННЫЕ ►

### ИССЛЕДУЕМАЯ ТЕРРИТОРИЯ И ИСТОЧНИКИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ ►

Исследуемая территория – это национальный парк «Иввавик» (НПИ), расположенный в северной части провинции Юкон (территории на северо-западе Канады) (рис. 1). Этот парк занимает площадь 10,17 тыс. км<sup>2</sup> и состоит из двух основных зон: высокогорного внутреннего региона, который относится к Британским горам, и прибрежной равнины у моря Бофорта. Самая высокая гора достигает высоты 1655 м. НПИ характеризуется необычайным природным разнообразием и включает арктическую тундру, горную тундру, лесные массивы и арктические прибрежные местообитания. Большая часть территории парка не была покрыта льдом, поэтому содержит древние формы рельефа, которые за миллионы лет эволюционировали до нынешнего вида. Парк является частью района отёла и летнего пребывания стада поркюпайнских карibu (северных оленей), насчитывающего около 165 тыс. животных [15]. В настоящее время в НПИ распространена сплошная многолетняя мерзлота [16].

Для представляемого в данной статье исследования были использованы три основных источника полевых данных. Первый – это отчет службы «Парки Канады»

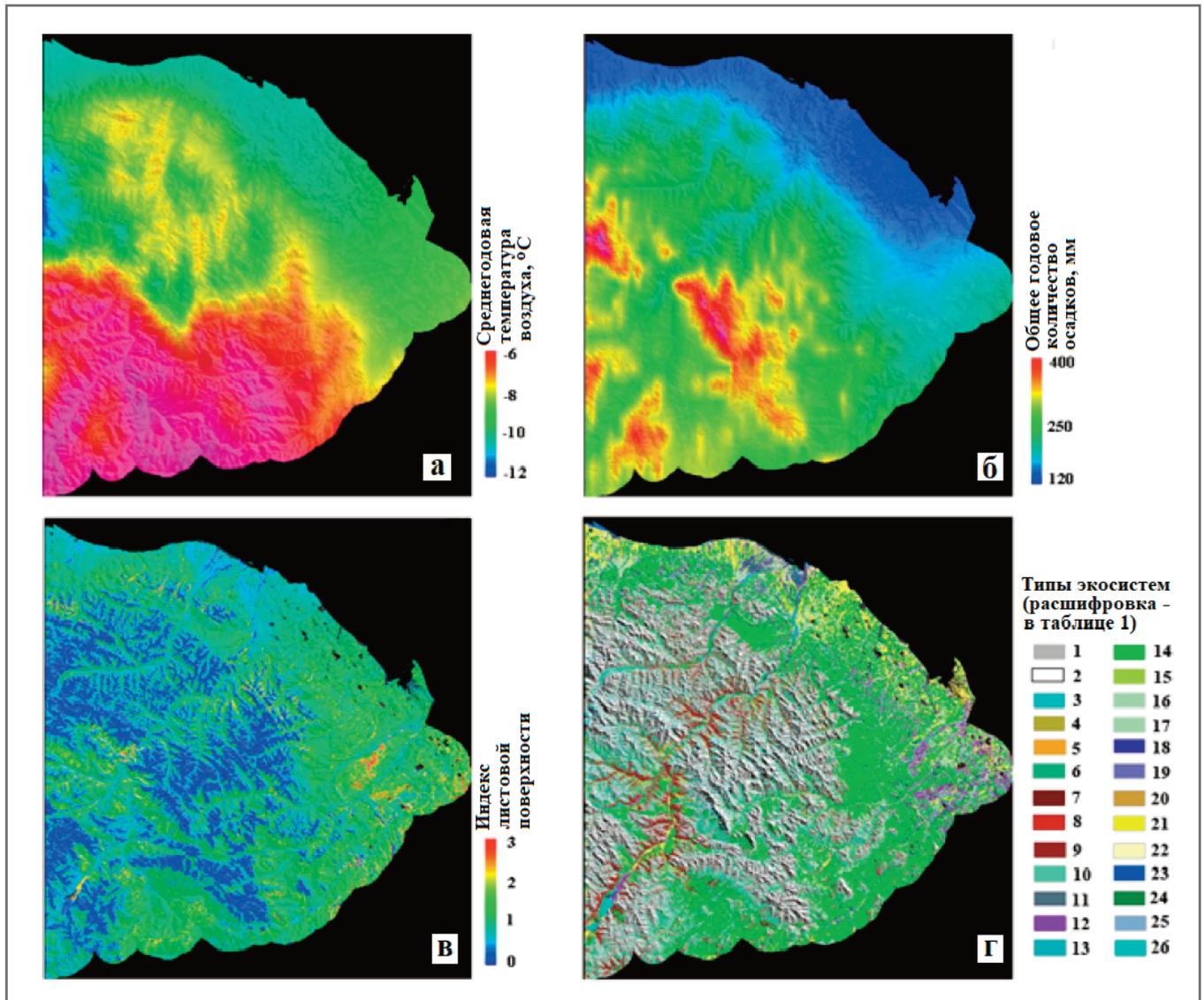
о ресурсах НПИ [15], в котором представлена общая информация о климате, геологии, геоморфологии, грунтах, гидрологии, гидрогеологии, растительности и дикой природе парка. Вторым источником – детальная классификация экосистем вдоль бассейна реки Ферг, который охватывает около трети НПИ [17]. На основе этой классификации авторы расширили карту экосистем на весь парк и определили грунтовые и дренажные условия для каждого типа. Третьим источником данных – полевые наблюдения авторов, проводившиеся в течение четырех летних сезонов с 2008 по 2011 год с определением местоположения, топографии, дренажных и грунтовых условий, состава и состояния растительности, типа экосистемы, глубины летнего протаивания. Последняя измерялась с помощью стальных зондов и выкапывания в грунте шурфов на 162 участках по всему парку, причем на 62 участках из них не был достигнут мерзлый слой из-за высокого содержания в грунте камней. На рисунке 1, а показано распределение 100 участков, на которых удавалось определять глубину летнего протаивания.

### МОДЕЛЬ ►

Для расчета и картирования состояния многолетней мерзлоты на территории парка была использована модель Northern Ecosystem Soil Temperature model (NEST – «Модель температуры грун-

тов северных экосистем»). Это одномерная переходная модель, в которой учитываются воздействия климата, растительности, снежного покрова и грунтовых условий на динамику температурного режима грунтов на основе переноса энергии и массы в системе «грунт – растительность – атмосфера» [18]. Температура грунта рассчитывается путем решения одномерного уравнения теплопроводности. Учитываются динамика глубины снежного покрова, его плотность и их влияние на температуру грунта. Динамика влажности грунта моделируется с учетом поступления воды (из атмосферных осадков и при таянии снега), ее ухода (при испарении и транспирации), а также распределения по слоям грунта. Протаивание и промерзание грунта и связанные с ними изменения в содержании льда и воды определяются на основе закона сохранения энергии. Подробные описания модели и путей ее валидации можно найти в работах [10, 18, 19]. Латеральные водные потоки и перенос снега ветром параметризуются упрощенным образом [13, 20].

Авторы улучшили эту модель так, чтобы в ней учитывалось влияние топографии на инсоляцию и была возможность ее использования для территорий со сложным рельефом. Алгоритмы и электронный адрес, по которому можно найти исходную программу, представлены в приложении к статье.



**Рис. 2.** Распределение в национальном парке «Иввавик»: а – среднегодовых температур воздуха, усредненных за период 1971–2000 гг. на основе данных из работы [21]); б – общих годовых количеств осадков, усредненных за период 1971–2000 гг. на основе данных из работы [21]); в – индексов листовой поверхности (на основе оценок по снимкам со спутников Landsat); г – типов экосистем (карта экосистем была взята из работы [23], названия типов экосистем приведены в таблице 1). Для удобства интерпретации все это приведено на фоне оттененного рельефа. Акватории, в том числе подо льдом, или территории вне парка везде показаны черным цветом

## ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА ▶

### Климатические данные

В пределах или поблизости от НПИ имеется семь метеорологических станций. На трех станциях около северной береговой линии наблюдения ведутся около 50 лет, а на четырех остальных, в том числе на трех удаленных от моря, – менее 15 лет.

В большинстве имеющихся данных есть некоторые пробелы. В нескольких работах представлены разработанные методы пространственной интерполяции среднемесячных климатических показателей на основе наблюдений на станциях (например, [21, 22]).

Авторы настоящей статьи оценили временные закономерности по данным

наблюдений на репрезентативных метеорологических станциях, а также усредненное пространственное распределение температуры воздуха и количества атмосферных осадков на основе среднемесячных пространственных данных из работы [21].

Результаты наблюдений показали тесную корреляцию хода температур на разных станциях в НПИ. Например, коэффициент корреляции ( $R$ ) между среднесуточными температурами воздуха с 1968 по 2010 год на станциях «Комакук-Бич» ( $69,62^\circ$  с.ш.,  $140,20^\circ$  з.д.) и «Олд-Кроу» ( $67,34^\circ$  с.ш.,  $139,50^\circ$  з.д.) составляет 0,92 (при количестве данных  $N=15706$ ), хотя эти две станции находятся примерно в 250 км друг от друга (первая – на побережье, а вторая – на внутренней территории (см. рис. 1)).

Корреляция между суточными количествами осадков между ними слабая ( $R=0,16$ ;  $N=15706$ ). Однако осадки, в сумме выпавшие за месяц на этих станциях, коррелируют ( $R=0,50$ ;  $N=516$ ). Поэтому авторы использовали данные наблюдений на климатических станциях для представления как долгосрочных среднемесячных климатических закономерностей, так и ежесуточных колебаний в течение месяца в соответствующих районах.

Среднемесячная температура воздуха в ячейке сетки  $g$  в месяце  $M$  года  $Y$  ( $T_{m,g}(Y, M)$ ) оценивалась по следующей формуле:

$$T_{m,g}(Y, M) = T_{0m,g}(M) + \Delta T_{m,s}(Y, M), \quad (1)$$

где  $T_{0m,g}(M)$  – среднемесячная температура

**Таблица 1. Биофизические группы и типы экосистем в национальном парке «Иввавик» (более подробное описание особенностей рельефа, растительности и грунтовых условий можно найти в брошюре [17])**

Биофизические группы	Типы экосистем	
	Цифровые обозначения (см. рис. 2)	экосистемы
Горные склоны	1	горных склонов
	2	скальных массивов, покрытых лишайниками
Нивационные и фильтрующие склоны	3	нивационных склонов, поросших вереском и бойкинией аляскинской (медвежьим цветком)
	4	фильтрующих склонов, поросших ольхой и вереском
	5	склонов с умеренным увлажнением, поросших березой и водяникой черной (вороникой)
Горные склоны от сухих до влажных	6	влажных склонов, поросших ивой и березой
	7	сухих склонов, поросших елью и дёренем
	8	склонов с умеренным увлажнением, поросших елью и березой
Сильно увлажненные горные склоны	9	склонов с сильным увлажнением, поросших елью и хвощом
	10	склонов с сильным увлажнением, поросших ивой и хвощом
Дренирующие русла	11	зон стока, поросших мать-и-мачехой и горным шавелем
	12	дренирующих русел, поросших ивой и мать-и-мачехой
	13	дренирующих русел, поросших ивой аляскинской (ивой великолепной)
Педименты (слабонаклонные предгорные/ подгорные равнины)	14	пушицевых кочкарников
	15	пушицевых кочкарников с ольшаниками
	16	осоковых кочкарников
	17	дренирующих русел педиментов, поросших ивой и осокой
Неактивные аллювиальные террасы (старые, уже не подверженные активной эрозии)	18	неактивных аллювиальных террас, поросших копеечником и гравилатом
	19	неактивных аллювиальных террас, поросших ивой
	20	неактивных аллювиальных террас, поросших елью и рододендромом
Заболоченные территории	21	заболоченных территорий, поросших злаками
	22	дюпонциевых болот (болот, поросших дюпонцией)
Действующие поймы (периодически затопливаемые)	23	пойм, поросших разнотравьем (разнотравных пойменных лугов)
	24	пойм, поросших ивой
	25	пойм, поросших тополем
	26	песчаных и илистых кос и отмелей

тура воздуха в ячейке сетки  $g$  в месяце  $M$ , усредненная за 30 лет (1971–2000 гг.), которая была интерполирована на основе данных метеорологических станций из работы [21] с использованием пространственного разрешения 30 м на 30 м (рис. 2);  $\Delta T_{m,s}(Y,M)$  – отклонение среднемесячной температуры воздуха в месяце  $M$  года  $Y$  от среднего значения для этого месяца за

30 лет, оцененного на основе наблюдений на станции.

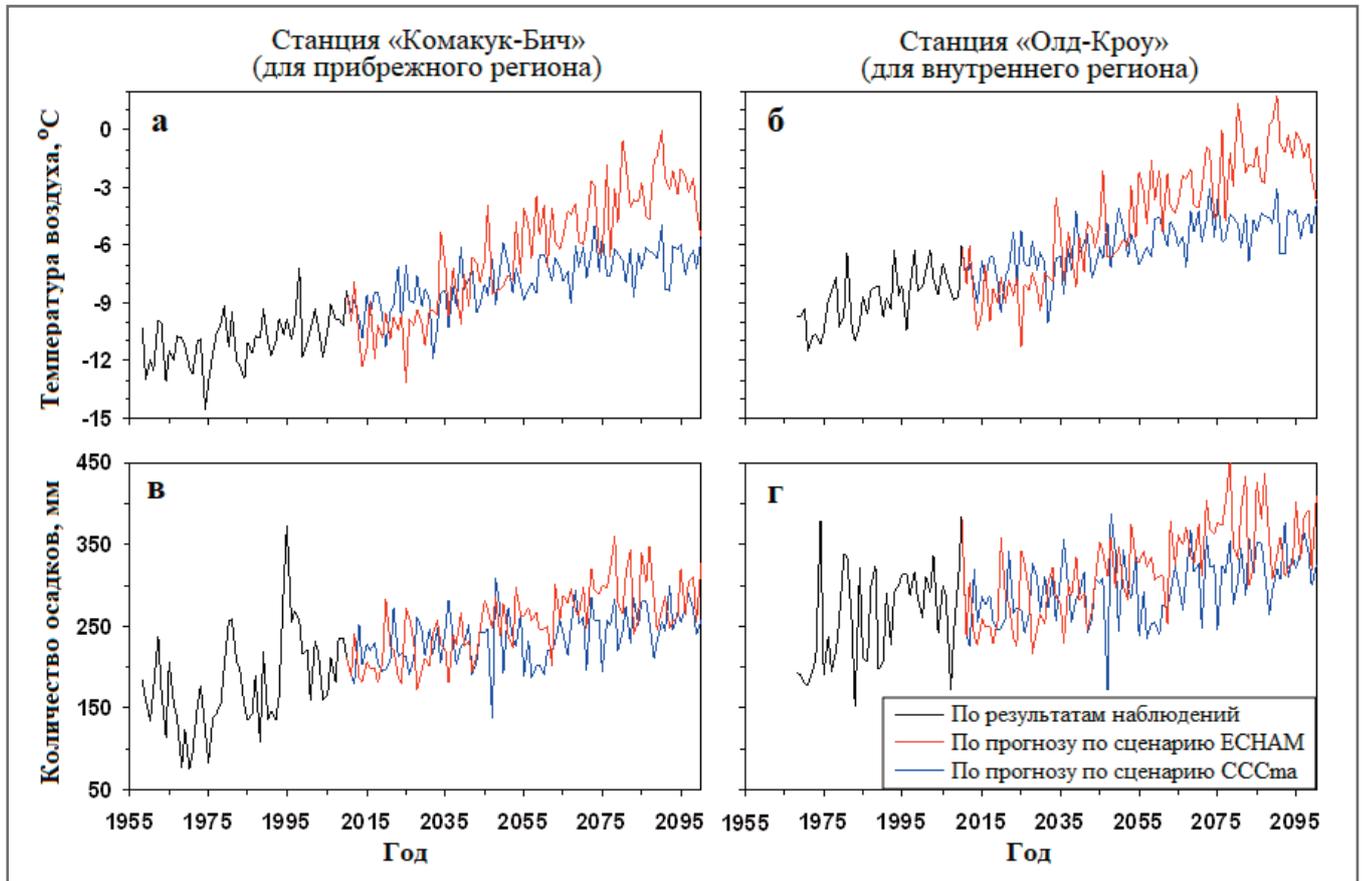
Среднесуточная температура воздуха в ячейке сетки оценивалась на основе ежедневных наблюдений на климатической станции по формуле:

$$T_{d,g}(Y, M, D) = T_{d,s}(Y, M, D) + \Delta T_{m,gs}(Y, M), \quad (2)$$

где  $T_{d,g}(Y,M,D)$ ,  $T_{d,s}(Y,M,D)$  – суточная

температура воздуха (максимальная или минимальная температура за сутки) в день  $D$  месяца  $M$  года  $Y$  для ячейки сетки  $g$  и климатической станции  $s$  соответственно;  $\Delta T_{m,gs}(Y,M)$  – разница между среднемесячными температурами воздуха в ячейке сетки  $g$  и на климатической станции  $s$  для месяца  $M$  года  $Y$ .

Количество атмосферных осадков оценивалось аналогичным образом, но



**Рис. 3.** Изменения на климатических станциях «Комакук-Бич» и «Олд-Кроу»: а, б – среднегодовой температуры воздуха; в, г – общего годового количества осадков. Наблюдения на этих двух станциях использовались для представления временных климатических закономерностей в прибрежных и внутренних районах соответственно

с использованием соотношений вместо разностей.

Для прогнозирования климатических условий в будущем (2012–2100 гг.) авторы выбрали два сценария, которые были сгенерированы с помощью двух глобальных климатических моделей (Global Climate Models – GCM), таких как CCSM3.1 и MPI ECHAM5. Эти два сценария будем называть CCSM3.1 и ECHAM5 соответственно. Они были выбраны потому, что две использованные для их создания модели лучше подходили для моделирования климата XX века в Северной Америке [24] и два полученных на их основе сценария представили общий диапазон изменений температуры воздуха в соответствии со сценариями промежуточных уровней выбросов (A1B) для этого региона. Среднемесячные данные для CCSM3.1 и ECHAM5 были взяты в апреле 2011 года с сайта Всемирного центра климатических данных (<http://mud.dkrz.de/wdcc-for-climate/>).

Сначала помесечно рассчитали значения относительной разницы между величинами для спрогнозированного будущего климата и усредненными величинами за прошлый 30-летний период (1971–2000 гг.), полученными с помощью одной

и той же модели. Затем эти относительные изменения применили для помесечной оценки будущего климата для всех ячеек сетки НПИ, поскольку парк в основном охватывается одной ячейкой сетки климатической модели. В результате между 1971–2000 и 2090-ми годами прогноз показал увеличение среднегодовой температуры воздуха на 4,2 и 8,8 °C, а общего годового количества осадков – на 26 и 37% по сценариям CCSM3.1 и ECHAM5 соответственно (рис. 3).

Среднемесячные значения температуры воздуха и общие месячные количества осадков были преобразованы в суточные данные с использованием вышеописанного метода (см. формулы (1) и (2)) на основе исторических ежедневных наблюдений на климатических станциях.

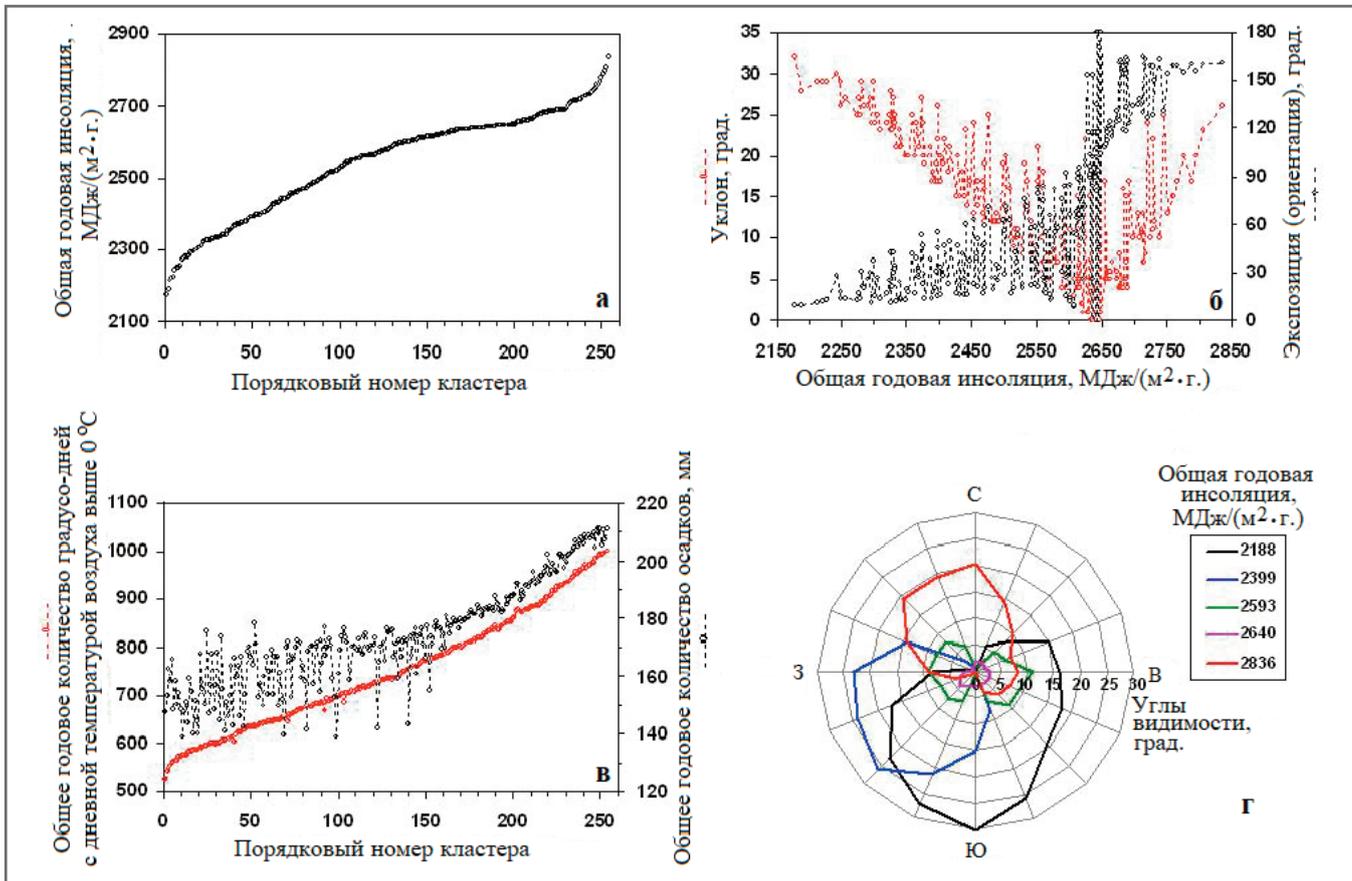
Парциальное давление водяного пара в воздухе оценивалось на основе минимальной температуры воздуха [13]. Общая суточная инсоляция без учета топографических эффектов (входные данные для учета влияния топографических особенностей на инсоляцию описаны в приложении к статье) оценивалась на основе широты, дня года, суточного диапазона температур и давления

пара [13]. Эти параметры определялись на основе наблюдений на климатической станции «Инувик» (68,32° с.ш., 133,52° з.д.).

Прибрежная территория парка, граничащая с Северным Ледовитым океаном, характеризуется морским климатом, а внутренняя территория – континентальным [15]. Авторы настоящей статьи очертили южную границу прибрежного региона по контурной линии 300 м над уровнем моря. Чтобы представить временные климатические закономерности в прибрежных и внутренних регионах, использовались результаты ежедневных наблюдений соответственно на станциях «Комакук-Бич» (за 1958–2011 гг.) и «Олд-Кроу» (1968–2011 гг.), поскольку там проводились самые продолжительные непрерывные наблюдения в пределах или вблизи парка. Пробелы в данных заполнялись на основе измерений на соседних метеорологических станциях.

**Классификация усредненных климатических и топографических воздействий на инсоляцию**

Поскольку пространственное распределение климата оценивалось на основе



**Рис. 4.** Условия в кластерах прибрежного региона: а – общая годовая инсоляция; б – уклон и экспозиция кластеров, соответствующих той или иной общей годовой инсоляции (если экспозиция больше 180°, то она показана на графике как 360° минус экспозиция); в – общее годовое количество градусо-дней с температурой воздуха выше 0 °С и общее годовое количество осадков; г – зоны видимости для некоторых кластеров с указанной в легенде общей годовой инсоляцией (для склона, обращенного на север, экспозиция равна нулю, а увеличивается она в направлении против часовой стрелки)

долгосрочных помесечных средних значений, которые не меняются со временем, авторы распределили средние климатические условия в ячейках сетки по разным группам (кластерам), чтобы сократить время вычислений.

Состояние многолетней мерзлоты в основном зависит от сезонных и годовых климатических условий и не очень чувствительно к ежедневным колебаниям климатических параметров. Например, толщина деятельного слоя грунта в основном определяется общим годовым количеством градусо-дней, когда среднесуточная температура воздуха больше нуля градусов по Цельсию (Total Degree-Days at  $T > 0$  °C –  $TDD_{T>0}$ ), в соответствии с уравнением Стефана [25]. Поэтому для группирования (кластеризации) средних климатических показателей авторы использовали  $TDD_{T>0}$  и общее годовое количество осадков. Значения  $TDD_{T>0}$  с разрешением 30 м и общие годовые количества осадков были повторно дискретизированы до разрешения 10 м с использованием такого метода кластерного анализа, как метод ближайшего соседа.

Топографическими атрибутами, влияющими на инсоляцию, являются крутизна склона, его экспозиция (ориентация) и зона видимости. Крутизна и экспозиция были рассчитаны с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) с разрешением 10 м, которая была повторно дискретизирована на основе данных ЦМР с разрешением 30 м с использованием метода билинейной интерполяции. Авторы сделали эту повторную дискретизацию, чтобы достичь соответствия разрешению карты экосистем. Данные ЦМР были взяты с сайта Центра топографических данных Министерства природных ресурсов Канады.

Зона видимости для ячейки сетки представляет собой угловое распределение видимости неба в зависимости от препятствий, аналогичное видам на полусферических фотографиях, снятых с помощью объектива типа «рыбий глаз», направленного в небо из центра ячейки сетки [26]. Поскольку большинство долин в парке имеют ширину менее 3 км (между вершинами), авторы рассчитали зоны видимости для каждой ячейки сетки размером 30 м на 30 м, используя

окно размером 201 на 201 ячейку сетки ЦМР (или 3 км от ячейки сетки до сторон окна). Углы видимости были рассчитаны для каждого азимута через 22,5° (всего для 16 азимутов) для каждой ячейки сетки. Затем углы видимости были интерполированы до пространственного разрешения 10 м.

С использованием уклона, экспозиции и углов видимости для каждой ячейки сетки рассчитывался средний годовое количество инсоляции для кластерного анализа.

Авторы выполнили кластеризацию средних климатических и топографических показателей на основе  $TDD_{T>0}$ , общего годового количества осадков, среднегодовой инсоляции, крутизны склона и его экспозиции с использованием метода неконтролируемой классификации Isodata с помощью программного обеспечения PCI Isodata от канадской компании PCI Geomatics Enterprises Inc. Поскольку эта программа допускает максимум 255 кластеров, авторы сначала получили 9 больших кластеров для внутреннего региона, а затем каждый из них дополнительно разбили на 254 кластера.

**Таблица 2. Количество кластеров и средние ошибки кластеризации для прибрежного и внутреннего регионов НПИ**

Число кластеров, ошибки кластеризации	Регион	
	прибрежный	внутренний
Число кластеров	254	2286
Средняя ошибка для $TDD_{T>0}$ , число градусо-дней	7,3	10,8
Средняя относительная ошибка для $TDD_{T>0}$ , %	1,0	1,2
Средняя относительная ошибка для $\sqrt{TDD_{T>0}}$ , %	0,5	0,6
Средняя ошибка для $TDD_{T<0}$ , число градусо-дней	54,6	133,7
Средняя относительная ошибка для $TDD_{T<0}$ , %	1,3	3,4
Средняя ошибка для среднегодовой температуры воздуха, °C	0,15	0,37
Средняя ошибка для общего годового количества осадков, мм	5,6	10,3
Средняя относительная ошибка для общего годового количества осадков, %	3,4	4,1
Средняя ошибка для общей годовой инсоляции, МДж/(м <sup>2</sup> ·г.)	12,6	20,9
Средняя относительная ошибка для общей годовой инсоляции, %	0,2	0,4
Средняя ошибка для уклона, град.	0,9	1,8
Средняя ошибка для экспозиции, град.	3,1	8,4

*Примечания:*  $TDD_{T>0}$ ,  $TDD_{T<0}$  – общее годовое количество градусо-дней со среднесуточной температурой воздуха выше и ниже 0 °C соответственно; согласно уравнению Стефана толщина деятельного слоя пропорциональна  $\sqrt{TDD_{T>0}}$ , поэтому соответствующие ошибки тоже рассматриваются.

Данные для прибрежного региона были напрямую разбиты на 254 кластера, причем ошибки кластеризации были меньше, чем для внутреннего региона. На рисунке 4 показаны примеры климатических параметров, инсоляции и топографических условий для кластеров прибрежного региона. В таблице 2 перечислены средние ошибки кластеризации. Влияние ошибок кластеризации на толщину смоделированного деятельного слоя в целом было менее 0,6% (на основе уравнения Стефана).

Чтобы уменьшить ошибку оценки инсоляции для каждого кластера, кластеру присваивались топографические атрибуты с использованием атрибутов той ячейки сетки внутри кластера, общая годовая инсоляция которой меньше всего отличалась от среднего значения по кластеру. Для расчета инсоляции кластера также использовалась широта этой ячейки сетки.

Аналогичным образом среднемесячная температура воздуха и общее месячное количество осадков для кластера определялись с использованием широты той ячейки сетки в его пределах, в которой разница между  $TDD_{T>0}$  для этой ячейки и средним значением по кластеру была наименьшей.

#### Типы экосистем и их распределение

На рисунке 2, г показано распределение типов экосистем (см. таблицу 1) на территории НПИ. Эту карту составили

авторы статьи [23], используя снимки со спутников SPOT с разрешением 10 м, сделанные в период с 13 июля по 22 августа 2006 года. Она была разработана с применением нового метода прогнозного картирования экосистем на основе снимков – с объединением карты растительного покрова по данным дистанционного зондирования и прогнозных атрибутов рельефа по ЦМР [23]. Классификатор дерева решений был обучен на основе карты экосистем бассейна реки Ферг, разработанной с использованием аэрофотоснимков и детальных полевых наблюдений на 367 участках авторами работы [17]. Общая точность классификации составила 85% [23].

#### Грунтовые условия и гидрогеологические параметры

Грунтовые условия и гидрогеологические параметры, необходимые для модели, включают толщину верхнего органического слоя, текстуру минеральных грунтов, содержание органического вещества в минеральных грунтах, долю крупнообломочного материала (от гравия и гальки до валунов), параметры бокового притока и оттока и параметр переноса снега ветром (снегозаносимости или наоборот). Поскольку для этих входных данных отсутствовали детальные карты, авторы настоящей статьи оценивали их пространственное распределение на основе карты экосистем.

Грунтовые условия, определенные для разных типов экосистем, приведены в таблице 3.

Текстура минерального грунта для каждого типа экосистемы определялась на основе типичных условий, описанных в работе [17], и результатов собственных полевых наблюдений.

Толщина торфа оценивалась на основе собственных полевых измерений и особенностей территорий с разными типами экосистем, особенно режимов их увлажнения и дренирования, как описано в работе [17].

Содержание органического вещества в верхней части минерального грунта оценивалось в соответствии с типичными результатами полевых измерений. Изменения в содержании органического вещества в грунте с глубиной оценивались на основе полевых данных и общих закономерностей, описанных в работе [27].

Грунты большинства территорий парка, особенно в более глубоких слоях, содержат некоторое количество крупнообломочного материала от гравия до валунов. Его доля оценивалась авторами на основе результатов полевых наблюдений, биофизических и ландшафтных особенностей типов экосистем, описанных в работе [17]. Этот материал уменьшает объем грунта, способный удерживать воду и обмениваться ей. Поэтому мощность подстилающего грунта оценивалась с допущением того, что доля крупнообломочного материала увеличи-



Таблица 3. Грунтовые условия, определенные для разных типов экосистем

Тип экосистемы <sup>1</sup>	Дренаруемость, классы <sup>2</sup>	Влажность, режимы <sup>3</sup>	Число участков наблюд. <sup>4</sup>	Толщина верх. органич. Слоя грунта, см		Текстура грунта <sup>7</sup>		Содерж. орг. вещ. в верх. слое минер. грунта, %	Гравий <sup>10</sup>	
				измеренная <sup>5</sup>	для модели <sup>6</sup>	измеренная <sup>8</sup>	для модели <sup>9</sup>		глубина первого появления, см	содержание на этой глубине, %
1	4-5	1-2	19	0-15	5	S, L, S	S	10	0	10-5LAI
2	5	1	8	0-5	5	S, Si, L	S	10	0	20-5LAI
3	3	3-4	3	4	4	SL	SL	20	30	10
4	3-5	4-5	0	-	4	-	SL	20	30	10
5	3-4	2-4	8	0-3	0	S, L, Si	L	20	30	5
6	2-4	4-5	8	0	0	L, Si	L	80	40	5
7	3-5	2-3	2	2-5	0	L, LS	L	50	30	5
8	3	3-5	10	5-30	10	S, Si, SiL	Si	20	30	5
9	1-3	5-6	10	0-20	10	Si	Si	20	40	5
10	1-3	5-7	16	0-40	5	Si, SiC, SiC	Si	20	40	5
11	2-3	5	2	4	4	L	L	10	0	10
12	2-3	5	1	5	5	SCL, SiCL, C	SiCL	10	10	5
13	1-2	4-5	3	0-12	5	Si, SiL, C	SiL	10	10	10
14	1-2	5-6	5	10-30	30	Si, C	Si	50	40	5
15	2-3	5	1	10	10	-	Si	30	30	5
16	2-3	5-7	10	10-29	20	Si, L	Si	15	30	5
17	1-2	6-7	5	0-19	10	S, Si, L	S	20	30	5
18	4-5	1-3	0	-	0	SL, LS	SL	10	30	5
19	3-5	2-3	3	0-10	5	S, Si	Si	10	30	5
20	3-5	2-3	12	0-21	10	Si, S, SL	Si	20	30	5
21	0-1	7-8	19	10->40	30	Si, SiL, C	SiCL	5	50	5
22	0	7-8	0	-	0	-	S	30	20	5
23	6	7	0	-	0	-	S	20	40	30
24	4	4-5	3	0-5	5	S	S	20	40	30
25	4	4-5	5	2-14	8	S, L	L	10	40	30
26	4	4-5	0	-	0	-	S	2	30	10

## Примечания

<sup>1</sup> Расшифровку цифровых обозначений типов экосистем – см. таблицу 1; их распределение по территории парка – см. рис. 2, г.

<sup>2</sup> Дренаруемость грунта по классам: 0 – очень слабая (very poorly); 1 – слабая (poorly); 2 – несовершенная (imperfectly, умеренно медленная); 3 – умеренно хорошая (moderately well); 4 – хорошая (well); 5 – быстрая (rapidly); 6 – очень быстрая (very rapidly) (классы определялись на основе классификации Комитета экспертов по исследованиям грунтовых условий Министерства сельского хозяйства Канады 1987 года [28] по данным из работы [17]).

<sup>3</sup> Грунт по классам (режимам) увлажнения: 0 – особенно ксерический (very xeric, очень сухой, чрезмерно дренируемый); 1 – ксерический (xeric, сухой, сезонно-сухой); 2 – субксерический (ub-xeric, полусухой, сезонно-влажный); 3 – субмезический (sub-mesic, с очень умеренным увлажнением); 4 – мезический (mesic, с умеренным увлажнением); 5 – субгигрический (ub-hygic, увлажненный); 6 – гигрический (hygic, весьма увлажненный); 7 – субводонасыщающий (sub-hydric); 8 – водонасыщающий (hydric) (режимы определялись на основе документа [29] по данным из работы [17]).

<sup>4</sup> Число участков, где проводились наблюдения в 2008–2011 гг.

<sup>5</sup> По данным измерений в 2008–2011 гг.

<sup>6</sup> Определенная для ввода в модель.

<sup>7</sup> Буквенные обозначения текстуры грунта: S – песок (Sand); L – суглинок (Loam); C – глина (Clay); Si – пылеватый (илистый) грунт (Silt); LS – суглинистый песок (Loamy Sand); SL – песчаный суглинок (Sandy Loam); SiL – пылеватый (илистый) суглинок (Silty Loam); SCL – опесчаненный глинистый суглинок (Sandy Clay Loam); SiCL – пылеватый глинистый суглинок (Silty Clay Loam); SiC – пылеватая (илистая) глина (Silty Clay) (обозначения приведены в соответствии с Международной системой классификации, руководством Службы охраны природных ресурсов Министерства сельского хозяйства США и «Треугольником Ферре», с чем можно ознакомиться, например, по адресам: <https://topsoilpros.com/what-is-a-soil-texture-chart/>; [https://wrb.isric.org/files/The\\_Ultimate\\_Soil\\_Texture\\_Flow\\_Chart\\_2022-01-11.pdf](https://wrb.isric.org/files/The_Ultimate_Soil_Texture_Flow_Chart_2022-01-11.pdf); <https://nrspad.se.gov.usda.gov/DistributionCenter/pdf.aspx?productID=1363>. – Ped.)

<sup>8</sup> По данным измерений в 2008–2011 гг. и в процессе работы [17]

<sup>9</sup> Определенная для ввода в модель.

<sup>10</sup> Эти оценки выполнялись по данным из работы [17] и по результатам собственных полевых наблюдений в 2008–2011 годах. Содержание гравия после уровня первого появления постепенно увеличивается с глубиной (авторы переведенной статьи нигде не пояснили, что в данном случае означает «5LAI», если речь идет о содержании крупнообломочного материала на нулевой глубине. – Ped.).



вается с глубиной на 2% каждые 10 см до тех пор, пока не достигнет 100%.

Параметры бокового притока и оттока оценивались на основе класса дренируемости и класса увлажнения (водного режима) грунта для типов экосистем в соответствии с работой [17]. Авторы настоящей статьи приняли, что наименьшая глубина уровня грунтовых вод (УГВ) для бокового оттока, составляющая от 0 до 0,4 м, пропорциональна номеру класса увлажнения грунта (в диапазоне от 0 до 8, то есть от очень сухого до водонасыщающего соответственно), а скорость бокового оттока экспоненциально зависит от номера класса дренируемости (в диапазоне от 0 до 6, то есть от очень слабой до очень быстрой соответственно). Авторы также приняли, что нет поверхностного бокового притока и вода будет постепенно утекать, когда УГВ будет выше поверхности земли (если последнее случится, то УГВ будет становиться на 5% глубже каждый день).

Параметр переноса снега ветром рассчитывался с учетом влияния экспозиции поверхности, форм и плотности растительного покрова.

Экспозицию поверхности в ячейке сетки определяли на основе типичных особенностей рельефа для типов экосистем, описанных в работе [17].

Растительность подразделили на шесть форм: хвойные деревья; лиственные деревья; кустарники от средней и большой высоты (0,5 м); низкие кустарники (ниже 0,5 м); осоки или злаки; низкие осоки или злаки. Влияние плотности растительности оценивали на основе индексов листовой поверхности (Leaf Area Indices, LAI).

Поскольку геотермические наблюдения в арктических регионах были редки, было принято, что все ячейки сетки территории парка имеют одинаковую плотность геотермального теплового потока (0,08 Вт/м<sup>2</sup>) и одинаковую теплопроводность коренных пород (2,28 Вт/(м·°C)), оцененные на основе результатов полевых наблюдений [30–32].

### Индексы листовой поверхности

Значения индекса листовой поверхности (Leaf Area Index – LAI) были доведены до пространственного разрешения 10 м с использованием оценок биомассы листвы по снимкам со спутников Landsat с разрешением 30 м с помощью следующей формулы:

$$L_{10m,i} = 9B_0(E_i) \cdot S(E_i) \cdot B_{30m} / \sum_{j=1}^9 B_0(E_j)(E_j), \quad (3)$$

где где  $L_{10m,i}$  – расчетное значение LAI

для 10-метрового  $i$ -го пикселя (см<sup>2</sup> листовой поверхности на см<sup>2</sup> поверхности грунта);  $E_i, E_j$  – типы экосистем для 10-метровых  $i$ -го и  $j$ -го пикселей соответственно ( $j$  варьирует от 1 до 9 для девяти 10-метровых пикселей в 30-метровом пикселе снимка со спутника Landsat);  $B_{30m}$  – биомасса листвы в пределах 30-метрового пикселя (г/см<sup>2</sup>) которая рассчитывается с использованием уравнения регрессии простого соотношения вегетационного индекса (полоса-4/полоса-3) по снимкам, полученным со спутника Landsat 30 августа 2001 года [33];  $B_0(E_j)$  – средняя биомасса листвы (г/см<sup>2</sup>) для экосистемы типа  $E_j$ , которая была рассчитана как среднее значение для всех 30-метровых пикселей (в пределах территории парка), где  $E_j$  – доминирующий тип экосистемы;  $S(E_i)$  – удельная листовая поверхность (см<sup>2</sup>/г) для типа экосистемы  $E_i$  (122 см<sup>2</sup>/г для осок, 154 см<sup>2</sup>/г для листопадных кустарников, 74 см<sup>2</sup>/г для вечнозеленых кустарников, 50 см<sup>2</sup>/г для ели черной) [34].

На снимках, сделанных со спутников Landsat, некоторые крутые участки были скрыты тенью. Поэтому авторы настоящей статьи оценивали LAI на таких участках как среднее значение LAI для экосистемы типа  $B_0(E_i)S(E_i)$ . Распределение LAI на территории парка показано на рисунке 2, в. При моделировании значения LAI были разделены на 18 классов, которые экспоненциально увеличивались с 0 до 4,0.

### ПРОЦЕДУРЫ РАСЧЕТОВ

Полученная модель запускалась для всех комбинаций классов входных данных (типов экосистем, климатотопографических кластеров, классов LAI) для прибрежного и внутреннего регионов. Одна комбинация типов/классов/кластеров входных данных обычно представляла условия для более чем одной ячейки сетки. За исключением поверхностей воды и наледей, для прибрежного и внутреннего регионов парка есть соответственно 49,441 тыс. и 258,633 тыс. различных комбинаций. Общее количество комбинаций классов входных данных составило 0,3% от общего количества ячеек сетки сухопутной части парка с разрешением 10 м (в парке насчитывается 107 млн ячеек сетки с разрешением 10 м, не считая водных объектов и наледей). В результате при таком пространственном моделировании с высоким разрешением время вычислений значительно сократилось.

Посуточные климатические данные, полученные на станциях «Олд-Кроу» и

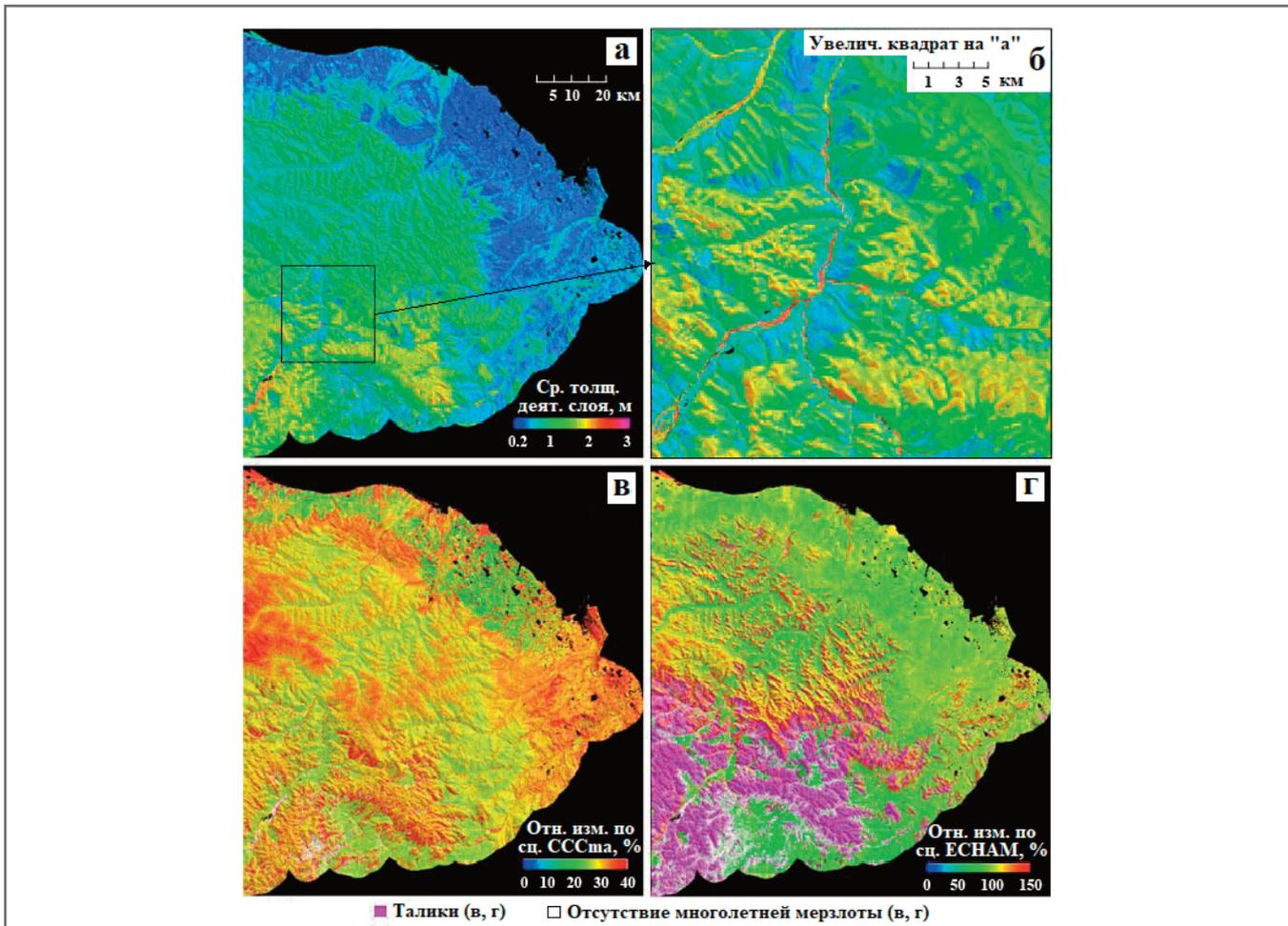
«Комакук-Бич», относятся к 1968 и 1958 годам соответственно. Для пространственной согласованности авторы моделировали многолетнюю мерзлоту в парке с 1968 года. Для инициализации (задания начальных условий) модели были выбраны посуточные климатические данные наблюдений на станциях «Олд-Кроу» и «Комакук-Бич» в 1972 и 1964 годах соответственно, когда климатические условия были близки к таковым при экстраполяции на 1967 год. Модель прогоняли итеративно, используя климатические данные для указанных лет, до тех пор, пока смоделированная температура грунта не стала стабильной. Затем ее прогоняли по данным за 1968–2011 годы на основе ежедневных наблюдений. После этого модель запускалась для двух рассмотренных ранее климатических сценариев до 2100 года.

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

#### ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ

На рисунках 5, а, б показано смоделированное пространственное распределение толщины слоя сезонного оттаивания/промерзания в 2000-х годах (2000–2009 гг.). В основном она уменьшалась на территории парка с юга на север. Деятельный слой был тоньше в большинстве долин, на прибрежных территориях. Более толстым он был выше в горах и вдоль дренирующих русел в некоторых долинах. Полученные результаты также показали значительные различия для территорий, занятых разными типами экосистем (рис. 6, в). Горные склоны и скальные участки, поросшие лишайниками, имели мощные деятельные слои, поскольку на их поверхности не было органического слоя и в грунте обычно содержалось большое количество крупнообломочного материала. В действующих поймах (с типами экосистем 23–26) и дренирующих руслах (с типами экосистем 11–13) деятельный слой также был более мощным из-за очень влажных условий и высокого содержания крупнообломочного материала. Склоны педиментов, то есть слабонаклонные предгорные/подгорные равнины (с типами экосистем 14–17), и заболоченные территории, поросшие злаками (экосистемы типа 21), имели тонкий активный слой из-за мощного слоя торфа и очень влажных условий.

Для каждого климатотопографического кластера была рассчитана сред-



**Рис. 5.** Результаты моделирования: а – средняя толщина деятельного слоя в 2000-х годах (2000–2009 гг.); б – увеличенное изображение части модели, ограниченной черным квадратом на рисунке «а»; в, г – относительные изменения толщины деятельного слоя с 2000-х по 2090-е годы в соответствии с климатическими сценариями СССма и ЕСНАМ соответственно. Для удобства интерпретации все это приведено на фоне оттененного рельефа. Акватории, в том числе подо льдом, или территории вне парка везде показаны черным цветом

няя толщина слоя сезонного протаивания/промерзания (рис. 6). Полученные результаты показали, что его средняя толщина неуклонно становилась больше с повышением летней температуры воздуха. На рисунке 6, а видно, что для прибрежного региона, где деятельный слой был тоньше из-за торфянистых и очень влажных грунтовых условий, тренд слегка отличался. Мощность активного слоя незначительно увеличивалась и с ростом среднегодовой инсоляции (см. рис. 6, б), но рассеяние точек здесь больше из-за влияния других факторов, особенно типа экосистемы и температуры воздуха. Толщина деятельного слоя уменьшалась с увеличением индекса листовой поверхности (LAI) из-за затенения поверхности грунта растениями (см. рис. 6, г).

Чтобы сравнить относительную важность входных переменных для смоделированного пространственного распределения толщины слоя сезонного протаивания/промерзания в парке, были рассчитаны средние абсолютные от-

клонения внутри каждого типа/кластера/класса (далее – класса) и между разными классами на основе входных переменных для типов экосистем, климатотопографических кластеров и классов индексов листовой поверхности (таблица 4). Среднее отклонение между классами является мерой различий между ними, в то время как среднее отклонение внутри каждого класса является мерой изменчивости внутри него.

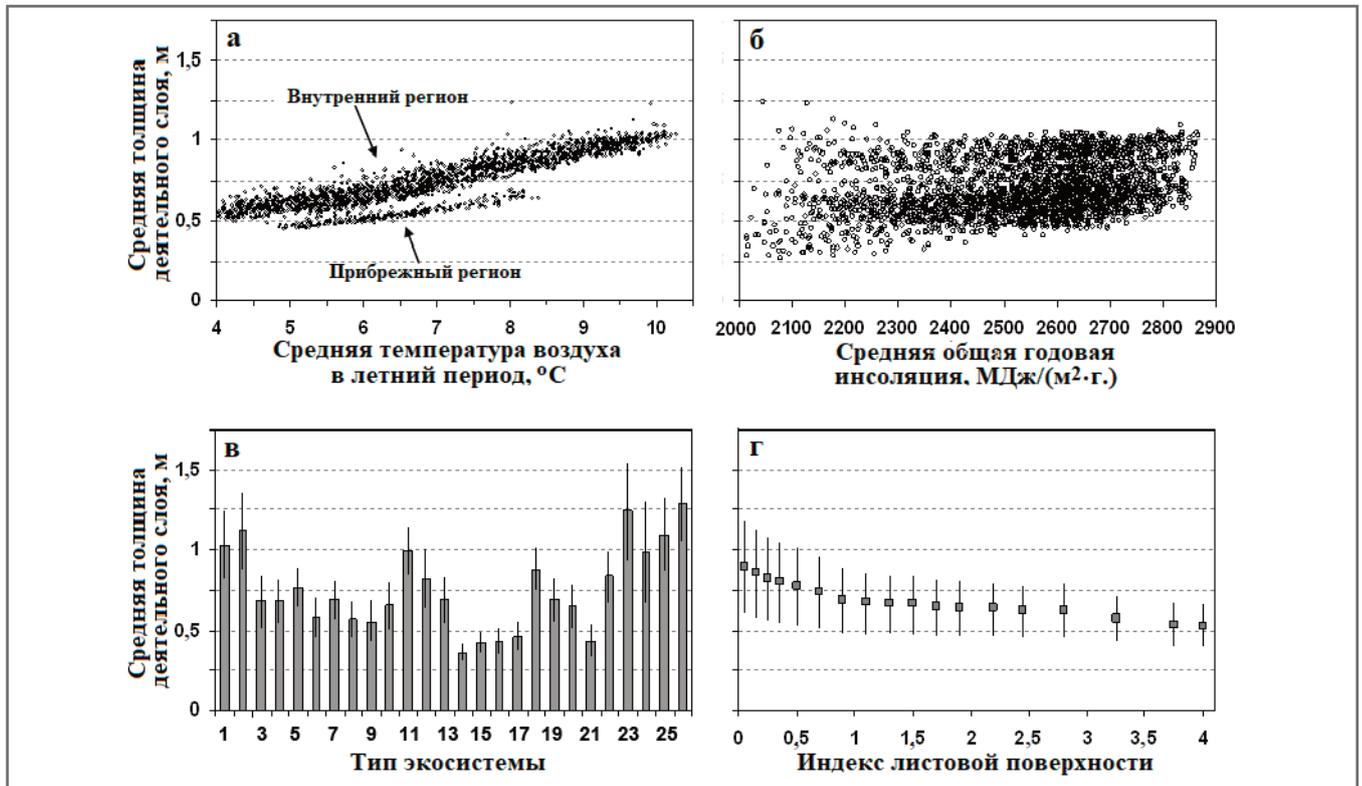
В тех случаях, когда средние значения не были статистически взвешены по площадям классов, отклонения между классами и соотношения между межклассовыми и внутриклассовыми отклонениями были самыми большими для типов экосистем, за ними следовали климатотопографические кластеры, а потом – классы индексов листовой поверхности (LAI). Этот результат указывает на то, что тип экосистемы был наиболее важным фактором, определяющим смоделированную толщину деятельного слоя в парке, а класс LAI был наименее важным.

В тех случаях, когда средние значения не были статистически взвешены по площадям классов, тип экосистемы тоже оставался наиболее важным фактором, определяющим пространственное распределение толщины активного слоя в парке. Важность классов LAI была близка к важности климатотопографических кластеров, поскольку вариации LAI были связаны с типом экосистемы и климатическими показателями.

Тип экосистемы был доминирующим главным образом потому, что соответствующие грунтовые условия являются наиболее важным фактором, определяющим толщину активного слоя в изучаемом регионе [35].

#### **ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ►**

Результаты моделирования показали, что средняя толщина слоя сезонного протаивания/промерзания в НПИ с 1970-х по 2000-е годы (2000–2009 гг.)



**Рис. 6.** Средняя толщина деятельного слоя грунта в 1970-х годах в климатотопографических кластерах парка с разными: а – средними летними (с июня по сентябрь) температурами воздуха; б – среднегодовой инсоляцией; в – типами экосистем в соответствии с таблицей 1 (показаны также средние абсолютные отклонения в пределах классов); г – индексами листовой поверхности (показаны также средние абсолютные отклонения в пределах классов)

**Таблица 4. Средние абсолютные межклассовые и внутриклассовые отклонения для толщины активного слоя на территории парка в 1970-х годах и соотношения между ними**

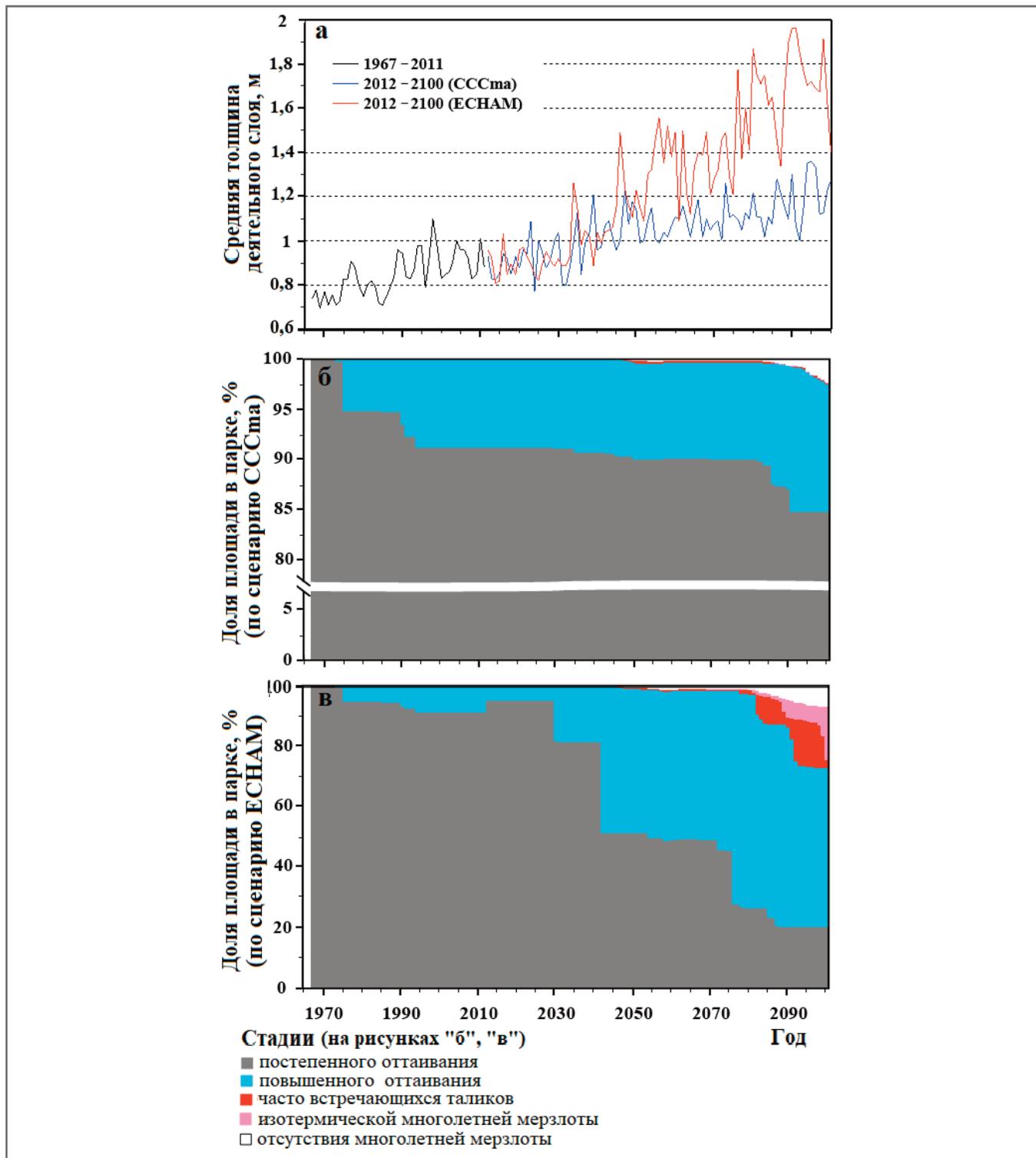
Показатели		Единицы измерения	Типы экосистем (26 шт.)	Климатотопографические кластеры (2540 шт.)	Классы индексов листовой поверхности (18 шт.)
Средние значения без учета занимаемых классами площадей	межклассовое отклонение	м	0,21	0,14	0,09
		%*	27,6	20,5	12,5
	внутриклассовое отклонение	м	0,15	0,16	0,19
		%	19,2	22,6	28,2
соотношение «межклассовое/внутриклассовое отклонение»		-	1,43	0,91	0,44
Средневзвешенные значения с учетом долей занимаемых классами площадей	межклассовое отклонение	м	0,28	0,23	0,24
		%	39,9	32,6	33,5
	внутриклассовое отклонение	м	0,13	0,18	0,20
		%	18,3	25,5	27,9
соотношение «межклассовое/внутриклассовое отклонение»		-	2,18	1,28	1,20

\* В процентах от средней толщины деятельного слоя для данного класса/типа/кластера.

выросла на 0,1 м (13%). Это увеличение было более значительным на возвышенностях в южной части парка. С 2000-х годов до конца XXI века смоделированная средняя толщина активного слоя

выросла на 0,3 м (34%) и на 0,9 м (99%) в соответствии со сценариями изменений климата СССта и ЕСНАМ соответственно (рис. 7, а), то есть разница между этими двумя сценариями оказа-

лась существенной. Согласно СССта относительные изменения толщины деятельного слоя в основном составляли от 20 до 40% по всему парку. Однако по сценарию ЕСНАМ они были больше



**Рис. 7.** Изменения средней толщины слоя сезонного протаивания/промерзания (а) и изменения долей площади парка (%), находящихся на разных стадиях деградации многолетней мерзлоты согласно сценариям изменений климата CCCma и ECHAM (б, в соответственно). Стадии деградации приведены на основе данных из работы [14]

и в более широком диапазоне (в основном от 70 до 150%) (см. рис. 5, г).

Имелись большие межгодовые различия из-за климатических флуктуаций, особенно при сценарии ECHAM (см. рис. 7, а).

С прогрессирующим увеличением глубины летнего протаивания глубокий слой, оттаявший летом, может не замёрзнуть следующей зимой и образо-

вать талик (круглогодично незамерзающий слой) между многолетней мерзлотой и слоем сезонного протаивания. В настоящее время многолетняя мерзлота подстилает почти все участки суши в парке и лишь очень небольшая доля площади содержит талики (в 2000-х годах общие площади участков с таликами и вообще без многолетней мерзлоты составляли в парке всего 0,0007 и

0,004% соответственно). По модельному прогнозу, с середины XXI века талики будут формироваться на большем количестве участков, а в некоторых южных районах парка многолетняя мерзлота вообще исчезнет. К концу XXI века по сценариям CCCma и ECHAM талики образуются на 0,1 и 13,7% площади парка соответственно, а многолетняя мерзлота исчезнет на 2,1 и 5,2% площа-

ди соответственно. Развитие таликов будет происходить в основном в южных районах парка (см. рис. 5 в, г). Талики могли бы формироваться в большинстве типов экосистем, за исключением склонов педиментов и заболоченных территорий, поросших злаками. Многолетняя мерзлота могла бы исчезнуть в лесах и в некоторых южных долинах – в основном в поймах и на неактивных аллювиальных террасах.

### СТАДИИ ДЕГРАДАЦИИ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ►

В работе [14] процесс деградации многолетней мерзлоты, вызванный потеплением климата, был подразделен на пять стадий: постепенного оттаивания, повышенного оттаивания, часто встречающихся таликов, изотермической ММ и отсутствия ММ. Авторы настоящей статьи определили эти стадии для каждой ячейки сетки территории НПИ, основываясь на результатах моделирования.

С 1967 по 2011 год 8,7% площади распространения многолетней мерзлоты в парке перешли из стадии постепенного оттаивания в стадию повышенного оттаивания с очень небольшой долей (<0,01%) площади, находящейся на стадии множественных таликов и отсутствия ММ (см. рис. 7, б). Согласно модельному прогнозу к концу XXI века все Большая доля территории будет находиться на более высоких стадиях деградации многолетней мерзлоты, хотя между результатами для двух рассматриваемых климатических сценариев имеются значительные различия.

Для сценария СССРа доля площади с постепенно оттаивающей ММ сократится к концу XXI века до 84,8%, в то время как доли территории парка на стадии повышенного оттаивания и без ММ увеличатся до 12,8 и 2,1% соответственно (см. рис. 7, б). В соответствии с тем же сценарием зоны с многолетней мерзлотой на стадии повышенного оттаивания и зоны без ММ в основном будут располагаться в некоторых долинах и на склонах, обращенных на юг.

По сценарию ЕСНАМ прогнозируется более значительная деградация ММ: к концу XXI века только 19,9% площади парка будут содержать постепенно оттаивающую многолетнюю мерзлоту. Доля площади парка с ММ на стадии повышенного оттаивания увеличится до 53,0%. Территории на других стадиях деградации также расширятся (см. рис. 7, в). Северная часть парка в основном будет находиться на стадии повышенного оттаивания, в то время южная часть – главным образом на

стадиях множественных таликов и изотермической многолетней мерзлоты, а некоторые зоны будут вообще свободны от ММ.

### СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ И ДРУГИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ►

На рисунке 8 показана корреляционная связь между смоделированной и измеренной глубиной летнего оттаивания на 100 участках. Они были сопоставимы для большинства участков, но для некоторых были большие различия, особенно для тех семи, данные по которым обведены на рисунке 8 круговой штриховой линией (где модельные данные значительно завышены по сравнению с измеренными). Эти семь участков находятся на горных склонах, где на поверхности земли и в грунте имеется много каменного материала. Наблюдаемые небольшие глубины летнего оттаивания на этих участках, вероятно, обусловлены локальными вариациями в грунтовых условиях или тем, что скальные породы ошибочно принимаются за мерзлый грунт. На некоторых горных склонах было обнаружено летнее протаивание глубиной более 1 м, однако при большинстве измерений мерзлый слой не был достигнут (поэтому такие данные не были отражены на рисунке 8). Модельные тесты тоже показали, что деятельный слой на горных склонах был толстым – из-за отсутствия органического слоя, высокого содержания крупнобломочного материала и редкой растительности [35]. Коэффициент корреляции  $R$  между смоделированной и наблюдаемой глубиной летнего протаивания оказался низким ( $R=0,56$  при количестве участков измерений  $N=93$ ) даже без учета данных для упомянутых выше семи участков с наибольшими различиями. Низкая корреляция в основном обусловлена вариациями грунтовых условий в пределах экосистемы того или иного типа. Поэтому для картирования многолетней мерзлоты с высоким разрешением необходимы более детальные в пространственном отношении карты грунтовых условий.

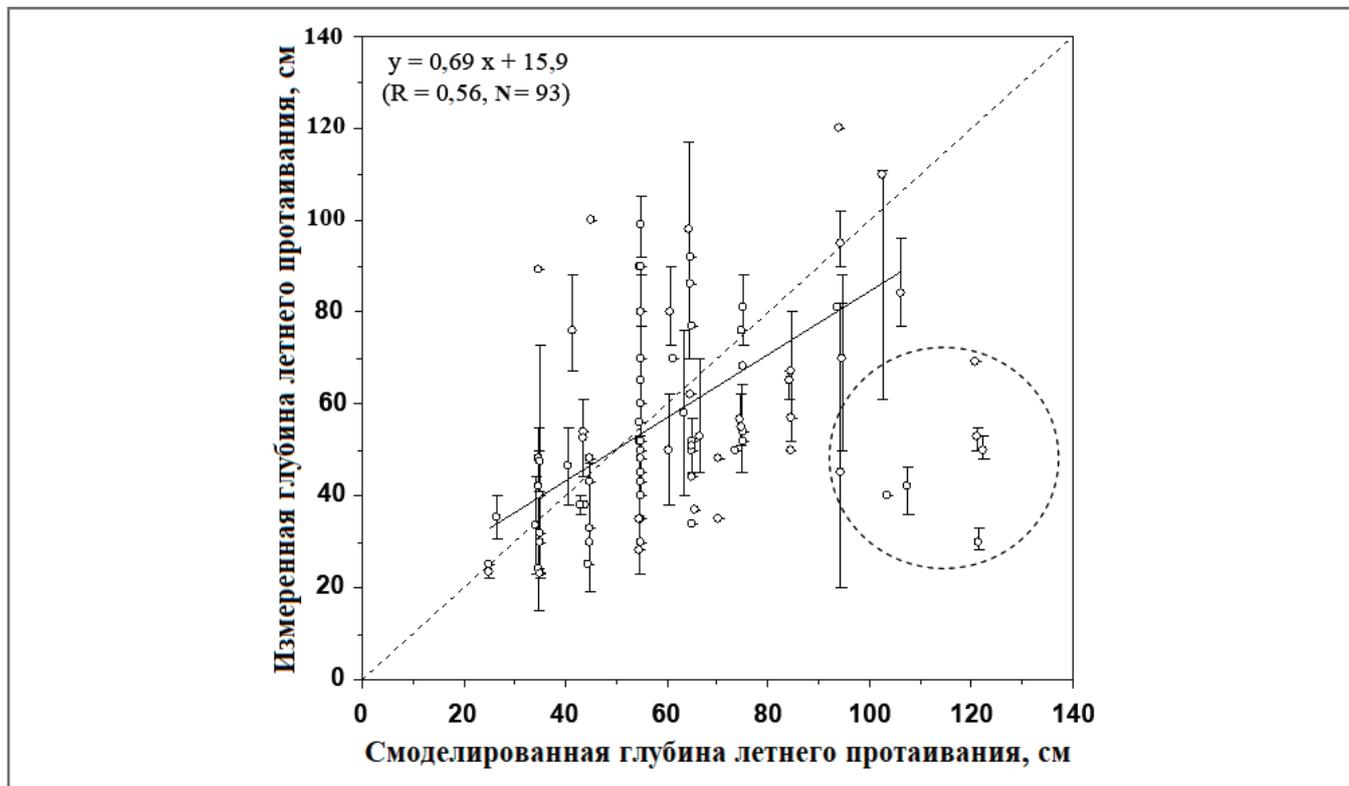
На основе полевых наблюдений автор работы [36] создал полигональную карту толщины деятельного слоя для территории НПИ. По этой карте медианная толщина слоя сезонного протаивания составляет 0,4 м (0,3–0,5 м) в большинстве северных прибрежных районов парка и 0,75 м (0,7–1,0 м) – в северных дельтах. Медианный деятельный слой вдоль крупных долин состав-

ляет 0,7 м (0,5–0,9 м), а во внутренних горных районах – 1,35 м (0,5–2,0 м). Эта пространственная картина и диапазон толщины деятельного слоя аналогичны результатам моделирования, выполненного авторами настоящей статьи, хотя на карте из работы [36] на территории парка было представлено только 15 полигонов. Смоделированная многолетняя мерзлота в этом регионе является сплошной, что согласуется с картой ММ Канады [16]. Смоделированная толщина ММ составила 150–300 м, что соответствует результатам наблюдений в этом регионе [37].

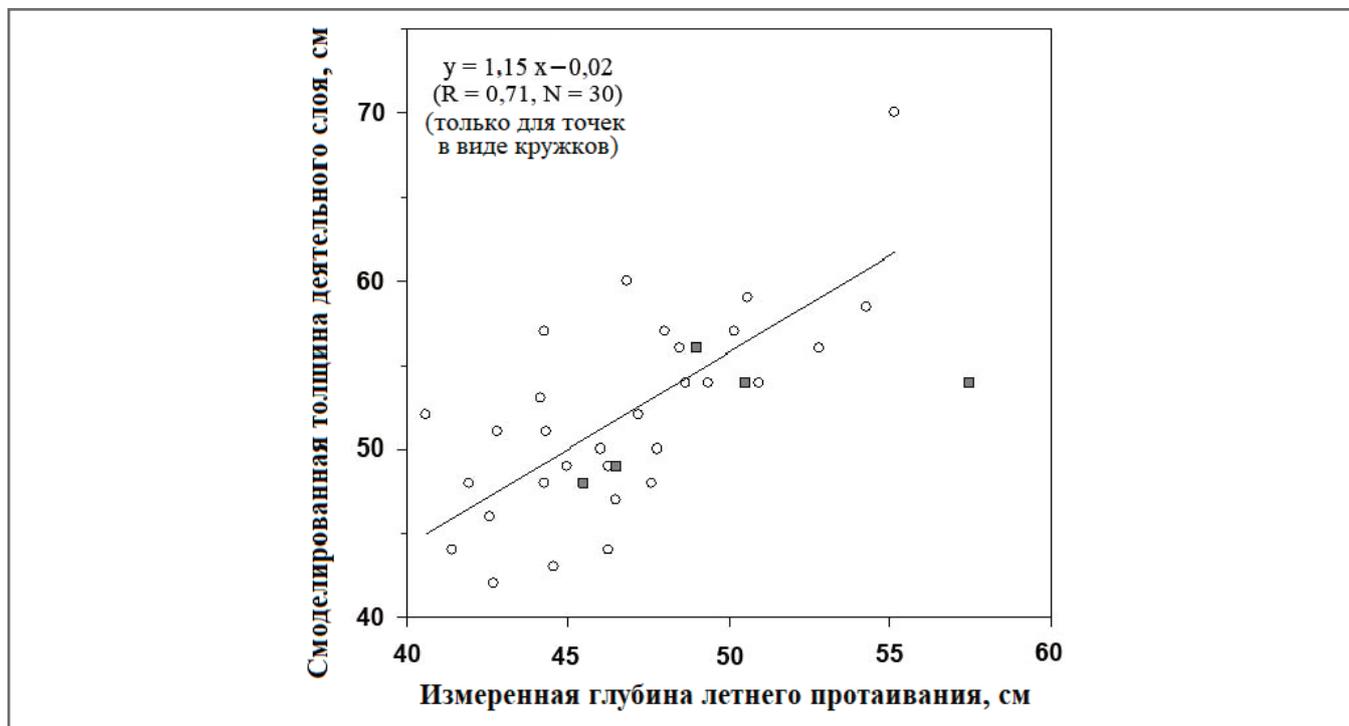
Авторы работы [38] сообщили об изменении толщины деятельного слоя и температуры грунта на острове Хершел недалеко от прибрежного региона. Откалибровав использованную ими модель с помощью детальных результатов полевых измерений, они подсчитали, что с начала XX века (1899–1905 гг.) по 2006 год среднегодовая температура грунта на глубине 1 и 20 м увеличилась на 2,6 и 1,9 °C соответственно, а изменение температуры грунта (хотя и менее чем на 0,1 °C) достигло примерно 120 м глубины.

Авторы настоящей статьи проверили смоделированные профили температуры грунта для схожих условий почвенно-растительного покрова (для осоковых кочкарников) в прибрежном регионе НПИ. С 1967 года (при условии равновесия) по 2006 год смоделированная температура грунта на глубине 1 и 20 м увеличилась на 3,4 и 2,5 °C соответственно. Эти значения получились больше, чем в работе [38], хотя рассматривалось более короткое время. Вероятно, это было связано с тем, что в климатических данных, выбранных для задания начальных условий модели, было меньше атмосферных осадков, а тренды к увеличению количества осадков и толщины снежного покрова за последние 45 лет не могли соответствовать тенденциям за весь XX век, поскольку в 1958–1967 годах было зафиксировано большее количество осадков (см. рис. 3, в). Результаты моделирования, выполненного авторами настоящей статьи, показали, что температура грунта на высотной отметке 120 м увеличилась на 0,04 °C, а это аналогично результату из статьи [38].

В работе [38] также представлены данные измерений глубины летнего протаивания грунта на острове Хершел в период с 2003 по 2007 год. Ее величина и межгодовые колебания оказались сопоставимыми с толщиной деятельного

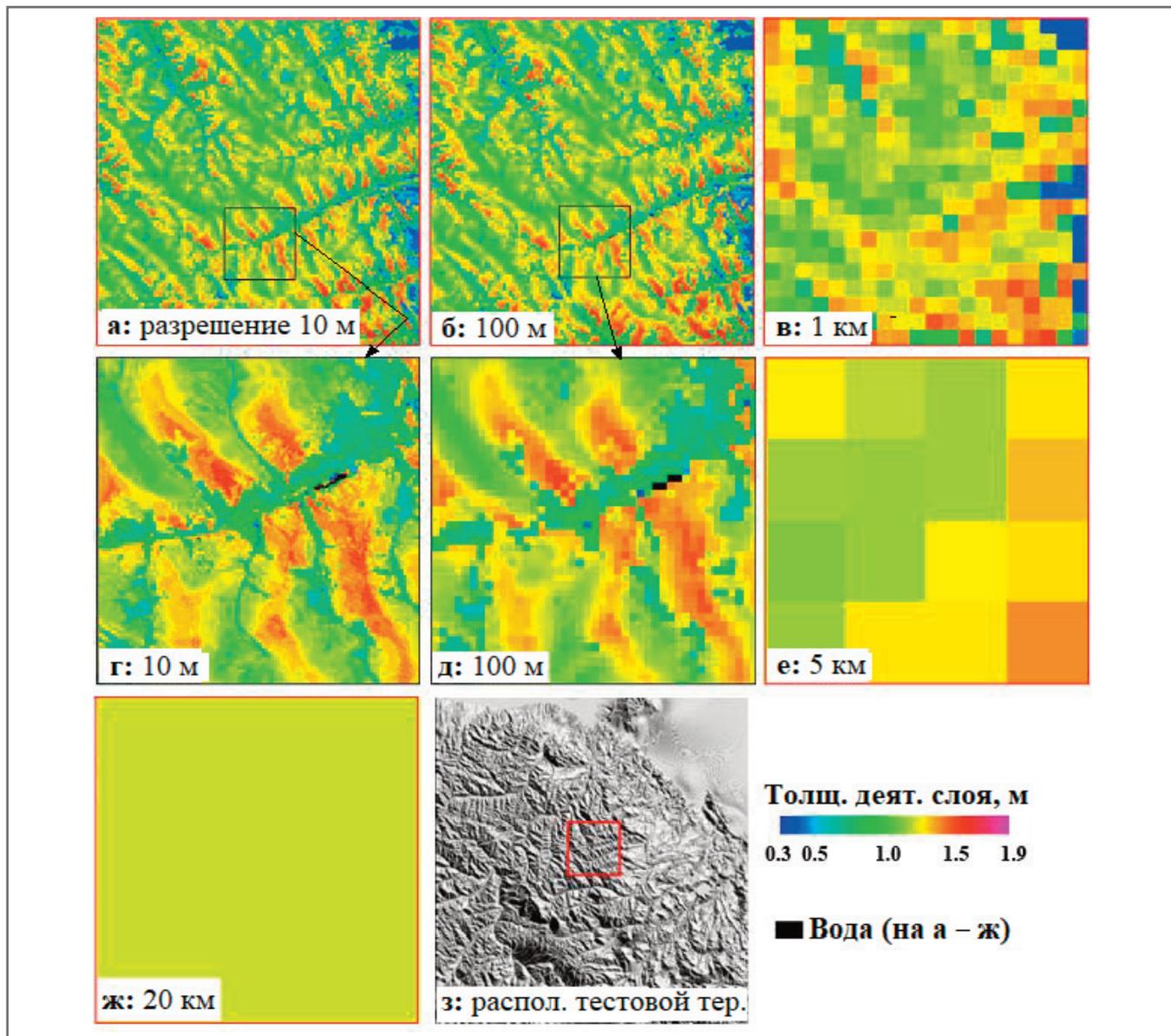


**Рис. 8.** Корреляционная связь между смоделированной и измеренной глубиной летнего протаивания. Модель значительно завысила данные по семи участкам (обведены штриховой окружностью), обладающим поросшей лишайниками скальной поверхностью и находящимся на горных склонах, – вероятно, из-за пространственной неоднородности грунтовых условий или ошибочного принятия скальных пород за мерзлый грунт. Сплошная прямая линия соответствует уравнению линейной регрессии, приведенному в левом верхнем углу. Штриховая прямая – это линия несуществующего соответствия 1:1 (для справки)



**Рис. 9.** Корреляционная связь между смоделированной толщиной деятельного слоя в прибрежной зоне НПИ и глубиной летнего протаивания грунта в районе станции «Иллисарвик» на острове Ричардс, измеренной в период 1983–2012 гг. (белые кружки) и на острове Хершел в 2003–2007 гг. (черные квадратик). Наблюдения в районе станции «Иллисарвик» на острове Ричардс в 1983–2008 годах проводились авторами работы [39], а неопубликованные данные измерений в 2009–2012 годах были любезно предоставлены Кристофером Берном (Christopher Burn). Наблюдения на острове Хершел выполнялись авторами статьи [39]. Смоделированная толщина активного слоя в 2012 году – это среднее модельное значение, рассчитанное на основе двух климатических сценариев для этого года

слоя, смоделированной авторами настоящей статьи, за исключением 2007 года, когда наблюдения показали значительное увеличение (эти результаты показаны точками в виде черных квадратиков на рисунке 9).



**Рис. 10.** Смоделированное пространственное распределение толщины деятельного слоя (ее средних значений за 2000-е годы) при различных пространственных разрешениях для тестовой территории размером 20 км на 20 км (а–ж). Расположение тестовой территории в парке показано красным квадратом (з). Чтобы показать разницу между изображениями «а» и «б», небольшая область, обведенная черные квадратами на рисунках «а» и «б», была увеличена и показана на рисунках «г» и «д».

В работе [39] приведены данные долговременных измерений глубины летнего протаивания с 1983 года в районе станции «Иллисарвик» на острове Ричардс (69,48° с.ш., 134,59° з.д.) (см. красную точку на рисунке 1, б). Эти наблюдения, вероятно, были самыми продолжительными из непрерывных измерений глубины летнего протаивания в этом регионе. И с ними тесно коррелирует ( $R=0,71$ ,  $N=30$ ) толщина деятельного слоя по данным моделирования, выполненного авторами настоящей статьи, хотя абсолютные значения несколько отличаются из-за различий в климатических и грунтовых условиях между местами наблюдений и прибрежным регионом НПИ (см. рис. 9). Смоделированный тренд увеличения мощ-

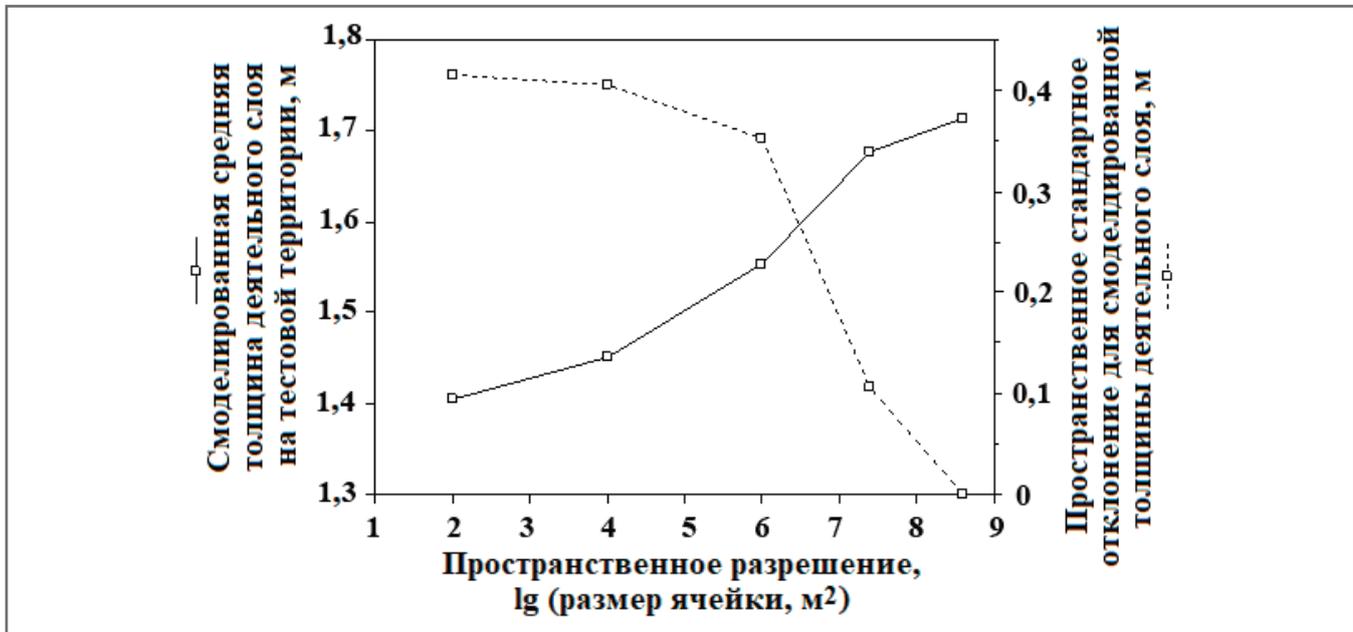
ности активного слоя составил 2,9 см за десятилетие с 1983 по 2012 год, что было похоже на тренд по результатам наблюдений, который показал увеличение на 2,3 см за десятилетие.

### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ▶

Авторами настоящей статьи была составлена карта распространения многолетней мерзлоты и изменений климата в арктическом регионе со сложным рельефом с пространственным разрешением 10 м на основе модели, основанной на процессах.

Стоит отметить несколько особенностей представленного исследования по сравнению с предыдущими. Здесь использовалось более высокое простран-

ственное разрешение, чем в ранее опубликованных работах по моделированию и картографированию, например с разрешением 30 м [12, 13], 2 км [11], в половину градуса по широте и долготе или даже с более грубым разрешением [7, 10]. Данные дистанционного зондирования Земли со спутников были использованы более эффективно. Результаты влияния топографии на инсоляцию были рассчитаны более точно. Размер каждого участка полевых наблюдений был сопоставим с размером ячейки сетки (поскольку большие однородные участки в регионах со сложным рельефом обычно найти трудно), поэтому данные наблюдений можно было непосредственно использовать для калибровки и валидации модели. Полученные результаты



**Рис. 11.** Влияние пространственного разрешения на толщину смоделированного деятельного слоя на тестовой территории размером 20 км на 20 км (см. рис. 10, з). Средние значения мощности активного слоя были рассчитаны для всех ячеек сетки в пределах этой территории за период 1967–2100 гг. Пространственные стандартные отклонения были вычислены на основе средних значений для этих ячеек за все эти годы (1967–2100), данные для будущих лет (2012–2100) были смоделированы на основе сценария изменений климата ЕСНАМ (при использовании сценария СССРта результаты получились очень похожими)

выявили больше пространственных деталей и, следовательно, больше подошли для планирования освоения земель, экологического мониторинга и оценок.

Для проверки влияния пространственного разрешения на моделируемые условия многолетней мерзлоты была выбрана территория размером 20 км на 20 км (сопоставимая по площади с размером ячеек сетки в полуградуса по широте и долготе, который в рассматриваемом регионе составляет около 20 км на 55 км) и было выполнено моделирование с разрешением 100 м, 1 км, 5 км и 20 км на основе доминирующего типа почвенно-растительного покрова в каждой ячейке сетки. Более грубое разрешение не только выявило меньше пространственных деталей (рис. 10), но и дало результаты со смещением характеристик ММ в сторону показателей, свойственных доминирующему типу почвенно-растительного покрова. На указанной тестовой территории доминирующим типом экосистемы является каменистая поверхность, покрытая лишайниками, где слой сезонного протаивания более мощный, чем в большинстве других типов. С увеличением размера ячеек сетки смоделированная средняя толщина деятельного слоя на этой территории увеличилась на 22%, а пространственные вариации между ячейками сетки уменьшились с 0,4 до 0 м при ухудшении разрешения с 10 м до 20 км (рис. 11). Временные закономерности смоделированной

средней мощности активного слоя для данной территории при различных пространственных разрешениях были схожи (коэффициенты корреляции  $R$  варьировали в пределах 0,97–1,00 при количестве данных  $N=134$ ).

Во-вторых, хотя при некоторых исследованиях была закартирована многолетняя мерзлота в горных регионах с высоким пространственным разрешением и было рассмотрено влияние топографических особенностей на инсоляцию (например, [40]), их авторы принимали наличие равновесия между условиями ММ и климатом (см. обзор [4]). Наблюдения за температурой грунта и модельные исследования показали, что текущие и будущие условия ММ не находятся в равновесии с атмосферными климатическими условиями [6, 7]. Образование таликов и различные стадии деградации многолетней мерзлоты, смоделированные авторами настоящей статьи, представляют собой примеры неравновесной реакции ММ на изменения климата.

В-третьих, результаты моделирования показали изменения в распределении стадий деградации многолетней мерзлоты в XXI веке с потеплением климата, хотя ММ и сохранится в этом столетии на большей части территории НПИ. Указанные стадии, по сравнению с флуктуациями в толщине деятельного слоя, позволили четко классифицировать процессы деградации многолетней

мерзлоты в процессе изменений климата (см. рис. 7). Проверка чувствительности также показала, что от стадий деградации зависит влияние условий снежного покрова на мощность активного слоя. На стадии постепенного оттаивания ММ изменения в снежном покрове практически не влияют на толщину активного слоя. А когда ММ находится на стадии повышенного (усиленного) оттаивания или на стадии образования множественных таликов, уменьшение переноса снега ветром (то есть накопление более глубокого снежного покрова) приведет к увеличению глубины летнего протаивания грунта.

И наконец, при этом исследовании оценивались суточные вариации климатических параметров на основе данных со станций наблюдений и использовался метод кластеризации для учета распределения климатических особенностей и влияния топографии на инсоляцию. Полученные климатические оценки напрямую связаны с результатами станционных наблюдений, а кластерный подход значительно сократил время вычислений для пространственного моделирования с высоким разрешением. Такие методы могли бы быть полезны для получения других пространственных процессных моделей с высоким разрешением – на основе экологических и биогеохимических процессов.

Результаты представленного исследования также указывают на несколько

источников неопределенности или информационных пробелов при картировании многолетней мерзлоты. Одним из основных источников неопределенности является информация по грунтовым условиям. Хотя по спутниковым данным теперь можно получать карты с высоким пространственным разрешением для растительного покрова, карты грунтовых условий все еще имеют очень грубое разрешение, особенно для арктических регионов. Авторы настоящей статьи оценили грунтовые условия и условия естественной дренируемости изучаемой территории на основе типов экосистем. Однако эти условия могут быть очень разными в пределах одного и того же типа экосистемы. Поэтому полученные результаты могут отражать только условия ММ при типичных грунтовых условиях типов экосистем. Следовательно, важно улучшать информацию по грунтовым условиям и условиям дренируемости, причем не только для картирования многолетней мерзлоты, но и для решения других прикладных задач, таких как оценка экосистем и развитие инфраструктуры в условиях изменяющегося климата.

Еще одним важным источником неопределенности являются представления о будущем климате. Результаты выполненного исследования показали существенные различия в прогнозируемых условиях ММ для двух климатических сценариев. При более «теплом» сценарии (ЕСНАМ) прогнозируемые изменения в толщине деятельного слоя характеризовались не только в целом большим увеличением, но и более широким диапазоном флуктуаций, а территории с таликами или даже с исчезновением многолетней мерзлоты имели гораздо большую общую площадь, чем при более «холодном» сценарии (СССма). На точность модельных результатов также влияют сильная территориальная разбросанность и относительно короткие периоды сбора климатических данных в арктических регионах. Климатические параметры первого года, выбранного для задания начальных условий модели, могут повлиять на смоделированную толщину многолетней мерзлоты и долговременные тренды температурных режимов грунтов.

Хотя авторы учитывали перенос снега ветром и латеральные водные потоки, созданная модель NEST все же является одномерной при допущениях, что каждая ячейка сетки однородна, а боковым тепловым потоком можно пре-

небречь. Поэтому полученные результаты не отражают условия для территорий с сильными боковыми тепловыми потоками, таких как островерхие горные пики, гребни хребтов или районы, очень близкие к водным объектам.

Изменения климата и нарушения из-за пожаров оказывают значительное воздействие на состояние растительного покрова и индексы листовой поверхности (LAI), что повлияет на многолетнюю мерзлоту через перенос снега ветром и обмен энергией между поверхностью земли и атмосферой. Однако в представленном исследовании не учитывались изменения в LAI, вызванные нарушениями в росте растений или изменениями климата.

Тесты на чувствительность показали, что увеличение LAI без изменений в факторе переноса снега ветром приведет к уменьшению толщины деятельного слоя из-за эффектов затенения. Уменьшение горизонтального переноса снега с рассматриваемой территории или даже накопление на ней дополнительного количества снега, захваченного ветром на окружающих участках, вызовут там более быстрое таяние многолетней мерзлоты снизу. Такое влияние на толщину активного слоя грунта зависит от стадий деградации ММ. Поэтому изменения в растительном покрове и связанный с этим перенос снега ветром могут по-разному влиять на состояние ММ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Авторы представленного исследования провели картирование влияния изменений климата на многолетнюю мерзлоту в арктическом регионе со сложным рельефом с высоким пространственным разрешением с помощью модели, основанной на процессах. С использованием спутниковых данных были закартированы типы экосистем и индексы листовой поверхности. Состояние грунтов и поверхности земли оценивалось на основе типов экосистем и результатов полевых наблюдений. Инсоляция детально рассчитывалась на основе топографических атрибутов. Пространственное распределение среднемесячных климатических параметров интерполировалось на базе стационарных наблюдений и высотных отметок. Временные изменения климата оценивались с использованием выборки наблюдений на станциях. Время вычислений было значительно сокращено за счет группирования распределения климатических параметров и влияния топографических особенностей на инсо-

ляцию по отдельным типам/классам/классам.

Результаты моделирования с высоким разрешением показали как крупномасштабные изменения по всему канадскому национальному парку «Иввавик», так и изменения в пределах того или иного ландшафта, обусловленные топографией, экосистемами и характеристиками растительного покрова.

Такие результаты с высоким разрешением более полезны для планирования освоения земель и оценок экосистем, чем ранее полученные карты многолетней мерзлоты с грубым разрешением, которые не только показывают меньше пространственных деталей и вариаций, но и имеют смещения в сторону характеристик ММ, свойственных доминирующим типам почвенно-растительного покрова. Закартированные толщина деятельного слоя грунта и распределение многолетней мерзлоты были в целом сопоставимы с данными полевых наблюдений и других исследований.

Полученные результаты показали увеличение толщины активного слоя и прогрессирующую деградацию ММ при сохранении многолетней мерзлоты на большей части территории парка в течение всего XXI века.

Выполненное исследование также показало, что грунтовые условия и сценарии изменений климата являются основными источниками неопределенности при составлении карт ММ с высоким разрешением.

## ПРИЛОЖЕНИЕ ►

### РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ НА ИНСОЛЯЦИЮ ►

Рельеф влияет на инсоляцию поверхности земли в зависимости от крутизны склона, локальных топографических особенностей и затеняющего воздействия окружающих гор и холмов. Эффекты затенения рассчитывались на основе зон видимости [26]. Зона видимости для ячейки сетки – это угловое распределение видимости небом, частично загороженного окружающими горами и холмами, аналогичное изображениям на полусферических фотографиях, снятых с помощью объектива типа «рыбий глаз», направленного в небо из центра ячейки сетки. Максимальный угол закрывающего небом препятствия в направлении азимута может быть определен на основе рас-

стояния и высотных отметок ячеек в этом направлении.

Зона видимости влияет на эффекты как прямой, так и рассеянной солнечной радиации. Интенсивность рассеянной радиации, полученной ячейкой сетки ( $R_{diff}$ ), может быть рассчитана по следующей формуле:

$$R_{diff} = R_{diff0} \cdot F_{diff, topo}, \quad (4)$$

где  $R_{diff0}$  – рассеянная солнечная радиация, полученная поверхностью без загораживающих препятствий вокруг ( $Вт/м^2$ );  $F_{diff, topo}$  – относительная рассеянная радиация, полученная ячейкой сетки, по сравнению с ячейкой без окружающих препятствий (отношение).

Если принять, что рассеянная солнечная радиация поступает только с неба и что ее распределение является изотропным по всей полусфере [41], а также если пренебречь эффектами крутизны и экспозиции склона, то  $F_{diff, topo}$  можно оценить так:

$$F_{diff, topo} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot d\beta \cdot d\alpha, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – азимут (азимутальный угол);  $\beta$  – угол возвышения (относительно горизонтальной поверхности);  $v(\alpha)$  – максимальный угол возвышения, закрываемого окружающими горами и холмами в направлении  $\alpha$ .

Прямая солнечная радиация, получаемая ячейкой сетки за раз, может быть рассчитана по формуле:

$$R_{dir} = \begin{cases} R_{dir0} \cdot [\cos \theta \cdot \cos G_s + \sin \theta \cdot \sin G_s \cdot \cos(\alpha - G_a)] / \cos \theta & [\theta < 0,5\pi - v(\alpha)] \\ 0 & [\theta \geq 0,5\pi - v(\alpha)] \end{cases}, \quad (6)$$

где  $\alpha, \theta$  – азимутальный и зенитный углы солнца в данный момент времени, (они могут быть определены на основе широты, дня года и времени суток);  $G_s, G_a$  – крутизна и экспозиция поверхности ячейки сетки;  $R_{dir0}$  – прямая солнечная радиация, полученная поверхностью без загораживающих препятствий вокруг ( $Вт/м^2$ ).

Относительное воздействие особенностей рельефа на получаемую прямую солнечную радиацию ( $F_{dir, topo}$ ) можно выразить так:

$$F_{dir, topo} = \begin{cases} [\cos \theta \cdot \cos G_s + \sin \theta \cdot \sin G_s \cdot \cos(\alpha - G_a)] / \cos \theta & [\theta < 0,5\pi - v(\alpha)] \\ 0 & [\theta \geq 0,5\pi - v(\alpha)] \end{cases}. \quad (7)$$

Общая инсоляция ячейки сетки в любое время суток, представляет собой сумму прямой и рассеянной радиации, попавшей на эту ячейку.

Для пользователей сложно и обычно не нужно предоставлять почасовые климатические данные для долгосрочного

моделирования многолетней мерзлоты, хотя они необходимы для расчета энергетического баланса. Поэтому авторы настоящей статьи оценили внутрисуточные вариации как прямой, так и рассеянной солнечной радиации для каждой даты, используя функции косинуса на основе работы [42]:

$$R_{dir0} = R_{day0} (1 - F_{diff0, day}) \cdot F_{1, \theta_n} \cdot F_{dir, topo} \cdot \cos \left( \frac{\theta - \theta_n}{\pi/2 - \theta_n} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \frac{\cos \theta}{\cos \theta_n}; \quad (8)$$

$$R_{diff0} = R_{day0} \cdot F_{diff0, day} \cdot F_{2, \theta_n} \cdot F_{diff, topo} \cdot \cos \left( \frac{\theta - \theta_n}{\pi/2 - \theta_n} \cdot \frac{\pi}{2} \right); \quad (9)$$

где  $\theta_n$  – зенитный угол солнца в полдень (рад) в рассматриваемый день,  $F_{1, \theta_n}$  – отношение прямой солнечной радиации в полдень к среднесуточной прямой солнечной радиации, попавшей на горизонтальную поверхность;  $F_{2, \theta_n}$  – отношение рассеянной солнечной радиации в полдень к среднесуточной рассеянной солнечной радиации, попавшей на горизонтальную поверхность;  $R_{day0}$  – среднесуточная инсоляция горизонтальной поверхности; ( $Вт/м^2$ );  $F_{diff0, day}$  – доля суточной рассеянной солнечной радиации в общей суточной радиации, попавшей на горизонтальную поверхность (общей инсоляции).

$R_{day0}$  можно рассчитать по формуле:

$$R_{day0} = 10^6 R'_{day0} / D, \quad (10)$$

где  $R'_{day0}$  – суммарная суточная инсоляция горизонтальной поверхности ( $МДж/(м^2 \cdot сут)$ ), которая относится к входным данными для модели;  $D$  – длительность светового дня (с), определяемая на основе широты и дня года.

Авторы работы [42] разработали регрессионные зависимости для определения  $F_{1, \theta_n}$  и  $F_{2, \theta_n}$  на основе  $\theta_n$  для той или иной локации. Численное моделирование, выполненное авторами настоящей статьи, показало, что эти зависимости меняются с широтой, особенно когда продолжительность светового дня достигает 24 ч. Поэтому  $F_{1, \theta_n}$  и  $F_{2, \theta_n}$  были численно определены для каждого дня года на основе исходных уравнений из работы [42]:

$$F_{1, \theta_n} = D \int_0^D \cos \left( \frac{\theta - \theta_n}{\pi/2 - \theta_n} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \frac{\cos \theta}{\cos \theta_n} dt \Bigg|^{-1}; \quad (11)$$

$$F_{2, \theta_n} = D \int_0^D \cos \left( \frac{\theta - \theta_n}{\pi/2 - \theta_n} \cdot \frac{\pi}{2} \right) dt \Bigg|^{-1}, \quad (12)$$

где  $t$  – время (с).

Суточная доля рассеянной солнечной радиации в общей суточной инсоляции горизонтальной поверхности ( $F_{diff0, day}$ ) может быть оценена с помощью логистической функции по работе [43]. Авторы настоящей статьи немного модифицировали параметры, основываясь на данных по суточной инсоляции, полученных на станции «Инувик» ( $133,52$  Вт,  $68,32^\circ$  с.ш.):

$$F_{diff0, day} = \begin{cases} 1,05 / [1 + \exp(-4,5 + 8,6 F_0)] & (F_0 > 0,175) \\ 1,0 & (F_0 \leq 0,175) \end{cases}, \quad (13)$$

$(R^2 = 0,715; N = 13\ 209),$

где  $F_0$  – отношение суточной инсоляции горизонтальной поверхности, к суточной инсоляции верхней границы атмосферы;  $R^2$  – коэффициент детерминации (квадрат коэффициента корреляции);  $N$  – количество валидных суточных данных станции «Инувик» за период 1959–2005 гг., опубликованных Министерством окружающей среды Канады и Национальным исследовательским советом Канады [44].

Суточную инсоляцию верхней границы атмосферы ( $R_{0, atm}$ ,  $МДж/(м^2 \cdot сут)$ ) можно рассчитать по следующей формуле [45]:

$$R_{0, atm} = 10^{-6} S_c \int_0^D \cos \theta dt, \quad (14)$$

где  $S_c$  – солнечная постоянная ( $Вт/м^2$ ).

Дополнительный материал по исходной программе (на языке C++), использованной для реализации этих алгоритмов, доступен онлайн (по адресу: <http://www.thecryosphere.net/7/1121/2013/tc-7-1121-2013-supplement.pdf>). **и**

*Авторы хотели бы поблагодарить Ин Чжана (Ying Zhang) и Сергея Самсонова (Sergey Samsonov) за критический анализ статьи. Также выражается благодарность Кристоферу Берну (Christopher Burn) за его замечания и полевые данные для валидации результатов. Для улучшения качества статьи также были очень полезны замечания двух анонимных рецензентов. Представленное в статье исследование было поддержано Канадским космическим агентством в рамках проекта Park-SPACE GRIP и Министерством природных ресурсов Канады в рамках Программы дистанционного зондирования (вклада сектора наук о Земле № 20120211). Редактировал статью (исходную статью на английском языке. – Ред.) Т. Чжан.*

**ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►**

**(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►**

Zhang Yu., Wang X., Fraser R., Olthof I., Chen W., McLennan D., Ponomarenko S., Wu W. Modelling and mapping climate change impacts on permafrost at high spatial resolution for a region with complex terrain // *The Cryosphere*. 2013. Vol. 7. P. 1121–1137. DOI:10.5194/tc-7-1121-2013.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРОМ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►**

**(REFERENCES USED BY THE AUTHOR OF THE TRANSLATED PAPER) ►**

1. ACIA. Impact of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, 2005. 1042 p.
2. Vitt D.H., Halsey L.A., Zoltai S.C. The changing landscape of Canada's western boreal forest: the current dynamics of permafrost // *Can. J. Forest Res.* 2000. Vol. 30. P. 283–287.
3. Smith S.L., Romanovsky V.E., Lewkowicz A.G., Burn C.R., Allard M., Clow G.D., Yoshikawa K., Throop J. Thermal state of permafrost in North America: a contribution to the International Polar Year // *Permafrost Periglac.* 2010. Vol. 21. P. 117–135. DOI:10.1002/ppp.690,
4. Riseborough D., Shiklomanov N., Etzelmuller B., Gruber S., Marchenko S. Recent advances in permafrost modelling // *Permafrost Periglac.* 2008. Vol. 19. P. 137–156. DOI:10.1002/ppp.615.
5. Shiklomanov N.I., Anisimov O.A., Zhang T., Marchenko S., Nelson F.E., Oelke C. Comparison of model produced active layer fields: results for northern Alaska // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. Paper F02S10. DOI:10.1029/2006JF000571.
6. Osterkamp T.E. The recent warming of permafrost in Alaska // *Global Planet. Change.* 2005. Vol. 49. P. 187–202. DOI:10.1016/j.gloplacha.2005.09.001.
7. Zhang Y., Chen W., Riseborough D.W. Disequilibrium response of permafrost thaw to climate warming in Canada over 1850–2100 // *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. Paper L02502. DOI:10.1029/2007GL032117.
8. Anisimov O., Reneva S. Permafrost and changing climate: the Russian perspective // *Ambio*. 2006. Vol. 35. P. 169–175.
9. Marchenko S., Romanovsky V., Tipenko G. Numerical modeling of spatial permafrost dynamics in Alaska // *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost* (edited by Kane D. L., Hinkel K.M.). US: Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008. P. 190–204.
10. Zhang Y., Chen W., Riseborough D.W. Temporal and spatial changes of permafrost in Canada since the end of the Little Ice Age // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. Paper D22103. DOI:10.1029/2006JD007284.
11. Jafarov E.E., Marchenko S.S., Romanovsky V.E. Numerical modeling of permafrost dynamics in Alaska using a high spatial resolution dataset // *The Cryosphere*. 2012. Vol. 6. P. 613–624. DOI:10.5194/tc-6-613-2012.
12. Duchesne C., Wright J.F., Ednie M. High-resolution numerical modeling of climate change impacts on permafrost in the vicinities of Inuvik, Norman Wells, and Fort Simpson, NT, Canada // *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost* (edited by Kane D.L., Hinkel K.M.). US: Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008. P. 385–390.
13. Zhang Y., Li J., Wang X., Chen W., Sladen W., Dyke L., Dredge L., Poitevin J., McLennan D., Stewart H., Kowalchuk S., Wu W., Kershaw G.P., Brook R.K. Modelling and mapping permafrost at high spatial resolution in Wapusk National Park, Hudson Bay Lowlands // *Can. J. Earth Sci.* 2012. Vol. 49. P. 925–937. DOI:10.1139/E2012-031.
14. Zhang Y. Spatio-temporal features of permafrost thaw projected from long-term high-resolution modeling for a region in the Hudson Bay Lowlands in Canada // *J. Geophys. Res.-Earth*. 2013. Vol. 118. P. 1–11. DOI:10.1002/jgrf.20045.
15. Canadian Parks Service: Northern Yukon National Park Resource Description and Analysis: RM REPORT 93-01/INP. Natural Resources Conservation Section, Canadian Parks Service, Prairie and Northern Region. Winnipeg, 1993.
16. Heginbottom J.A., Dubreuil M.A., Harker P.A. Canada Permafrost // *National Atlas of Canada* (5th edn.). Ottawa, Canada: Natural Resources Canada, 1995.
17. Mackenzie W., MacHutchon A.G. Habitat Classification for the Firth River Valley, Ivvavik National Park, Yukon, Western Arctic District. Inuvik, Parks Canada, 1996. 81 p.
18. Zhang Y., Chen W., Cihlar J. A process-based model for quantifying the impact of climate change on permafrost thermal regimes // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108. Paper 4695. DOI:10.1029/2002JD003354.
19. Zhang Y., Chen W., Smith S.L., Riseborough D.W., Cihlar J. Soil temperature in Canada during the twentieth century: complex responses to atmospheric climate change // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. Paper D03112. DOI:10.1029/2004JD004910.
20. Zhang Y., Li C., Trettin C.C., Li H., Sun G. An integrated model of soil, hydrology and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems // *Global Biogeochem. Cy.* 2002. Vol. 16. Paper 1061. DOI:10.1029/2001GB001838.
21. Wang T., Hamann A., Spittlehouse D., Aitken S.N. Development of scale-free climate data for western Canada for use in resource management // *Int. J. Climatol.* 2006. Vol. 26. P. 383–397. DOI:10.1002/joc.1247.
22. McKenney D.W., Hutchinson M.F., Papadopol P., Lawrence K., Pedlar J., Campbell K., Milewska E.M., Hopkinson R.F., Price D., Owen T. Customized spatial climate models for North America // *B. Am. Meteorol. Soc.* 2011. Vol. 92. P. 1611–1622. DOI:10.1175/2011BAMS3132.1.

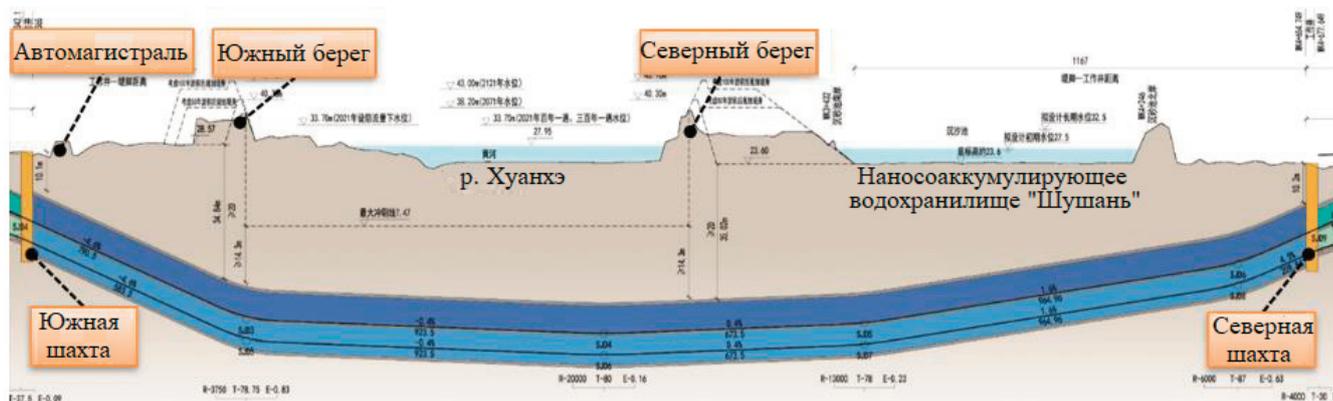
23. Fraser R., McLennan D., Ponomarenko S., Olthof I. Image-based predictive ecosystem mapping in Canadian Arctic Parks // *Int. J. Appl. Earth Obs.* 2012. Vol. 14. P. 129–138. DOI:10.1016/j.jag.2011.08.013.
24. Walsh J.E., Chapman W.L., Romanovsky V., Christensen J.H., Stendel M. Global climate model performance over Alaska and Greenland // *J. Climate.* 2008. Vol. 21. P. 6156–6174. DOI:10.1175/2008JCLI2163.1.
25. Lunardini V. *Heat Transfer in Cold Climates.* New York: Van Nostrand Reinhold, 1981. 731 p.
26. Fu P., Rich P.M. *The Solar Analyst 1.0 Manual.* USA: Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), 2000.
27. Hossain M.F., Zhang Y., Chen W., Wang J., Pavlic G. Soil organic carbon content in northern Canada: a database of field measurements and its analysis // *Can. J. Soil Sci.* 2007. Vol. 87. P. 259–268.
28. Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey: *The Canadian System of Soil Classification*, 2nd edn. Ottawa, Canada: Agriculture Canada, 1987. Publication 1646. 164 p.
29. Walmsley M., Utzig G., Vold T., Moon D., Van Barneveld J. (eds.). *Describing Ecosystems in the Field.* RAB Technical Paper 2. Victoria, BC Canada: Resource Analysis Branch, British Columbia Ministry of Environment and British Columbia Ministry of Forests, 1980. Rep. № 7.
30. Pollack H.N., Hurter S.J., Johnson J.R. Heat flow from the earth's interior: analysis of the global data set // *Rev. Geophys.* 1993. Vol. 31. P. 267–280.
31. Jessop A.M., Lewis T.J., Judge A.S., Taylor A.E., Drury M.J. Terrestrial heat flow in Canada // *Tectonophysics.* 1984. Vol. 103. P. 239–261.
32. Majorowicz J.A., Skinner W.R., Safanda J. Large ground warming in the Canadian Arctic inferred from inversions of temperature logs // *Earth Planet. Sc. Lett.* 2004. Vol. 221. P. 15–25.
33. Chen W., Zorn P., Chen Z., Latifovic R., Zhang Y., Li J., Quirouette J., Olthof I., Fraser R., McLennan D., Poitevin J., Stewart H.M., Sharma R. Propagation of errors associated with scaling foliage biomass from field measurements to remote sensing data over a Canada's northern national park // *Remote Sens. Environ.* 2013. Vol. 130. P. 205–218. DOI:10.1016/j.rse.2012.11.012.
34. Kattge K., Diaz S. Lavorel S., Prentice I.C., Leadley P., et al. TRY—a global database of plant traits // *Glob. Change Biol.* 2011. Vol. 17. P. 2905–2935. DOI:10.1111/j.1365-2486.2011.02451.x.
35. Wang X., Zhang Y., Fraser R., Chen W. Evaluating the major controls on permafrost distribution in Ivvavik National Park based on process-based modelling // *Proceeding of The 63rd Canadian Geotechnical Conference and the 6th Canadian Permafrost Conference (GEO2010).* Calgary, Canada, 2010. P. 1235–1241.
36. Tarnocai C. *Soil Landscapes of the Firth River Area, Northwest Territories – Yukon Territory.* Ottawa, Canada, Research Branch, Agriculture Canada, 1986. 1:1 million map.
37. Smith S.L., Burgess M.M. *A Digital Database of Permafrost Thickness in Canada.* Ottawa, Canada: Geological Survey of Canada, 2002. Open File № 4173. P. 38.
38. Burn C.R., Zhang Y. Permafrost and climate change at Herschel Island (Qikiqtaruk), Yukon Territory, Canada // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. Paper F02001. DOI:10.1029/2008JF001087.
39. Burn C.R., Kokelj S.V. The environment and permafrost of the Mackenzie Delta area // *Permafrost Periglac.* 2009. Vol. 20. P. 83–105. DOI:10.1002/ppp.655.
40. Bonnaventure P.P., Lewkowicz A.G., Kremer M., Sawada M.C. A permafrost probability model for the southern Yukon and northern British Columbia, Canada // *Permafrost Periglac.* 2012. Vol. 23. P. 52–68. DOI:10.1002/ppp.1733.
41. Goudriaan J. *Crop Micrometeorology: a Simulation Study* // *Simulation Monographs.* Wageningen, Netherlands: PUDOC, 1977. 236 p.
42. Wang S., Chen W., Cihlar J. New calculation methods of diurnal distribution of solar radiation and its interception by canopy over complex terrain // *Ecol. Model.* 2002. Vol. 155. P. 191–204.
43. Boland J., Ridley B., Brown B. Models of diffuse solar radiation // *Renew. Energy.* 2008. Vol. 33. P. 575–584.
44. Environment Canada and the National Research Council of Canada. *Canadian Energy and Engineering Data Sets (CWEEDS) and Canadian Weather for Energy Calculations (CWEC).* 2007. CD-ROM.
45. Ruth D.W., Chant R.E. The relationship of diffusive radiation to total radiation in Canada // *Sol. Energy.* 1976. Vol. 18. P. 153–154.



Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал  
**ГеоИнфо**

<https://t.me/geoinfonews>



## КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ТОННЕЛЯ СВЕРХБОЛЬШОГО ДИАМЕТРА, СООРУЖАЕМОГО ПОД РЕКОЙ ХУАНХЭ ЩИТОВЫМ СПОСОБОМ И ПОДВЕРЖЕННОГО ВЫСОКИМ ПЕРЕМЕННЫМ НАГРУЗКАМ

Принята к публикации 30.05.2025

Опубликована: 16.06.2025

### ЧЭНЬ ЦЗ.

Институт проектирования городских транспортных и подземных сооружений, компания «Шанхайский муниципальный инженерно-проектный институт», г. Шанхай, Китай 897229441@qq.com

### АННОТАЦИЯ

Представляем немного сокращенный адаптированный перевод статьи «Ключевые технологии повышения устойчивости тоннеля сверхбольшого диаметра, сооружаемого под рекой Хуанхэ щитовым способом и подверженного высоким переменным нагрузкам», автором которой является китайский геотехник Цзянь Чэнь (Chen, 2024). Она была опубликована в 2024 году в журнале *Earth and Environmental Science* («Науки о Земле и окружающей среде») издательством британской благотворительной научной организации IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшей фактически международной. Исходно это был доклад, сделанный на международной конференции «ГеоШанхай-2024» (GeoShanghai-2024) в секции «Тоннелестроение и подземное строительство». Эта статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Chen, 2024) приводится в конце.

На строительство и эксплуатацию подземных сооружений могут оказывать значительное влияние условия окружающей среды, резкие изменения которых могут приводить к повреждениям. В данной статье анализируются механические характеристики обделки тоннеля с внешним диаметром 16,8 м, сооружаемого щитовым способом под рекой Хуанхэ в городе Цзинань на дороге Цзинань – Хуанган, при учете проблемы больших переменных нагрузок на тоннель на этапе эксплуатации вследствие внутриусловной эрозии и накопления отложений на дне реки, крупномасштабного увеличения высоты береговых дамб и сезонных изменений уровня грунтовых вод. В связи с этим в статье рассматриваются рекомендованные ключевые технологии для повышения устойчивости конструкций этого сооружения. Результаты использования предложенных технологий могут помочь в строительстве не только указанного тоннеля сверхбольшого диаметра, но и других подобных сооружений по дном рек, озер и морей.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

автодорожный тоннель; щитовая проходка; перегрузка; переменные нагрузки; устойчивость тоннеля; контроль деформаций; сталефибробетонная обделка тоннеля; усиленные соединения; река Янцзы; город Цзинань.

### ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Чэнь Цз. Ключевые технологии повышения устойчивости тоннеля сверхбольшого диаметра, сооружаемого под рекой Хуанхэ щитовым способом и подверженного высоким переменным нагрузкам (пер. с англ.) // *Геоинфо*. 2025. Т. 7. № 1. С. 76–83. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-76-83.

# KEY TECHNOLOGIES FOR IMPROVING RESILIENCE OF SUPER-LARGE DIAMETER SHIELD TUNNEL AFFECTED BY LARGE VARIABLE LOADS UNDERNEATH THE YELLOW RIVER

Accepted for publication 30.05.2025

Published 16.06.2025

## CHEN J.

Urban Traffic and Underground Space Design Institute, Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai, China  
897229441@qq.com

## ABSTRACT

We present a slightly abridged and adapted translation of the paper “Key technologies for improving resilience of super-large diameter shield tunnel affected by large variable loads underneath the Yellow River” by Jiang Chen, Chinese geotechnician (Chen, 2024). It was published in 2024 in the journal “Earth and Environmental Science” by the publishing company of the British scientific society “Institute of Physics” (IOP) that is now virtually international. It is an open access paper under the CC BY 3.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Chen, 2024), which was used for the presented translation, is given in the end.

Environmental conditions may have a significant impact on the construction and operation of underground works, and sudden changes in environmental conditions may lead to underground engineering damage. Considering the Yellow River crossing tunnel on Huanggang Road in Jinan as an example, this paper analyzes the mechanical performance of the lining of the shield tunnel with an external diameter of 16.8 m, which faces the challenge of large variable loads in the operation stage, such as deep riverbed erosion and deposition, large-scale heightening of the river embankments, seasonal changes in the groundwater level, and key technologies for improving the resilience of tunnel structure are proposed accordingly. The results can not only assist in the construction of the super-large-diameter shield tunnel project in Jinan City but also provide some technical support for other shield tunnel projects crossing rivers, lakes, and seas.

## KEYWORDS:

road tunnel; shield tunnelling; overloading; variable loads; tunnel stability; tunnel lining; deformation control; steel-fiber-reinforced concrete; reinforced joints; Yellow River; Jinan City.

## FOR CITATION:

Chen J. Klyuchevye tekhnologii povysheniya ustoichivosti tonnelya sverkhbol'shogo diametra, sooruzhaemogo pod rekoj Khuankheh shchitovym sposobom i podverzhennogo vysokim peremennym nagruzkam [Key technologies for improving resilience of super-large diameter shield tunnel affected by large variable loads underneath the Yellow River] // *GeoInfo*. 2025. T. 7. № 1. S. 76–83. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-1-76-83 (in Rus.).

## ВВЕДЕНИЕ ►

Развитие экономики и общества Китая в последнее время, в дополнение к быстрой урбанизации, увеличило спрос на автодорожные тоннели под дном рек, озер и морей. Ключом к успеху крупномасштабного проекта с огромными инвестициями и высокими рисками является технология, выбранная на этапе проектирования. В настоящее время есть три основных способа сооружения тоннелей для преодоления водных прегра: траншейный (открытый); закрытый путем щитовой проходки; из погружных/опускных секций.

Широкое внедрение технологии щитовой проходки в создание автодорож-

ных и железнодорожных тоннелей в таких городах, как Шанхай, Гуанчжоу, Нанкин и Ухань, в том числе Шанхайского [1, 2], Уханьского [3] и Нанкин-ского [4] тоннелей через реку Янцзы, привело к накоплению богатого опыта проектирования и строительства [5–9]. Таким образом, метод щитовой проходки стал основным выбором для тоннелей под дном рек, озер и морей.

Строительство и эксплуатация подземных сооружений имеют ограничения, связанные с условиями окружающей среды, а внезапные изменения этих условий обычно приводят к повреждениям. Например, случайная перегрузка поверхности земли над лини-

ей метро в Шанхае вызвала чрезмерную деформацию обделки тоннеля (рис. 1), что привело к растрескиванию бетона, повреждениям и сломам болтов, расхождению стыков между секциями и проникновению воды [10]. Опасность также представляют другие строительные работы, производимые поблизости во время эксплуатации, из-за которых появляются риски, связанные с ухудшением структурных характеристик тоннелей [11–14]. Кроме того, для безопасной эксплуатации тоннелей, построенных щитовым способом, создают проблемы внутрирусовая эрозия и сезонные изменения уровня грунтовых вод (УГВ).

Наружный диаметр тоннеля, пересекающего реку Хуанхэ (одну из самых полноводных в Китае – *Red.*) в городе Цзинань на автодороге Цзинань – Хуанган составляет 16,8 м. Это самый большой диаметр по сравнению со всеми уже построенными и строящимися в Китае (да и во все мире. – *Red.*) автомобильными и железнодорожными тоннелями.

На этапе эксплуатации тоннелей приходится сталкиваться с такой проблемой, как большие переменные нагрузки, в том числе из-за глубокой внутрирусловой эрозии и отложения наносов на дне реки, крупномасштабного увеличения высоты береговых дамб и сезонных изменений УГВ. Проектирование устойчивости тоннеля, проходимого щитовым способом, требует учета сочетаний геологических и экологических условий вдоль его трассы – прогнозирования неблагоприятных воздействий со стороны внешних факторов и обеспечения определенных амортизирующих свойств для облегчения ремонта и поддержания рабочих характеристик сооружения в случае ухудшения его состояния [15].

В настоящей статье анализируются механические характеристики отделки указанного тоннеля сверхбольшого диа-



Рис. 1. Угрозы безопасности тоннеля метро в Шангае, вызванные случайной избыточной нагрузкой на поверхность от наземного транспорта

метра в городе Цзинань, создаваемого щитовым методом, и предлагаются ключевые технологии для повышения устойчивости и обеспечения безопасности его конструкций. Полученные при

данном исследовании результаты смогут помочь в строительстве не только таких сооружений, как это, но и других тоннелей, создаваемых щитовым способом для пересечения рек, озер и морей.



Рис. 2. Изображение трассы тоннеля через реку Хуанхэ в плане

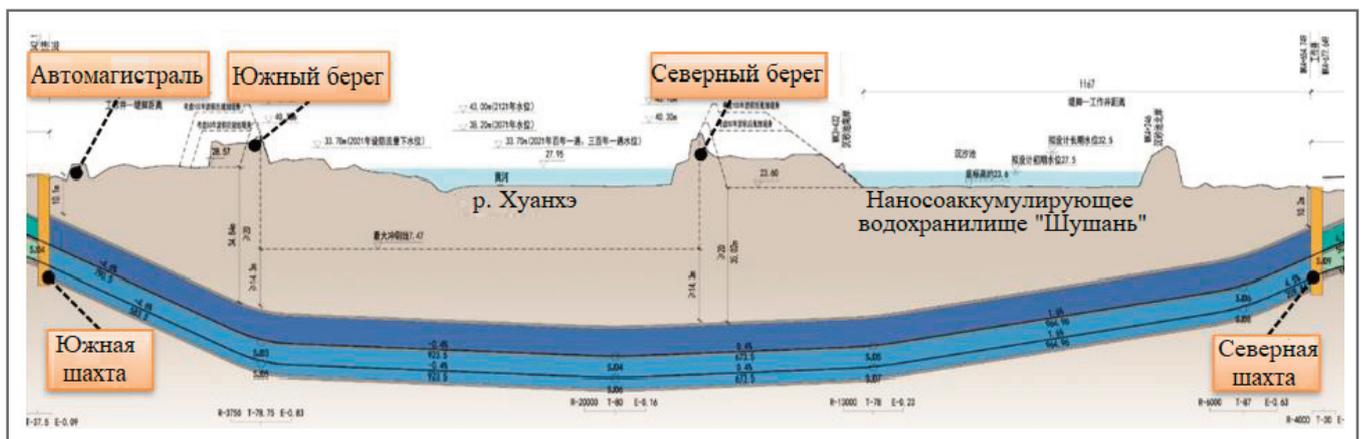


Рис. 3. Схематичный продольный разрез вдоль трассы тоннеля через реку Хуанхэ



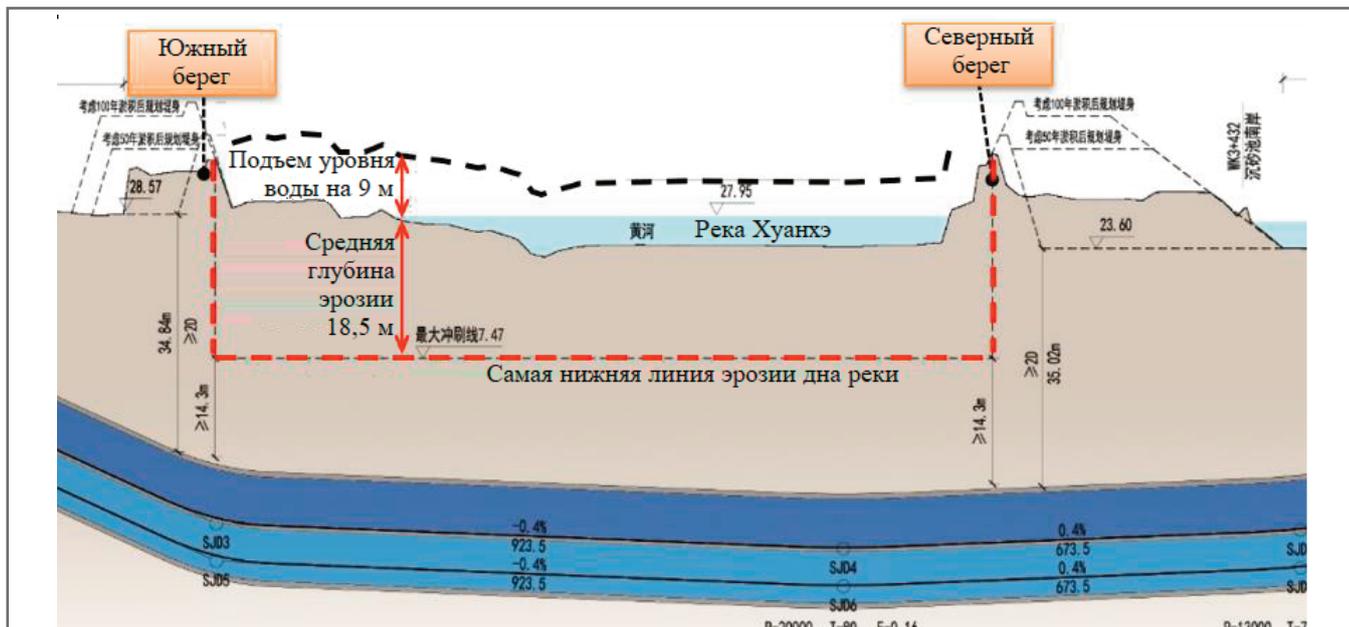


Рис. 7. Схематичный разрез, показывающий эрозию дна реки Хуанхэ и отложение на нем наносов за 100 лет

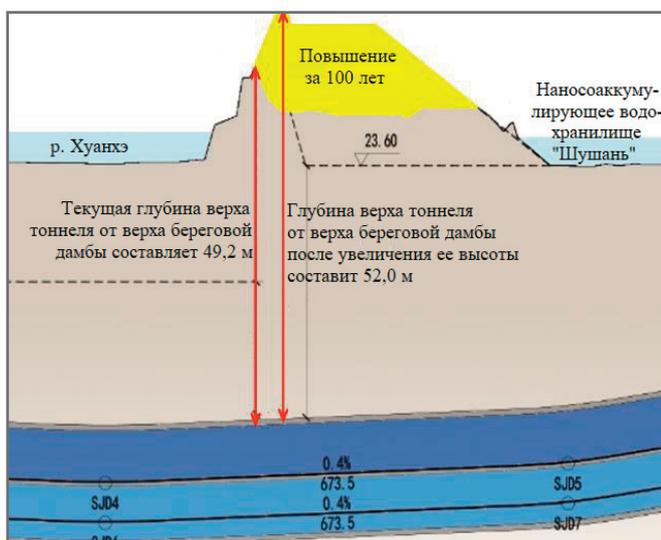


Рис. 8. Схематичный разрез, показывающий крупномасштабное увеличение высоты береговой дамбы



Рис. 9. Береговая дамба над трассой тоннеля

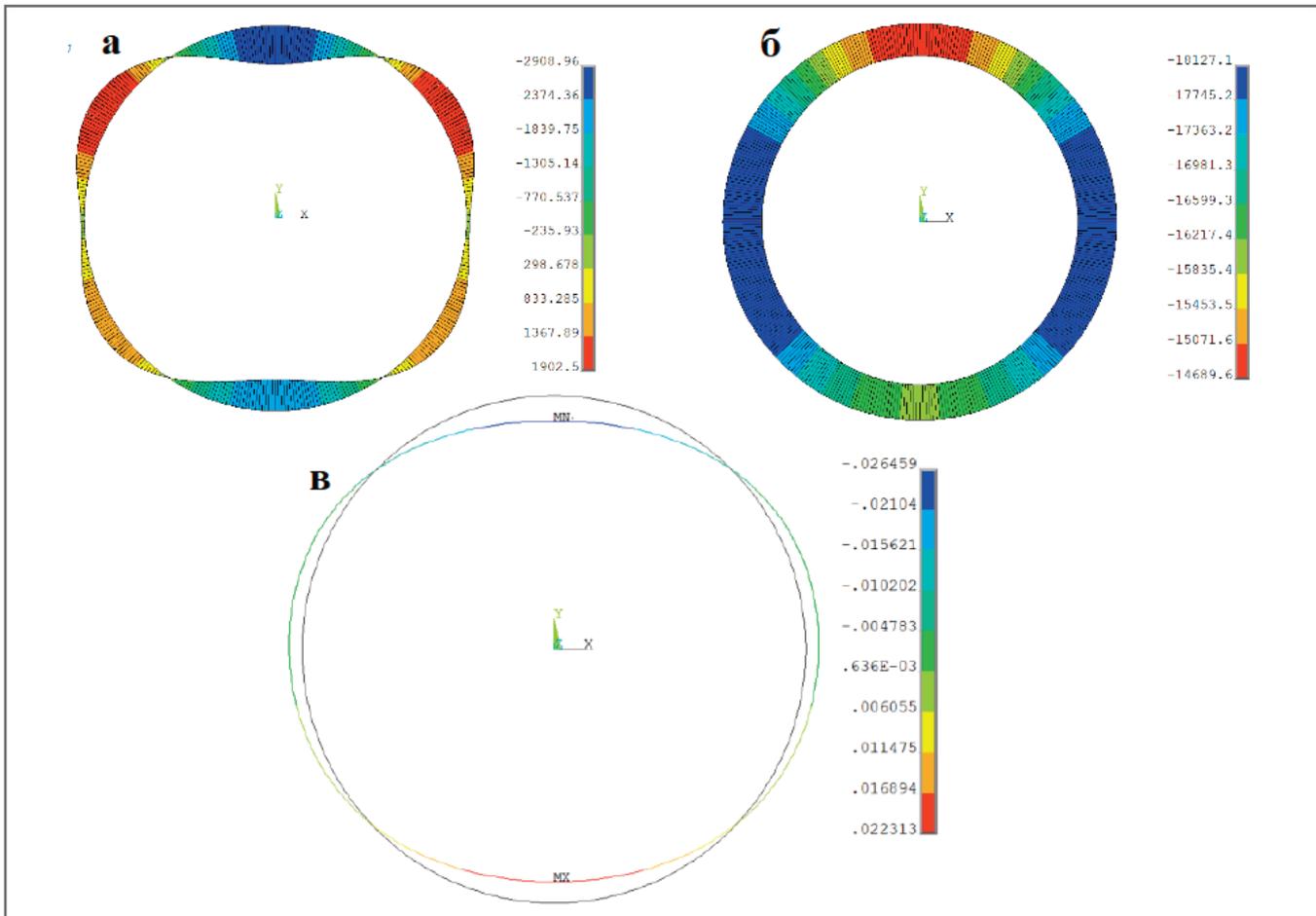
### ПРИЧИНЫ БОЛЬШИХ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК НА ТОННель

Река Хуанхэ, которую в Китае называют «рекой-матушкой», характеризуется большим количеством наносов, приносимых течением сверху, что приводит к постоянному повышению речного дна и к соответствующему повышению уровня воды ниже по течению, то есть это как бы сама себя поднимающая река. Поэтому проектирование строительства тоннеля через Хуанхэ на автодороге Цзинань – Хуанган с использованием ТПКМ сверхбольшого диаметра сталкивается с проблемой больших переменных нагрузок.

### ГЛУБОКАЯ ВНУТРИРУСЛОВАЯ ЭРОЗИЯ И ОТЛОЖЕНИЯ НА ДНЕ РЕКИ

Река Хуанхэ в среднем течении протекает через Лёссовое плато, где происходит сильная эрозия грунта. В нижнем течении сток реки меньше, при этом в ее водах содержится большое количество взвешенных наносов (из-за придаваемого ими цвета Хуанхэ и получила свое название, которое в переводе означает «Желтая река». – *Ред.*). Согласно отчету по оценке наводнений, водохранилище Сяоланди, введенное в эксплуатацию в 1997 году, сыграло значительную роль в регулировании количества воды и наносов, что стало приводить к более быстрому воздействию

внутрирусловой эрозии по сравнению со скоростью накопления осадков на дне ниже по течению. Однако, по мере того как способность водохранилища задерживать наносы уменьшалась и, соответственно, содержание взвешенных наносов в воде ниже по течению увеличивалось, русло снова стало подвергаться значительному отложению осадков. Прогнозируется, что средняя глубина эрозии дна на участке Айшань – Лицзинь, где проходит тоннель, за 100 лет составит 18,5 м, а дно реки поднимется примерно на 9 м (поскольку теперь процессы эрозии дна и отложения на нем наносов идут параллельно, но накопление осадков происходит быстрее. – *Ред.*). Проблемы глубокой внут-



**Рис. 10.** Анализ усилий и прогноз деформирования обделки участка тоннеля под северным берегом: а – изгибающие моменты; б – осевые (продольные) усилия; в – деформирование

рирусловой эрозии и отложения наносов для рассматриваемого проекта тоннеля проиллюстрированы на рисунке 7.

Эрозия дна реки и отложение на нем осадков (что эквивалентно разгрузке и пригрузке соответственно) приведут к изменению глубины залегания тоннеля. Дополнительная нагрузка вызовет тенденцию к опусканию тоннеля, а чрезмерная пригрузка может легко разрушить бетон по обе стороны арок сегментных колец. Разгрузка вызовет тенденцию к подъему тоннеля, а чрезмерная разгрузка может привести к растрескиванию или даже фрагментации обделки тоннеля из-за неизбежных смещений во время подъема сегментов. Теоретически воздействия разгрузки и пригрузки на тоннель могут компенсировать друг друга. Однако из-за непредсказуемости эрозии дна реки и отложения на нем осадков вызываемые ими нарушения станут серьезной угрозой для безопасности тоннеля.

#### **КРУПНОМАСШТАБНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ ВЫСОТЫ БЕРЕГОВЫХ ДАМБ**

На основе отчетов по оценке наводнений и разрешительных документов

соответствующих органов можно сделать прогноз, что из-за отложений в русле реки Хуанхэ уровень паводковых вод на участке Айшань – Лицзинь в 2121 году составит 43 м, что будет примерно на 9 м выше текущего уровня. Для обеспечения безопасности в отношении наводнений предстоит крупномасштабное увеличение высоты береговых дамб с обеих сторон реки, что будет представлять проблему для тоннеля под Хуанхэ на этапе эксплуатации. Максимальная высота над уровнем моря на южном берегу составляет примерно 10 м, на северном – около 12 м (рис. 8). Береговая дамба над трассой будущего тоннеля была впервые построена в 1890-х годах в виде каменной наброски без свайного фундамента (рис. 9). Поэтому неблагоприятное воздействие повышения нагрузки на обделку тоннеля при увеличении высоты дамб необходимо рассматривать без каких-либо скидок. Как показывает опыт, других случаев такого крупномасштабного увеличения высоты береговых дамб над действующими тоннелями, созданными щитовым способом, до сих пор не было.

#### **СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД**

УГВ вдоль трассы тоннеля все время меняется из-за обмена между грунтовыми водами и водами Хуанхэ. Различия между уровнями грунтовых вод в разные времена года (например, в сезон дождей и в период маловодья) могут существенно меняться. Изменения УГВ приводят к последующим изменениям во внутренних усилиях в обделке тоннеля и к ее деформированию. Если уровень грунтовых вод меняется слишком сильно, то, соответственно, увеличивается воздействие окружающего грунта на обделку тоннеля, что может в результате привести к возникновению трещин или неравномерным деформациям. Поэтому на этапе проектирования необходимо учитывать влияние изменений УГВ на обделку тоннеля со сроком службы 100 лет.

#### **КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ**

В целях решения проблем, связанных с большими переменными нагрузками, рассмотренными выше, было проведено несколько исследований ме-

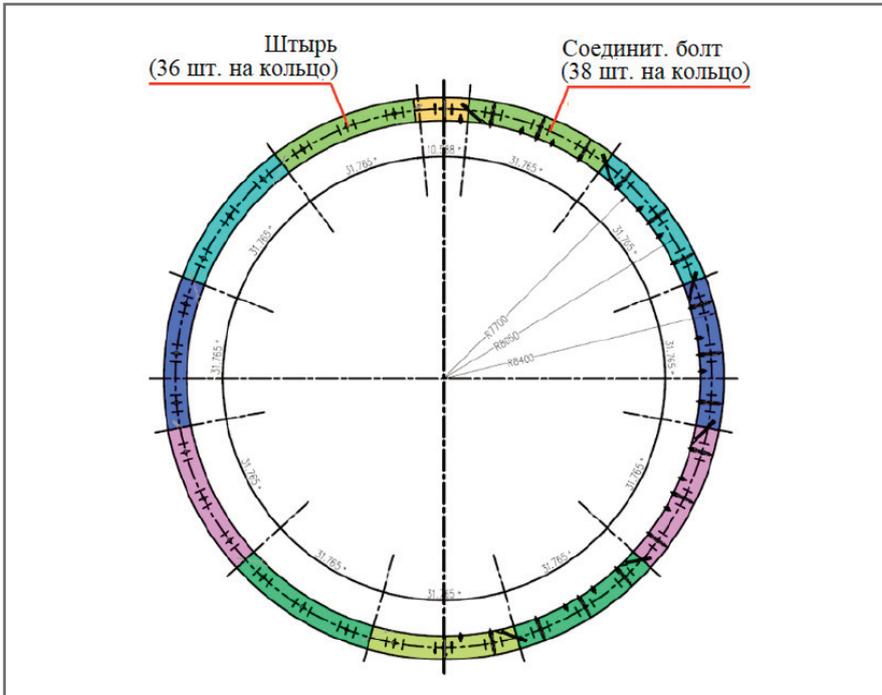


Рис. 11. Распределение штырей и болтов для соединения сегментных колец между собой

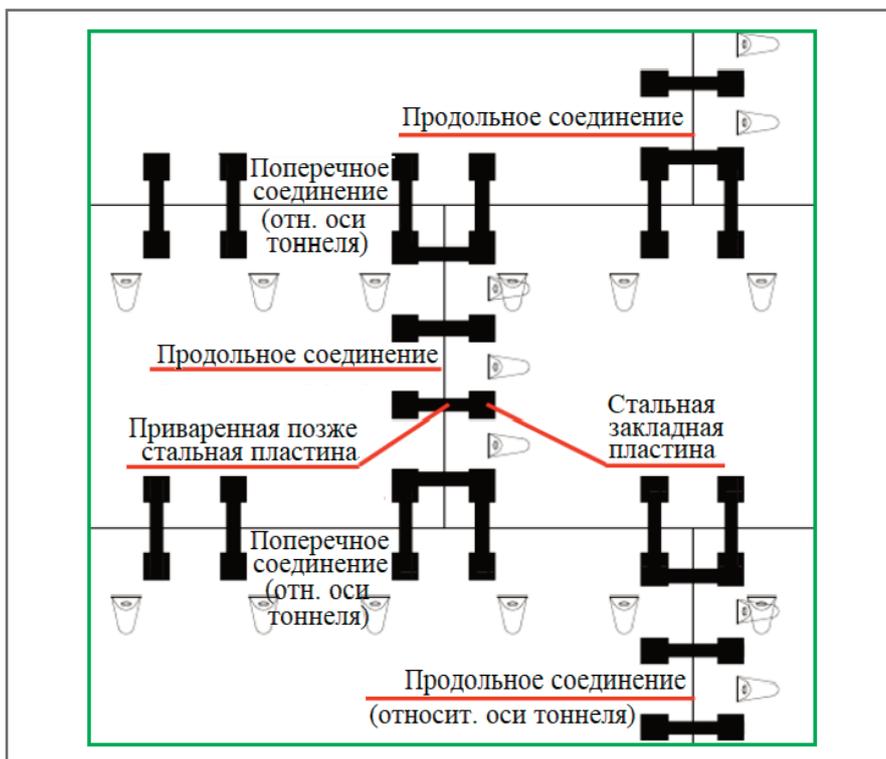


Рис. 12. Схема сварки стальных пластин для соединения блоков внутри сегментного кольца

ханических характеристик обделки тоннеля под рекой Хуанхэ и были предложены ключевые технологии повышения его устойчивости.

### УЧЕТ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ТОННЕЛЯ ПРИ АНАЛИЗЕ УСИЛИЙ ►

В процессе проектирования рассматриваемого тоннеля учитывались воздействия больших переменных нагру-

зок в результате эрозии дна реки и накопления на нем осевших наносов, крупномасштабного увеличения высоты береговых дамб и сезонных изменений УГВ.

При анализе усилий принимались во внимание различные условия работы тоннеля. Например, для его участка под северным берегом для этапа строительства учитывалась комбинация нагрузок, вызванных только текущими глубиной

заложения тоннеля и УГВ, тогда как для этапа эксплуатации нагрузки, вызванные текущими глубиной расположения тоннеля и УГВ, объединялись с добавочной нагрузкой, вызванной наращиванием береговой дамбы.

Для расчета внутренних усилий в обделке тоннеля использовался модифицированный рутинный метод, а для прогнозирования деформаций принимался во внимание «арочный» эффект (результат перераспределения и уравнивания нагрузок от грунта. – *Ред.*).

Обделка участка тоннеля под северным берегом показала самые неблагоприятные характеристики усилий на этапе эксплуатации. Результаты расчетов (рис. 10) показали, что деформирование обделки на этапе эксплуатации после выполнения работ по наращиванию береговой дамбы будет соответствовать контрольному требованию не более чем на  $3\%D$ , где  $D$  – наружный диаметр тоннеля.

На основе полученных результатов анализа усилий был выполнен проект армирования обделки тоннеля на данном участке.

### ВЫБОР ФИБРОБЕТОНА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ►

Как показали исследования [16, 17], сталефибробетон (бетон, армированный стальными волокнами) имеет более хорошие упругие свойства в отношении трещиностойкости, сейсмостойкости и усталостной прочности, чем обычный бетон.

Характеристики материалов, выбранных для заводского изготовления, помогли определить эффективность, безопасность и надежность разных видов обделки рассматриваемого тоннеля. Чтобы преодолеть проблемы, связанные с большими переменными нагрузками, для участков, где в долгосрочной перспективе потребуются улучшенные механические характеристики и повышенная трещиностойкость, запроектировали сталефибробетонную обделку.

### УЛУЧШЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОБЩЕЙ ЖЕСТКОСТИ ►

Для повышения общей жесткости и контроля деформаций тоннеля при больших переменных нагрузках планировали усиленные соединения между элементами обделки. Во-первых, между сегментными кольцами запроектирова-

ли по 34 шт. Во-вторых, количество соединительных болтов между кольцами увеличили в два раза – с 34 до 68. Распределение штырей и соединительных болтов показано на рисунке 11. Наконец, в сегментные кольца, для которых в долгосрочной перспективе ожидалось дополнительные большие нагрузки, запланировали встроить стальные закладные пластины, а затем приварить к ним другие стальные пластины для повышения деформационной стойкости соединений сегментов (рис. 12).

## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ►

Проект тоннеля под рекой Хуанхэ в городе Цзинань на автодороге Цзинань – Хуанган столкнулся с такими проблемами, как большие переменные нагрузки на этапе эксплуатации в результате глубокой эрозии дна реки и отложения на нем наносов, масштабного повышения береговых дамб и сезонных изменений УГВ. В представленной работе были

проанализированы воздействия больших переменных нагрузок на обделку данного тоннеля и рассмотрены предложенные ключевые технологии для повышения устойчивости сооружения. На основе результатов проведенного анализа были сделаны следующие выводы и даны следующие рекомендации.

1. Большие переменные нагрузки могут вызывать резкие изменения в условиях среды, окружающей тоннели, пройденные щитовым способом, что потенциально может приводить к постоянным нарушениям в облицовке этих сооружений и представлять угрозу для их безопасности.

2. Для повышения устойчивости тоннеля под рекой Хуанхэ при анализе усилий в его конструкциях важно учитывать сложные эксплуатационные условия. Эффективным подходом может быть применение обделки из сталефибробетона и усиление соединений элементов обделки.

3. Рассмотренные ключевые технологии для повышения устойчивости могут применяться и для других тоннелей, строящихся щитовым способом, если они подвергаются и/или будут подвергаться воздействиям других типов больших переменных нагрузок. ■

*Автор выражает благодарность таким специалистам, как Чжуинь Вэнь, Гуанмин Ю, Чжунинь Цзянь и Нянь Лю, работающим в компании «Шанхайский муниципальный инженерно-проектный институт», за их руководство и сотрудничество при проведении исследований по тоннелю под рекой Хуанхэ в городе Цзинань на дороге Цзинань – Хуанган на этапе проектирования, а также хотел бы выразить признательность за финансовую поддержку со стороны проекта Dawn/«Рассвет» (№ K2022K127) компании «Шанхайский муниципальный инженерно-проектный институт».*

## ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

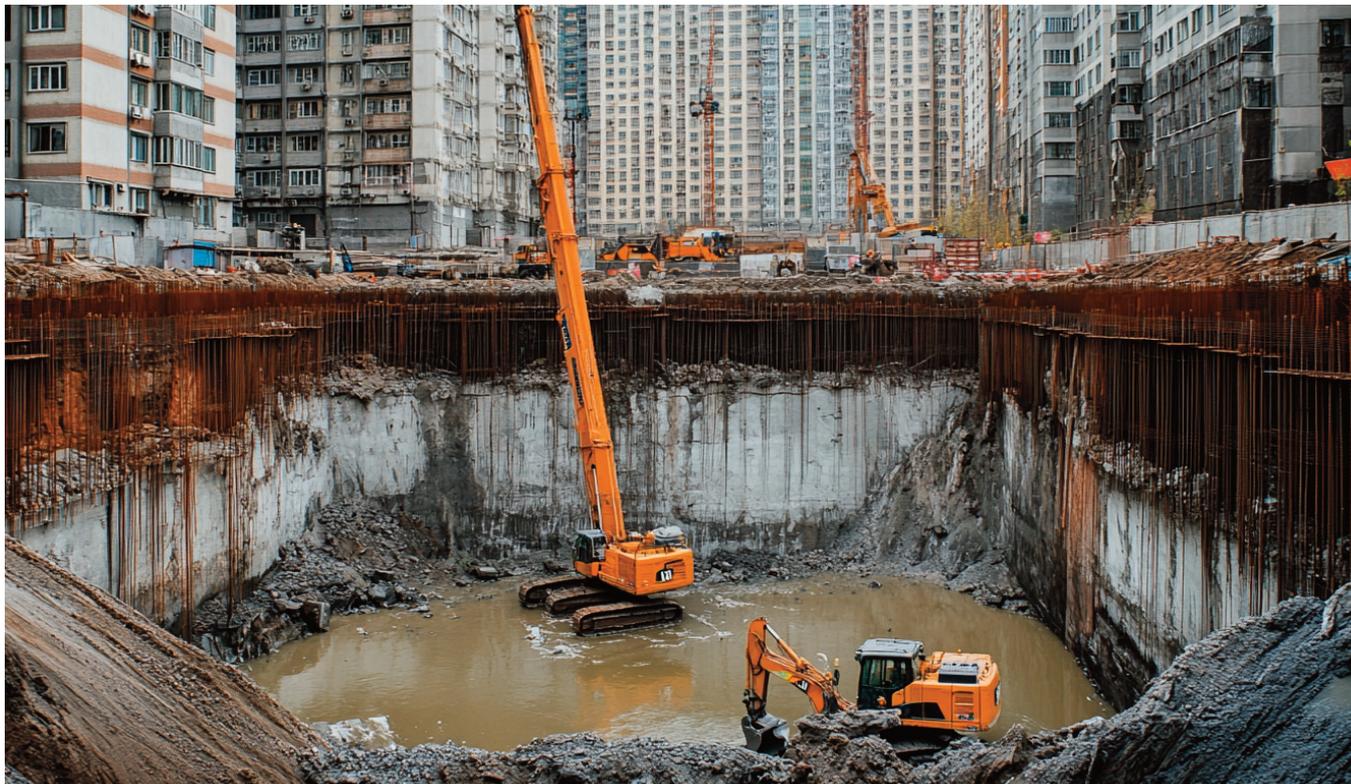
### (SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Chen J. Key technologies for improving resilience of super-large diameter shield tunnel affected by large variable loads underneath the Yellow River // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. Vol. 1333. Proceedings of the Geo Shanghai International Conference 26.05.2024 – 29.05.2024, Shanghai, China. 2024. Vol. 4: Tunnelling and Underground Construction. Paper 012012. DOI:10.1088/1755-1315/1333/1/012012.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРОМ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

### (REFERENCES USED BY THE AUTHOR OF THE TRANSLATED PAPER) ►

- Huang R. 2008. Unde. Engi. Tunn. 2–8, 60.
- Huang R. 2008. Unde. Engi. Tunn. 1–7.
- Wang M., Sun M., Tan Z. 2009. Engi. Scie. 11. 11–17.
- Guo X., Min F., Zhong X., Zhu W. 2012. Chin. J. Rock Mech. Engi. 31. 2154–2160.
- Xing H. 2010. Mode. Tunn. Tech. 47. 68–73.
- Zhang Y., Wen Z., You G., Liu N. 2019. Tunn. Cons. 39. 669–676.
- Wen Z. 2022. Mode. Tunn. Tech. 59. 928–933.
- Hong K., Feng H. 2021. Tunn. Cons. 41. 1259–1280.
- You G., Wen Z., Liu N., Hou J. 2021. Chin. J. Unde. Spac. Engi. 17. 221–227.
- Shao H., Huang H., Zhang D., Wang R. 2016. Chin. J. Geot. Engi. 38. 1036–1043.
- He C., Su Z., Zeng D. 2007. Chin. J. Rock Mech. Engi. 26. 2063–2069.
- Li Q., Zhang D., Fang Q., Li D. 2014. Chin. J. Rock Mech. Engi. 33. 3911–3918.
- Liu T. 2008. Chin. J. Rock Mech. Engi. 27. 3393–400.
- Dai H., Chen R., Chen Y. 2006. Chin. J. Geot. Engi. 28. 312–316.
- Chen X., Yu Y., Bao X., Cui H., Xia C. 2022. Mode. Tunn. Tech. 59. 14–28.
- Gong C., Ding W. 2017. Chin. J. High. Tran. 30. 134–142.
- Zheng A., Xu B., Chen X. 2020. Mode. Tunn. Tech. 57. 52–58, 73.



# ИНФЛЯЦИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ. ОБОГНАТЬ НЕЛЬЗЯ ПОСТРОИТЬ

**АНАНКО ВИКТОР**  
Издатель

## АННОТАЦИЯ

Нас давно беспокоит вопрос: действительно ли экономно строить объекты, в том числе финансируемые из государственного бюджета, максимально сжимая все производственные циклы в попытке обогнать инфляцию? Можно ли без учета мнения инженеров-геологов, экологов эффективно реализовать проект? По нашему мнению, которое подкрепляется и опытом специалистов, – невозможно. Игнорирование, а зачастую и просто незнание и непонимание стоимости геологических, экологических и инженерно-геологических рисков, неизбежно тянет срок реализации проекта «вправо», нарушая саму идею максимального сжатия времени строительства. Построенные таким образом объекты неизбежно приносят проблемы вместо удовлетворения. На дорогах случаются оползни, обвалы, сели, дорожное полотно идет буграми и ямами, дома, опоры мостов и эстакад кренятся. В результате на исправление ситуации не только тратятся деньги из федерального бюджета, но и оттягиваются рабочие силы, которые могли бы быть задействованы в новом строительстве. Не говоря уже об общем разочаровании населения. А усугубляется все тем, что отрасль инженерных изысканий, в которой работает до полумиллиона человек, официально до сих пор не признана самостоятельной отраслью (для нее как не было, так и нет отдельного от проектирования кода по Общероссийскому классификатору видов экономической деятельности, или ОКВЭД), поэтому она оказывается настолько недофинансированной, что становится все ближе к грани исчезновения.

Сегодня мы предлагаем свои соображения по этому вопросу, основанные на комментариях специалистов и на изучении материалов из открытых источников. И будем очень рады, если состоится открытая дискуссия по этой наболевшей проблеме.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

строительство; инженерные изыскания; инфляция; риски; экономическая эффективность; безопасность; форсирование сроков; рост издержек; ложная экономия.

# INFLATION IN CONSTRUCTION. IMPOSSIBLE OUTPACING VERSUS IMPOSSIBLE BUILDING

**ANANKO VICTOR**

Publisher

## ABSTRACT

We have long been concerned about the question: is it really economical to build facilities (including ones financed by the state budget), maximally reducing all the production cycles in attempts to outpace inflation? Is it possible to implement a project effectively without taking into account the opinions of engineering geologists and ecologists? In our opinion (that is supported by the experience of specialists), it is impossible. Ignoring (and often just non-acquaintance and misunderstanding) of the costs of geological, environmental and engineering-geological risks inevitably prolongs the implementation period of a project, violating the very idea of maximal reduction of construction time. Facilities built in this way inevitably bring problems instead of satisfaction. Landslides, avalanches, mudflows occur on the roads; the roads become covered with bumps and holes; houses, bridge supports and overpasses become tilted. As a result, money from the federal budget is not only spent on correcting the situation, but also labor forces are restrained instead of being involved in some new construction, and not to mention the general disappointment of the population. And it is all aggravated by the fact that the engineering survey industry (which employs up to half a million people) has not yet been officially recognized as an independent industry (for it, there has not yet been a separate code according to the All-Russian Classifier of Economic Activities), so it is so underfunded that it is getting closer and closer to the brink of extinction.

Today, we propose our thoughts on this issue on the basis of specialists' comments and on the study of materials from open sources. And we will be very glad if there is an open discussion on this pressing problem.

## KEYWORDS:

**construction; engineering surveys; inflation; risks; economic efficiency; safety; deadlines acceleration; costs rise; false economy.**

## ВВЕДЕНИЕ ►

В современных условиях быстро растущей инфляции правительство принимает ряд мер, чтобы «обогнать» ее. Логика кажется простой: чем быстрее будет завершено строительство, тем меньшему удорожанию оно подвергнется за счет инфляционных факторов (роста цен на материалы, заработной платы, аренды техники и так далее). Однако критический анализ этой стратегии показывает, что ускорение сроков приводит к дефициту времени на важнейшие подготовительные этапы, в том числе на инженерно-геологические и инженерно-экологические изыскания, обследование, моделирование и прочее. Итог с точки зрения экономики и рационального расходования бюджетных средств может оказаться обескураживающим.

С одной стороны, экономическая логика, лежащая в основе попыток опередить инфляцию, имеет под собой реаль-

ную почву. Рост цен в строительной отрасли России может значительно повлиять на стоимость любого масштабного проекта.

Предположим, если строить объект на год дольше, то за этот период стоимость материалов возрастет, скажем, на 10–15% процентов. Подобный рост прямоком ложится на общий бюджет проекта, значительно увеличивая его и требуя корректировки и повторного согласования смет. В итоге правительство считает наиболее «полезным» увязать финансирование с форсированным графиком. Идея состоит в том, чтобы профинансировать и закупить материалы заранее и приступить к работам максимально оперативно, тем самым зафиксировав цены на более низком уровне. Преференции отдаются тем проектам, регионам и генподрядным организациям, которые идут с опережением графика.

Однако эта спешка нередко приводит к недооценке геологических рисков (а это всегда «тяжелые» ошибки второго рода – ошибки игнорирования реальности или принятия изначально неправильных стратегий), к искажению технологических циклов и нарушает последовательность работ.

Инженерные изыскания никогда не были простой формальностью. Их результаты являются определяющими при выборе площадки или мест прохождения трассы, типа фундамента, для подсчета нагрузок, учета деформаций грунта и прочих геологических особенностей и, что самое главное, для корректной оценки геологических, гидрометеорологических и инженерно-геологических рисков. Однако в условиях цейтнота и давления «сверху» эти исследования часто или радикально сокращаются по срокам, нарушая сами физические, природные законы, или формально «вы-

полняются на бумаге». В итоге заказчики получают недостаточно точные данные, а то и вовсе начинают строить без учета необходимых рисков.

Например, в своем недавнем интервью журналу «ГеоИнфо» научный руководитель ООО «КазГеоЛаб», доктор геолого-минералогических наук Айрат Латыпов рассказывал: «Самым показательным случаем стала федеральная трасса М-12 на участке, проходящем через Татарстан. Столичные организации провели там изыскания, по итогам которых были приняты проектные решения. Но спустя время на некоторых участках активизировались оползневые процессы... Специалисты, приезжающие из других городов, даже располагая всеми необходимыми материалами, в условиях дефицита времени часто просто не успевают качественно проанализировать имеющуюся геологическую информацию... Если бы мы подключились на стадии планировочных решений, то, возможно, предложили бы иной маршрут или корректировку прохождения дороги. Сложно представить, чтобы геолог, знакомый со спецификой местности, выбрал столь проблемный вариант. Тогда и сроки реализации, и бюджет проекта были бы значительно ниже».

### **А ЭКОНОМИЯ-ТО ЛОЖНАЯ! ►**

С экономической точки зрения, недооценка важности результатов инженерно-геологических изысканий (а это самый дорогостоящий и растянутый во времени процесс в составе изысканий) формирует своеобразный «отложенный долг». На первых порах, когда проект только начинается, может показаться, что выгода есть: строители действительно гораздо раньше приступают к работе. Но в реальности любое отклонение в данных по инженерно-геологическим массивам, грунтам способно привести к необратимым последствиям. Массивы под опорами деформируются, дорожные полотна проседают, в откосах появляются трещины, которые со временем могут привести к оползням. В жилищном строительстве нередки случаи затопления подвалов, лопнувших фундаментных плит из-за неравномерных осадков, кренов зданий, выходов радона или метана. Стоимость решения таких проблем порой в разы превосходит экономию, которая якобы была получена за счет изначального ускорения сроков.

Возникает каскадная цепочка проблем. Во-первых, требуются дополнительные бюджетные вливания на аварийные и ремонтные работы, которые

могли бы не потребоваться вовсе, если бы изначально были учтены все инженерно-геологические особенности территории (именно о них всегда известно меньше всего, поскольку они скрыты под поверхностью земли и несут максимальные риски). Во-вторых, приоритет использования техники и специалистов зачастую смещается в сторону устранения последствий уже запущенных проектов, вместо того чтобы направлять ресурсы на новые, действительно важные объекты.

Рынок геоинженерных услуг (самый сложный инжиниринг в строительстве) страдает при этом особо. Поскольку «спринтерский» подход к строительству предполагает сокращение изыскательских работ и моделирования, целая отрасль – профессиональные институты и организации, научные центры, испытательные лаборатории – остается вне достаточного количества заказов. В условиях урезания сроков и бюджетов приходится либо снижать качество, либо сокращать штат, либо вовсе уходить с рынка. В долгосрочной перспективе получается дефицит компетентных специалистов и оборудования для комплексных изысканий и геоинжиниринга.

С этим согласен инженер-геолог, генеральный директор ООО «ИГиГ» Александр Гаврилов. По его словам, при необдуманном сокращении сроков реализации проекта есть два варианта негативного развития событий. Первая цепочка – это экономия на изысканиях (причем неважно, о времени или деньгах идет речь), которая приводит к плохой изученности условий, снижению надежности, проблемам при строительстве и эксплуатации, дополнительным затратам на устранение дефектов и ремонты, а также к репутационным потерям. Вторая цепочка – та же экономия на изысканиях, которая оборачивается завышенными коэффициентами запаса и существенным удорожанием сметной стоимости строительства. Оба варианта, как подчеркивает эксперт, в итоге ведут к увеличению затрат, которое оказывается несопоставимо больше стоимости изысканий, выполненных в достаточном объеме. Потенциальные выгоды от «досрочного» ввода объекта в эксплуатацию в большинстве случаев не перекрывают финансовые потери от неизбежно возникающих проблем, в том числе при авариях и иных внештатных ситуациях.

Подтверждает это и известный в геоинженерной отрасли инженер-геофизик Максим Прохачев. По его мнению, даже если экономия на проведении изыска-

ний, возможно, не слишком заметно повлияет на стоимость строительства, то потом она неизбежно отразится на расходах, связанных с эксплуатацией объекта. Строителям, по большому счету, все равно: они уложатся в сроки, даже если придется пересмотреть бюджет или внести корректировки в конструктивные решения. Но если заранее не изучены опасные геологические процессы, те же подтопления, то в дальнейшем возникают две дорогие альтернативы: либо полностью устранять проявившиеся после окончания строительства проблемы, либо «пожизненно» периодически ликвидировать их последствия.

«Особенно часто забывают, что эксплуатация самой постройки тоже стоит денег. Отличные примеры – город Сочи после Олимпиады или Калининград и Саранск после чемпионата мира по футболу 2018 года, когда содержание переданных городу объектов неожиданно обернулось серьезной дополнительной статьей расходов для муниципалитетов. Не менее поучительный случай – так называемый золотой километр железнодорожного пути на БАМе, где только на поддержку эксплуатируемого участка ушли сотни миллионов рублей», – рассказал Прохачев.

Кроме того, без соответствующих мер здания и сооружения при эксплуатации неизбежно теряют в надежности: начинают сказываться различные инженерно-геологические факторы, в том числе водонасыщение, реологические процессы. В результате девелопер, расценивающий объект лишь как скоропортящийся товар, отходит в сторону, а проблемы решает уже собственник. Именно здесь заложена главная причина того, что экономия на качественных и всесторонних изысканиях и на моделировании оборачивается серьезными финансовыми издержками в будущем. Геоинжиниринг несопоставим по цене с самим строительством и эксплуатацией, а риски, связанные с неправильными или необоснованными решениями, чрезвычайно велики и существенно превышают выгоду от «скоростной борьбы с инфляцией». Зачастую складываются известные ситуации, когда «гладко было на бумаге, да забыли про овраги» или «вместе с водой ребеночка выплеснули».

### **ПРОЕКТНЫЙ МЕНЕДЖЕР НЕ ДОЛЖЕН БОРЬТЬСЯ С ИНФЛЯЦИЕЙ ►**

Управляющий партнер компании WE-ON GROUP (в портфолио которой

6 млн кв. м запроектированных объектов) Кирилл Чебаков и вовсе напоминает, что бороться с инфляцией или регулировать ее – задача Центрального банка. «В задачи проектных менеджеров это не входит. При этом не стоит воспринимать инфляцию как абсолютное зло: она всего лишь вводный фактор, который мы учитываем при построении финансовой модели, не пытаюсь его изменить или обогнать», – поясняет он. По его словам, сокращение сроков производственного цикла действительно является конкурентным преимуществом. «Сжимать циклы, безусловно, можно и нужно, но никогда нельзя менять их последовательность без внедрения новых технологий. Внутри проектно-исследовательских работ и непосредственно строительства есть циклы, часть которых идет строго последовательно, а часть – параллельно. Эти закономерности отточены годами практики, и любое их нарушение гарантированно приведет к техногенной катастрофе», – подчеркивает Чебаков. Он также отмечает, что недопустимо рассуждать о реализации проекта без учета мнения инженеров-геологов: «Подобные действия категорически запрещены и законом, и здравым смыслом – это почти стопроцентно ведет к катастрофе».

### **ПРОЕКТНЫЙ МЕНЕДЖЕР ДОЛЖЕН ГРАМОТНО УПРАВЛЯТЬ РИСКАМИ, А ИНФЛЯЦИОННЫЕ РИСКИ ДАЛЕКО НЕ САМЫЕ ЗНАЧИТЕЛЬНЫЕ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТАХ ►**

Один из лидеров мнений проектно-исследовательской отрасли, генеральный директор ГК «Петромоделинг», преподаватель геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Алексей Бершов в беседе с нами подчеркнул, что очень рад тому, что многие его коллеги-геоинженеры тоже, наконец, стали активно поднимать данную тему. «Проблемы “отрасли без отрасли” – инженерных изысканий и в целом геоинжиниринга – во многом идут “сверху”, последовательно опускаясь вниз по цепочке “проектирование – строительство – планирование проектов”. Именно в такой нисходящей цепочке реализуются уже и управленческие риски – ведь сквозных специалистов практически нет, и управленцы такого уровня на вес золота. Вот и возникает сценарий: назначен директивный срок без оценки и учета всех рисков и по цепочке вниз идет сокращение срока выполнения и сокращение финансирования. Однако самое инте-

ресное происходит потом: срывает обратная связь, про которую все забывают. Обратное “наверх” уходят “странные” исходные данные, а затем появляются такие же “странные” проектные решения. И вот “копейки”, потраченные на изыскания и геоинжиниринг, превращаются в сотни миллионов и миллиарды рублей, в остановку строительства на неопределенный срок. И становится уже не до инфляционных рисков. Я наблюдаю такие ситуации на очень многих больших проектах, где потом все “под угрозой меча” бросаются на судорожное исправление ситуации. Но все повторяется раз за разом и все разводят руками со словами “изыскания плохие” или “природа – что тут поделаешь”, – рассказал Бершов.

В контексте обсуждаемого вопроса он также упомянул про природные риски и, в частности, про геологические и инженерно-геологические риски, которые являются одними из самых сложно управляемых, в отличие от, как ни странно, гидрологических. Именно их недоучет или просто игнорирование приносит самые большие экономические потери и самый главный ущерб – потерю драгоценного времени и уход проекта далеко «вправо», притягивая к решению проблемы еще большие экономические ресурсы и трудодни профессионалов сразу трех отраслей. А ведь регулярные строительные конференции не дают забывать о такой важной проблеме, как жутчайший кадровый голод и стоимость времени специалистов.

«Кроме экономической эффективности есть и другая доминанта – безопасность. Но зачастую про нее просто забывают со словами “я всегда так строил и ничего не случилось” или “давайте быстрее – срок горит, потом разберемся”. Это тоже управленческие риски, которые не лечатся просто, ведь снизу в ответ чаще всего звучит “ты начальник – я дурак”. Природная проблема просто игнорируется, но риск будет реализован. И государство, да и крупные холдинги, на мой взгляд, четко должны понимать, что вертикальное укрупнение порождает плохо управляемых монстров с отсутствием какой-либо гибкости. Простое укрупнение типа “все отдадим в одни руки”, хотя оно и напрашивается вроде как очевидное, не должно уничтожать мнения профессионалов и их сообществ, как и гибкость средних и малых компаний – участников рынка. Ведь во многом именно на них все и держится, особенно в самых сложных природных условиях. Реше-

ние, на мой взгляд, – в создании комплексных групп по образу и подобию “атомного проекта”, где есть возможность доносить идеи до лиц, принимающих решения», – заключил Бершов.

### **И В РЕЗУЛЬТАТЕ – ДОЛГОВРЕМЕННЫЙ РОСТ ИЗДЕРЖЕК ►**

В экономической теории есть понятие «ложная экономия», или «издержки упущенных возможностей»: когда экономия небольших сумм в начале приводит к гораздо большим расходам в будущем.

На первый взгляд кажется, что правительство находит «быстрое решение» – выделить средства сейчас, закупив все необходимое «до того, как цены поднимутся». Однако при этом не учитывается, что строительство – это сложный процесс с множеством взаимосвязанных этапов, таких как изыскания и геоинжиниринг, проектирование, различные согласования, поставка материалов, сами строительные работы, ввод объекта в эксплуатацию и его дальнейшее обслуживание. Когда какой-то этап вытаскивается из процесса или сокращается в ущерб качеству, ущерб приобретает аккумулятивный характер и проявляется на всех последующих стадиях: требуются ремонт, перестройка, доработка. Возможно, возникнут и судебные иски от пострадавших по причине несоответствия объекта заявленным нормам. Все это может нивелировать первоначальную экономическую выгоду более чем полностью.

Кроме того, ускорение строительства вдвойне отражается на рабочей силе: специалистам в организациях приходится трудиться в форсированных режимах, искать короткие пути, упрощать расчеты. Многие ключевые сотрудники испытывают серьезное психологическое давление, что может приводить к ошибкам из-за человеческого фактора. Любая из таких ошибок, встроенная в проектную документацию, затем «приумножается» в ходе самого строительства и эксплуатации, создавая риски уже системного уровня.

В результате развернувшаяся гонка между проектом и инфляцией дает противоположный эффект. Тот размер инвестиций, который планировалось сэкономить по сравнению с ростом цен, с лихвой расходуется на устранение недочетов, ремонтные кампании и разрастающиеся дополнительные работы. Усиливается разрыв в экономических цепочках, тормозится развитие научно-

технического потенциала. Ускоренное строительство новых объектов сопровождается игнорированием природных особенностей местности, что само по себе подрывает устойчивость всей инфраструктуры. В итоге срываются сроки ввода объектов, возникает социальная напряженность.

По сути, без тщательного геоинженерного анализа любой проект превращается в лотерею: будет ли объект надежен? Не потребует ли он дорогостоящих вложений через год или два? И какая в итоге остается выгода от форсированного «бега наперегонки» с инфляцией, если в итоге проект оказывается дороже, чем если бы он реализовывался планомерно, с соблюдением всех этапов?

Разумеется, инфляционные риски никто не отменял. Вопрос в том, насколько целесообразно жертвовать технологическими процессами и безопасностью ради призрачной экономии, которая в конечном счете почти всегда оказывается дороже, чем корректно запланированное и проведенное строительство. Более того, грамотно выстроенные цепочки поставок, система долгосрочных контрактов и устойчивое развитие рынка изыскательских и, более широко, геоинженерных услуг, совместно с проектными услугами способны лучше противостоять инфляции, чем временные и поспешные меры. Дело только в профессиональном отношении на всех уровнях развития проектов и в понимании всех глубинных взаимосвязей между процессами и рисками.

### ПОМОЖЕТ СТРАТЕГИЯ ОПЕРЕЖАЮЩИХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ►

Профессор совместного Университета МГУ-ППИ (MSU-BIT) в Шэньчжэне Владислав Исаев посоветовал взглянуть на рассматриваемый вопрос еще с одной точки зрения и предложил один из вариантов его решения. По его словам, поднятая проблема о стоимости и объемах инженерно-геологических изысканий давно является камнем преткновения в сфере строительства. Очевидно, что заложенные при урезанных изысканиях ошибки в оценке комплекса характеристик инженерно-геологического массива как основания фундамента приводят к неправильным проектным решениям и в попытках избежать их – к удорожанию проекта за счет увеличения запаса прочности конструкций. Но и это не приводит к желаемому результату, а зачастую усугубляет негативный

эффект «вслепую» принятого конструктивного решения.

Во избежание вышеупомянутого развития событий должна быть принята стратегия опережающих инженерно-геологических изысканий наряду с уже применяемым подходом к историко-культурной оценке территорий, работающим на опережение. Например, данный подход, примененный в ЯНАО в 2023 году, во-первых, позволил снизить стоимость затрат в расчете на один объект строительства (так как экспертизе подвергался не один участок строительства, а территория нового микрорайона в целом). Во-вторых, на порядок сократилось время проведения экспертизы в расчете на один участок строительства (поскольку вопросы выезда специалистов, сбора архивных данных, написания отчета и прохождения экспертизы применялись ко всему району освоения).

Аналогичный подход в инженерно-геологических изысканиях, безусловно, даст еще больший эффект в отношении снижения затрат на проведение изысканий, написание отчета, его защиты для всей территории освоения вместо единичных объектов (изыскания для которых зачастую не выявляют возможные геологические риски, существующие на прилегающих территориях и опосредованно влияющие на конкретный участок освоения).

Основной же эффект от такого подхода – это уход от срыва сроков по инженерно-геологическим изысканиям по каждому объекту, приводящий зачастую к формированию фейковых отчетов и последующим проблемам на каждой стадии строительства. Это будет возможно благодаря плановой работе по представлению результатов комплексных инженерно-геологических изысканий для всей территории освоения.

Именно такой опыт применения опережающих инженерно-геологических изысканий позволяет достичь рекордных темпов строительства в КНР с ми-

нимальными затратами и максимально полными и, главное, высококачественными данными изысканий, полученными точно в срок, причем без авральных работ.

### И ВСЕ-ТАКИ СНАЧАЛА – ИЗЫСКАНИЯ ►

Таким образом, форсирование сроков строительства, призванное сберечь государственные средства на краткосрочном отрезке, в действительности ведет к долговременному росту издержек, разрушению отрасли инженерных изысканий, ухудшению качества объектов и перенапряжению ресурсной базы. В условиях, когда каждая копейка из бюджета должна использоваться эффективно, подобное ускорение может иметь эффект «медвежьей услуги», поскольку мнимая экономия впоследствии приведет к нецелевым затратам и создаст угрозу нормальному функционированию и развитию инфраструктуры.

Рациональный выход может заключаться в балансировании между необходимостью учитывать инфляционные процессы и соблюдением полного цикла исследований и проектирования. В конечном итоге выигрыш получают и экономика, и строительный комплекс, и общество в целом, если будет выбран курс на долгосрочное качество, а не на стремление «выиграть» несколько процентов в текущих сметах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

В заключение отметим, что такое невнимание к проблемам отрасли инженерных изысканий со стороны федеральных чиновников очень расстраивает. Хотелось бы привлечь к ним внимание министра строительства и жилищно-коммунального хозяйства Ирека Файзуллина, который имеет не только профильное образование, но и опыт управления проектно-изыскательской организацией («Татинвестграждан-проект»). 



Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал

# ГеоИнфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>



Telegram-канал журнала

Независимый электронный журнал

# Геоинфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>



## АЙРАТ ЛАТЫПОВ: НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ В ТАТАРСТАНЕ ТРЕБУЕТСЯ ПРАКТИЧЕСКИ ПОВСЕМЕСТНО

### АННОТАЦИЯ

В январе 2025 года научному руководителю ООО «КазГеоЛаб» Айрату Исламгалиевичу Латыпову была присуждена ученая степень доктора геолого-минералогических наук по специальности «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение». Его научная работа была посвящена строению и инженерно-геологическим особенностям толщ элювиальных грунтов Восточного Закамья (Татарстан). Это динамично развивающийся промышленный регион, который в то же время отличается сложными инженерно-геологическими условиями и мало изучен в геотехническом плане.

Мы пообщались с Айратом Исламгалиевичем, чтобы узнать, с какими сложностями сталкиваются инженеры-геологи, проектировщики и строители, работающие в Восточном Закамье, чем им помогает научно-техническое сопровождение, а также какие есть возможности для того, чтобы минимизировать строительные риски на этой территории.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Татарстан; Восточное Закамье; научно-техническое сопровождение; инженерные изыскания; региональный опыт; региональная инженерная геология; комплексный подход; комплексные исследования; грунтовые лаборатории.

# AIRAT LATYPOV: SCIENTIFIC-TECHNICAL SUPPORT OF ENGINEERING SURVEYS IS REQUIRED ALMOST EVERYWHERE IN TATARSTAN

## ABSTRACT

In January 2025, Ayrat Islamgalievich Latypov, scientific director of “KazGeoLab” LLC, was awarded the scientific degree of Doctor of Science (Geology and Mineralogy) in the specialty “Engineering Geology, Geocryology and Soil Science”. His scientific work was devoted to the structure and engineering-geological features of eluvial soil strata in Eastern Trans-Kama (Tatarstan). This is a dynamically developing industrial region that at the same time is characterized by difficult engineering-geological conditions and is poorly studied in geotechnical terms.

We talked to Ayrat Islamgalievich to find out what difficulties geotechnical engineers, designers and builders working in Eastern Trans-Kama face, how scientific-technical support helps them, and what opportunities there are to minimize construction risks in this area.

## KEYWORDS:

Tatarstan; Eastern Trans-Kama; scientific-technical support; engineering surveys; regional experience; Regional Engineering Geology; integrated approach; integrated investigations; soil laboratories.

*Ред.: Расскажите, пожалуйста, о вашей докторской диссертации, посвященной инженерно-геологическим условиям Восточного Закамья в Татарстане. Насколько детально изучен этот район с точки зрения инженерной геологии и насколько сложны там инженерно-геологические условия для строительного освоения?*

**А.Л.:** Моя докторская диссертация обобщает большой научный и практический материал по этой обширной территории – около 23 тысяч квадратных километров. Восточное Закамье можно назвать промышленным «сердцем» Татарстана: здесь сейчас наблюдаются самые высокие темпы строительства, разрабатываются месторождения, строятся крупные заводы, расположены крупные города.

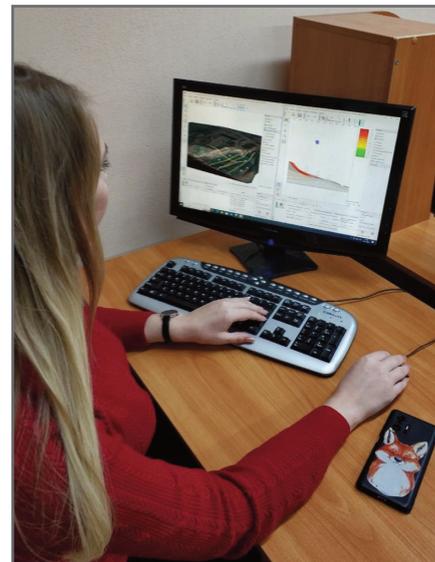
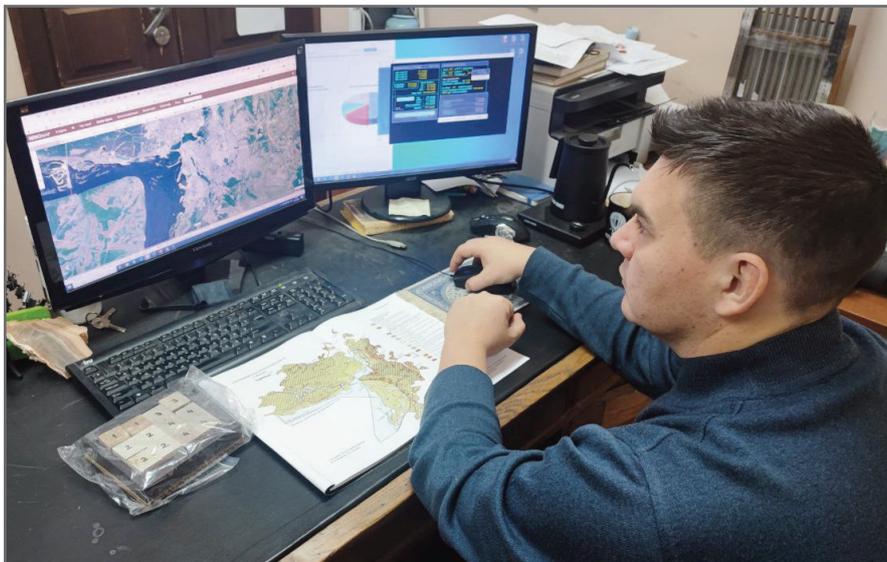
При этом Восточное Закамье является одной из наиболее сложных в инженерно-геологическом плане территорий в республике. Здесь самая активная тектоника, сложный рельеф, сформированный интенсивным денудационным разрушением. Практически повсеместно распространены элювиальные отложения – продукты выветривания коренных пород. Во многом поэтому на данной территории активно развиваются карстовые и суффозионные процессы. При этом именно Восточное Закамье долгое время оставалось, да и продолжает оставаться, одним из наименее изученных регионов с точки зрения геотехники и инженерной геологии, особенно если



сравнивать его с другими частями Татарстана. Это во многом и обусловило выбор темы моей докторской диссертации. Несмотря на высокие объемы строительных работ, до настоящего времени не было комплексных исследований, позволяющих учесть все вышеперечисленные факторы. Именно поэтому региональные работы, подобные моему исследованию, особенно важны, поскольку помогают закрыть этот пробел как в научном, так и практическом отношении.

*Ред.: Возникают ли у строителей серьезные проблемы, связанные со сложными условиями строительства в регионе?*

**А.Л.:** Практически все объекты из моей практики работы в регионе так или иначе связаны с какой-то проблемой. Например, здесь у нас очень сложно корректно оценить карстовую опасность, поскольку отсутствуют какие-то либо карты, схемы. Сложности возникают при прогнозировании оползневых процессов: здесь сложные грунты, к которым трудно применить существующие методики расчета, и на этапе инженерных изысканий нередко возникают затруднения. В западной и центральной частях Татарстана верхние слои представлены в основном четвертичными отложениями – глинами, песками, суглинками. А в Восточном Закамье на



поверхность выходят продукты выветривания коренных пород – элювий. А это уже специфический грунт, обладающий гораздо большей неоднородностью, что усложняет проведение полевых и лабораторных работ. Нередко грунт здесь с виду похож на песок, но фактически является песчаником или похож на суглинок, а при более внимательном обследовании оказывается мергелем. Эти грунты ведут себя при нагружении не так, как обычные дисперсные грунты, и их неправильное классифицирование может вести к критическим ошибкам при проектировании и строительстве.

Напомню, что верно определить тип грунта – это в первую очередь задача полевого геолога. Последующий лабораторный анализ лишь уточняет то, что было выявлено непосредственно на месте изысканий. И тут есть проблема: вузы и, следовательно, специалисты сосредоточены главным образом в Казани, то есть в западной части республики, поэтому найти квалифицированного полевого геолога для работы на юго-востоке Татарстана весьма трудно. В итоге качество кадров на восточных территориях зачастую ниже, что влечет еще больше ошибок. Получается замкнутый круг.

Кстати, если вернуться к моей докторской диссертации, то ее главный прикладной результат заключается как раз в том, что была создана серия различных региональных карт, схем, таблиц свойств, ориентированных именно на Восточное Закамье. Они предназначены и для начинающих специалистов, и для опытных геологов, которые сталкиваются с проблемами выделения зон выветривания, например. Эти материалы работают как справочный ин-

струмент, позволяя, с одной стороны, избежать принятия ошибочных решений, а с другой стороны – упростить процесс изысканий. Особенно важно то, что в диссертации описаны и систематизированы зоны коры выветривания и предложены методы их распознавания. Сейчас многие изыскатели уже применяют наши классификаторы и карты, что облегчает им работу.

*Ред.: Научно-производственная организация «КазГеоЛаб» ранее занималась проектами по научно-техническому сопровождению [НТС] инженерных изысканий в Татарстане? Или это стало возможным одновременно с защитой Вами докторской диссертации?*

**А.Л.:** Конечно, работы по НТС выполнялись компанией «КазГеоЛаб» и другими организациями и до моей защиты. Сам факт защиты докторской, наверное, оказал следующее влияние. В нашем регионе до недавнего времени не было ни одного доктора инженерно-геологических наук, и защита мной докторской диссертации стала, на мой взгляд, фактом признания наличия сложившегося регионального направления. Я более двадцати лет готовлю инженеров-геологов, многие мои ученики работают в серьезных организациях по всей стране, многие создали свой бизнес, и меня, наверное, можно считать научным руководителем инженерно-геологических исследований в Татарстане.

Само наличие ученой степени доктора, конечно, еще ничего не значит. Здесь другой момент. Сейчас заметно активизировались проекты по НТС, мы все больше и больше принимаем участие в этих работах. И это во многом связано с тем, что у нас сформировался уникальный коллектив: я являюсь спе-

циалистом как в области инженерной геологии, так и строительства, а в штате ООО «КазГеоЛаб» есть кандидаты наук в области классической геологии и гидрогеологии. Кроме того, два года назад два моих ученика защитили кандидатские диссертации по инженерной геологии, усилив наш научный потенциал. Эффективность такого коллектива не раз демонстрировалась на многих серьезных объектах.

Думаю, что сегодня благодаря моей докторской диссертации и кандидатским диссертациям моих учеников можно говорить о сложившейся у нас собственной научной школе инженерной геологии – это закономерный итог многолетней работы, официально подтвержденный научными степенями.

*Ред.: Скажите, пожалуйста, много ли вообще в Татарстане грунтовых лабораторий и насколько хорошо они оснащены современным автоматизированным оборудованием? Ведь и для обеспечения проектировщиков необходимыми данными в таких сложных инженерно-геологических условиях, и для научно-технического сопровождения, нужны предельно точные испытания грунтов, верно?*

**А.Л.:** К сожалению, таких лабораторий немного. Большинство ушли в небытие еще в 1990-е и 2000-е годы. Некоторые организации переоснастились и продолжают работать, но их мало. Например, ранее ведущей территориальной организацией в области инженерных изысканий у нас был КазГИСИЗ, но он прекратил свое существование около пятнадцати лет назад. Поэтому сказать, что в Татарстане есть мощные изыскательские организации или крупные грунтовые лаборатории,

способные решать сложные задачи, я, увы, не могу.

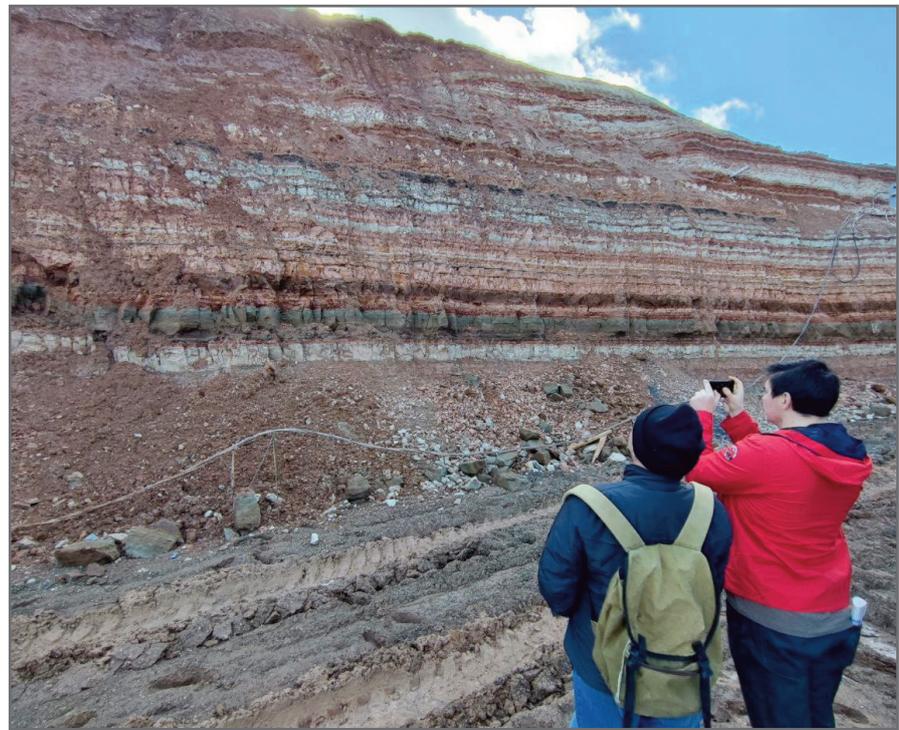
**Ред.:** А как обстоят дела у вашей лаборатории – «КазГеоЛаб»?

**А.Л.:** «КазГеоЛаб» в этом плане выделяется тем, что у нас помимо стандартного оборудования есть и собственные научные разработки. Например, мы создали специальный стенд для изучения суффозионных процессов, на который получили патент. Он позволяет моделировать условия протекания суффозии в зависимости от трещиноватости подстилающего массива.

ООО «КазГеоЛаб» в основном решает узкоспециализированные задачи, часто требующие совмещения науки и практики. Лаборатория оснащена примерно двадцатью автоматизированными комплексами для испытаний грунтов, а также различным оборудованием для определения физических свойств грунта. Этого достаточно, чтобы выполнять задачи изысканий как для строительства не слишком больших объектов, так и в рамках научно-технического сопровождения. В последнее время много обращений по определению параметров для численного моделирования, например с помощью модели Hardening Soil. В регионе такие испытания больше никто кроме нашей компании не проводит, а имеющегося у нас оборудования для этих целей вполне достаточно.

**Ред.:** Сейчас, скорее, встает не вопрос, способны ли имеющиеся лаборатории удовлетворить потребности изыскателей, а вопрос фальсификации данных. Ведь если лабораторий в Татарстане мало, а их оснащение оставляет желать лучшего, то образцы, вероятно, отправляют в другие города, где работу практически невозможно проконтролировать. К тому же известно, что даже в хорошо оборудованных лабораториях нередко встречается «рисование» протоколов, особенно если заказчик, неискушенный в вопросах инженерной геологии, сам этого хочет. Как в этой ситуации научно-техническое сопровождение способно защитить от подделок?

**А.Л.:** Пока, увы, никак. Проблема фальсификаций слишком масштабна, чтобы решить ее простым контролем. Меня, честно говоря, изумляет следующий факт: если посмотреть на то, сколько объектов возводится и сколько в республике изыскательских организаций, невольно возникает ощущение,



что порой дома строят и вовсе без изысканий. Иначе трудно представить, каким образом при таком количестве специалистов, лабораторий можно провести все необходимые работы. Возможно, подрядчиков привлекают из других регионов, но там дела с оснащенностью кадрами и оборудованием обстоят не лучше.

**Ред.:** Выходит, что в том числе благодаря вашей докторской диссертации в регион пришли и иногородние компании, которые, возможно, не так хорошо знали местные инженерно-геологические условия, а сейчас получили шанс освоиться?

**А.Л.:** Да, в некотором плане мы им помогаем. Несколько лет назад мы уже делали подобную работу по Казани, когда обработали данные по нескольким тысячам скважин, построили инженерно-геологические карты, разработали региональные таблицы. Тогда мы стояли перед выбором: либо сделать эту информацию общедоступной, либо оставить ее только для личного пользования. Однако, поскольку мы позиционируем себя не только как коммерческую организацию, занимающуюся локальными задачами, но и как научное экспертное сообщество, занимающееся подготовкой кадров, мы решили открыть эти данные. Я считаю, что обра-

зование любого специалиста не заканчивается в вузе – оно продолжается всю профессиональную жизнь.

Эта же логика легла в основу докторской по Юго-Востоку Татарстана, по которой мы сейчас готовим монографию. Я помню, как в свое время пытался сотрудничать с ТИСИЗами, которые долгие годы здесь работали и располагали бесценными архивами данных, включавшими колоссальное количество результатов полевых и лабораторных работ, штамповых испытаний, испытаний свай, статического зондирования и пр. Но, к сожалению, они не пошли на контакт – и огромный массив материалов в итоге оказался утраченным, просто «сгнил» в архивах.

Впрочем, часть данных, к счастью, удалось сохранить. Я помимо прочего являюсь сотрудником корпоративного проектного института ПАО «Татнефть», стратегического заказчика АО «Нефтехимпроект». Благодаря этому удалось обработать и систематизировать часть материалов инженерно-геологических изысканий, выполненных теми же ТИСИЗами в прошлом по заказам нефтяников. Но, безусловно, не все.

Что касается прихода в регион иногородних компаний, бояться этого, на мой взгляд, не стоит. Они и так уже работают здесь. К тому же, несмотря на доступность наших материалов, у гостей регулярно случаются ошибки, и нас же потом привлекают для выполнения научно-технического сопровождения. Мое мнение в этом вопросе однозначное: в условиях нашей страны будущей только за региональной инженерной геологией.

**Ред.:** *Могли бы Вы привести какие-нибудь примеры?*

**А.Л.:** Наверное, самым показательным случаем стала федеральная трасса М-12 на участке, проходящем через Татарстан. Столичные организации провели там изыскания, по итогам которых были приняты проектные решения. Но спустя время на некоторых участках активизировались оползневые процессы. Нас уже несколько раз привлекали к решению этих проблем, в том числе в конце прошлого года, когда мы выполняли научно-техническое сопровождение инженерно-геологических изысканий на участке схода оползня.

Сложившаяся ситуация наглядно показала, насколько важен региональный опыт. Специалисты, приезжающие из других городов, даже располагая всеми необходимыми материалами, в усло-



виях дефицита времени часто просто не успевают качественно проанализировать имеющуюся геологическую информацию. Мы же работаем тут много лет и, можно сказать, «чувствуем» особенности местных грунтов. Поэтому нам сразу бывает понятно, где велики риски оползней и как верно определять свойства тех или иных грунтов. Для М-12 благодаря нашим специалистам удалось внести необходимые корректировки и стабилизировать проблемные участки.

**Ред.:** *Кто у вас выступает в качестве основных заказчиков – в первую очередь изыскательские, проектные компании или более крупные организации? И в продолжение этого вопроса: на каком этапе вы обычно подключаетесь к проекту? Получается, большие стройки рано или поздно сталкиваются со сложностями, а вам приходится решать уже возникшие проблемы? Возможно ли подключаться раньше?*

**А.Л.:** В идеале научно-техническое сопровождение следует начинать на этапе подготовки задания на инженерные изыскания или даже на этапе технико-экономического обоснования. Это позволило бы оптимизировать процесс изысканий и предвосхитить многие проблемы. Сейчас же обычно все происходит наоборот. Нас приглашают, когда возникла проблема. Либо даже на стадии экспертизы, когда эксперт, проверяя материалы, указывает в замечаниях, что требуется НТС.

Возьмем пример той же трассы. Если бы мы подключились на стадии планировочных решений, то, возможно, предложили бы иной маршрут или корректировку прохождения дороги. Сложно представить, чтобы геолог, знакомый со спецификой местности, выбрал столь проблемный вариант. Тогда и сроки реализации, и бюджет проекта были бы значительно меньше.

Другой характерный пример: ситуация с карстом на юго-востоке региона, где строился крупный завод. Нас пригласили уже перед сдачей материалов в экспертизу. На устранение недоработок оставалось всего три недели, за которые надо было пробурить скважины глубиной 80 метров, отобрать породы, провести лабораторные исследования на минеральный состав, растворимость, выполнить необходимые расчеты. Понятно, что в режиме форс-мажора подобные работы обходятся в разы дороже, если их вообще бывает физически возможно выполнить в требуемые сроки.

Если бы мы участвовали в проекте еще до начала изысканий, то, зная проблемность данного участка, могли бы сразу порекомендовать места бурения, оптимальную глубину скважин, предложить необходимые методы исследований.

**Ред.:** *Уже несколько лет Главгосэкспертизой активно продвигается идея об экспертном сопровождении проектов, которое должно начинаться еще на стадии составления технического задания и программы работ.*

*В чем его отличие от научно-технического сопровождения?*

**А.Л.:** На мой взгляд, экспертиза – это в большей степени про проверку документации и соответствие документации техническим регламентам. При экспертном сопровождении эксперты могут указать, что нужно выполнить (скажем, сейсмическое микрорайонирование или иные обязательные работы), чтобы исполнитель об этом не забыл. Также эксперт может подсказать заказчику, что при реализации его проекта потребуются НТС. Напомню, что требования о необходимости выполнении научно-технического сопровождения на объекте четко прописаны в нормах.

Таким образом, экспертное сопровождение дает своего рода «дорожную карту» изыскателям и проектировщикам, определяя, что именно нужно сделать. А НТС выполняет иную задачу. Если говорить о целях, обозначенных в СП применительно к НТС, то там прямо указано, что это комплекс научно-исследовательских и методических работ. Понятно, что эксперт в классическом смысле не может обладать всеми компетенциями для того, чтобы, к примеру, объективно оценить угрозу развития опасного процесса в существующих условиях. С этим, кстати, я часто сталкиваюсь в своей практической деятельности как судебный эксперт. Неоднократно доводилось работать на объектах, имеющих серьезные деформации в результате развития опасных природных процессов. При этом проектная документация и результаты инженерных изысканий получили положительное заключение экспертизы. Однако это не гарантировало их реальную безопасность.

Вот здесь и проявляется ключевая разница: положительное заключение экспертизы само по себе не тождественно безопасности, а вот НТС, по сути, должно давать такую гарантию. Цель научно-технического сопровождения – обеспечить реальную безопасность объекта, а не просто проверить соответствие проектной документации требованиям регламентов. На мой взгляд, НТС подразумевает оценку конкретных рисков, выезды на площадку, дополнительные исследования и все, что требует специальных знаний. И без компетенций региональных специалистов здесь не обойтись – у нас большая страна и, если ты работаешь в своем регионе много лет, у тебя накапливается опыт, позволяющий пред-

видеть и предупреждать возможные проблемы заранее.

**Ред.:** *Сегодня научно-техническое сопровождение выглядит востребованным направлением бизнеса. С чем это связано? С возведением большого количества уникальных и сложных объектов или есть иные причины?*

**А.Л.:** Я бы не сказал, что научно-техническое сопровождение стало настолько уж распространенным. На самом деле организаций, которые этим занимаются, немного, и не только в нашем регионе. Пока это скорее точечные заказы на особо сложные или опасные объекты. Однако НТС бывает необходимо не только при строительстве уникальных или особо опасных сооружений, но и при сложных инженерно-геологических условиях. В нашем регионе такую характеристику можно дать практически всей территории. Или, к примеру, когда объект возводят в плотной городской застройке и новое здание может влиять на соседние. Здесь без НТС не обойтись: надо разбираться, как избежать негативного воздействия на окружающие здания.

**Ред.:** *Вы уже привели несколько интересных примеров проектов, реализованных под Вашим научно-техническим сопровождением. Может быть, есть еще примеры, заслуживающие внимания? Чего удалось достичь благодаря НТС?*

**А.Л.:** Я уже упоминал трассу М-12 и некоторые промышленные объекты на Юго-Востоке республики. Они принадлежат серьезным заказчикам, поэтому конкретизировать не буду. Но, если говорить об интересных проектах в целом, то в последнюю пару лет ведется масштабная работа по освоению новых территорий вокруг Казани, в основном под малоэтажное и индивидуальное жилищное строительство. Эти районы известны высокой активностью карстовых и суффозионных процессов, из-за чего ранее считались непригодными для застройки. Сейчас благодаря грамотному научно-техническому сопровождению изысканий мы можем точнее оценить карстовую и суффозионную опасность и, соответственно, проектировать объекты там, где раньше строить не решались. В том числе в ряде случаев мы можем показать, что имеет место не карст, а суффозия, что несет меньшие риски для строительства вследствие длительности ее протекания.

Мы зонировали эти территории, определяем, где можно строить без дополнительных противокарстовых мероприятий, а где необходимо предусмотреть специальные меры защиты. Под нашим контролем проводятся изыскания, разрабатываются генпланы с зонированием территории, на наиболее опасных участках устраиваются рекреационные зоны, для некоторых территорий предусматриваются специальные виды фундаментов для зданий и сооружений. Судя по результатам, работа идет успешно.

Кроме того, мы ведем масштабную работу, связанную с проведением изысканий на различных строительных объектах в Казани, в том числе в условиях плотной застройки. Один из последних проектов – жилой комплекс с тридцатипятиэтажными зданиями, что достаточно нестандартно для города с точки зрения непростых геологических условий. Дополнительную сложность вносит строящаяся линия метрополитена, которая проходит всего в пятнадцать метрах от одного из домов. Это накладывает серьезные ограничения и на сами решения по фундаментам, и на взаимодействия их с тоннелем. Метрополитен официально еще не введен в эксплуатацию, однако участок тоннеля уже построен, так что необходимо учитывать взаимное влияние высокоэтажного комплекса и метро.

Еще один проект – восстановление исторического объекта культурного наследия, так называемого дома Мергасова, расположенного в центре Казани недалеко от Кремля и геологического факультета университета. Усугубляющим фактором является зафиксированный поблизости провал 1977 года, который разрушил Александровский пассаж. В рамках этой работы мы проводим специальные карстологические исследования.

Это лишь часть наших текущих задач, где важны комплексный подход, опыт и глубокое понимание как современных технологических, так и историко-культурных аспектов. В совокупности это типичные примеры, где без НТС просто не обойтись. Задачи сложные, часто увязанные с большим количеством ведомственных и согласительных процедур (особенно для объектов культурного наследия), но грамотная команда, имеющая как научный, так и практический опыт в сфере инженерной геологии и строительства, способна реализовывать подобные проекты безопасно и с учетом всех специфических требований. **И**



## СЛОЖНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ХОДЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

### ПРОХАЧЕВ МАКСИМ

Куратор VK-сообщества «Инженерная геофизика», автор Telegram-канала «Записки геофизика-изыскателя»

### АННОТАЦИЯ

Статья посвящена рассмотрению различных геофизических методов, применяемых в ходе инженерно-геологических изысканий, а также особенностям интерпретации их результатов и их влиянию на выбор конструктивных решений.

На практике геофизические методы могут существенно повысить эффективность и точность инженерно-геологических и геотехнических оценок, однако их корректное применение сопряжено со множеством нюансов – от выбора методики для конкретных геологических условий до грамотного анализа полученных данных и их согласования с результатами инженерно-геологического бурения и лабораторных исследований образцов грунта.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

инженерные изыскания; инженерно-геологические изыскания; геотехнические изыскания; геофизические методы; комплексный подход; совместная интерпретация.

# DIFFICULT ISSUES OF USING GEOPHYSICAL METHODS IN THE COURSE OF ENGINEERING- GEOLOGICAL SURVEY

## PROKHACHEV MAKSIM

Curator of the VK community "Engineering Geophysics", author of the Telegram channel "Notes of a Geophysicist-Prospector"

## ABSTRACT

**This paper is devoted to the consideration of various geophysical methods used in engineering-geological surveys, as well as to the features of interpreting their results and their influence on the choice of design solutions.**

**In practice, geophysical methods can significantly increase the efficiency and accuracy of engineering-geological and geotechnical assessments, but the correct application of them is associated with many nuances (from the choice of a technique for specific geological conditions to competent analysis of the obtained data and coordinating them with the results of engineering-geological drilling and laboratory studies of soil samples.**

## KEYWORDS:

**engineering survey; engineering-geological survey; geotechnical survey; geophysical methods; integrated approach; joint interpretation.**

## ВВЕДЕНИЕ ►

В текущих условиях стремительного увеличения объемов инфраструктурного строительства растет и потребность в быстром и точном определении характеристик грунтовых массивов, расположенных на площадках будущих сооружений. Традиционные подходы к инженерно-геологическим изысканиям основаны на комплексных решениях, включающих инженерно-геологическое бурение, полевые и лабораторные испытания грунтов. Однако совершенствование геофизических методов заставляет специалистов по инженерно-геологическим изысканиям все чаще включать их в программы работ. Геофизика ориентирована на косвенные, неразрушающие исследования геологической среды с помощью физических полей (например, сейсмического, электромагнитного, гравитационного), что потенциально уменьшает объемы дорогостоящего и трудоемкого инженерно-геологического бурения, позволяя как минимум более акцентированно выбирать места для скважин.

Тем не менее применение геофизических методов в рамках инженерно-геологических изысканий сопровождается рядом сложных нюансов, связанных как с методическими, так и с организационно-технологическими аспектами. Важнейшая задача при этом – сформировать четкую связь между геофизическими параметрами (скоростями распространения упругих волн, электрическим сопротивлением, свойствами маг-

нитного поля и пр.) и инженерно-геологическими характеристиками грунтов (прочностью, влажностью, пористостью). И это помимо определения структуры геологической среды по полученному геофизическому разрезу.

Ошибки в трактовке корреляционных связей между геофизическими параметрами и показателями физико-механических свойств грунтов могут приводить к критическим погрешностям при оценке несущей способности оснований, устойчивости склонов, при прогнозировании осадок зданий и сооружений.

## ВЫБОР МЕТОДИКИ ►

Одна из ключевых методических проблем состоит в выборе правильной методики или, чаще всего, комплекса геофизических методов для решения конкретной инженерно-геологической или геотехнической задачи. Существуют, например, методы электрической разведки (вертикальное электрическое зондирование, электроразведка при поляризации), которые ориентированы на получение информации о геоэлектрических свойствах геологической среды, то есть об электрическом сопротивлении грунтов. Однако полученные при этом данные слабо коррелируют с механическими свойствами, если не дополнить результат данными сейсморазведочных методов (метода преломленных волн или метода отраженных волн), которые позволяют уточнить распространение продольных и поперечных сейсмических волн, выделить границы

между слоями грунтов с разными скоростями упругих волн, что дает более надежную информацию для определения плотности грунтов, их физико-механических свойств, а также потенциальной сейсмической уязвимости. Но даже здесь возникает необходимость учитывать такие факторы, как заглубленные подземные коммуникации, приповерхностные и геологические неоднородности, а также малоконтрастные границы между слоями, искажающие реальные параметры конкретного слоя.

## ПРОБЛЕМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ►

Специфика геофизических данных требует аккуратной «калибровки» результатов по материалам инженерно-геологического бурения. Несмотря на то, что сейсмические и электрические методы отличаются относительно большой производительностью в полевых условиях, ключевой этап их применения – это сопоставление их результатов с априорными данными и последующая интерпретация. Геофизик-интерпретатор, к примеру, должен сопоставлять теоретические кривые вертикального электрического зондирования, полученные при моделировании геологической среды, с реальными кривыми зондирования, учитывая и возможную анизотропию среды. Анизотропия среды может проявляться в изменении величин одних и тех же геофизических параметров в зависимости от направления, наличия трещиноватости или слоистости в породах. Поэтому важно сопоставить



и скорректировать геофизические данные по результатам инженерно-геологических полевых и лабораторных испытаний: определение плотности, модуля деформации, коэффициента пористости и прочих параметров дает возможность приблизить геофизическую модель среды к реальности (к истинным условиям геологической среды).

Кроме того, существует проблема, связанная с неоднозначностью измеренных величин при проведении полевых работ. В геофизике результат сейсмического профилирования, например, может зависеть от выбранного типа источника волн, системы регистрации, времени суток (если речь идет об уровне помех), условий возбуждения и регистрации колебаний, наличия обводнения грунтовой толщи. Электроразведка, в свою очередь, очень чувствительна к переходному сопротивлению (заземлению) электродов на границе контакта с грунтом, к обводнению и засоленности грунтовой толщи в точке наблюдения и даже к суточным, недельным, месячным и годовым флуктуациям электрофизических свойств геологической среды. Все это приводит к тому, что многие полученные геофизические модели обладают неопределенностью и требуют обязательной проверки и неоднократного корректирования.

Другим важным аспектом является вопрос глубины исследований. При проектировании фундамента или при оценке устойчивости откосов часто нужны данные только по верхней части грунтовой толщи (до глубины в первые десятки метров), в то время как слои, залегающие на большой глубине, имеют второстепенное значение. Сейсморазведка может работать в этом диапазоне, но, чтобы получить более детальное распределение скоростей, необходимо тщательно подбирать шаг приемных датчиков, расстояние между источником возбуждения и пунктами наблюдений. Ошибка в проектировании системы наблюдений ведет к большим искажениям при построении скоростных разрезов. Аналогично, при электроразведке важна правильная расстановка электродов (сетка разносов в месте наблюдения) в зависимости от необходимой глубины исследования и контрастности слоев.

Отдельным пунктом стоит сложность применения георадиолокационного профилирования (ГРПП). С одной стороны, георадар позволяет с большой детализацией выявлять подповерхностные неоднородности – геометрию залегания

слоев, пустоты в массиве, техногенные включения (фундаменты старых зданий, кабели, трубы). С другой стороны, георадар в большей степени подвержен влиянию электрической проводимости грунта, которая растет при увеличении влажности или присутствии солей и глин. Высокопроводящие грунты «глушат» сигнал, тем самым существенно ограничивая полезную глубину зондирования. Для инженерной геологии это может быть критично при оценке рисков просадок, карстообразования или локализации подземных конструкций.

Действенным подходом к решению перечисленных проблем выступает совместная интерпретация данных разных методов (при так называемых комплексных геофизических исследованиях) и совместный анализ результатов с учетом инженерно-геологических и гидрогеологических данных. В этой связи все более актуальным становится применение современных программных комплексов, способных обрабатывать различные типы данных, создавать единую геологическую модель и непрерывно уточнять ее на основании результатов дополнительного полевого или лабораторного контроля. Такие системы должны позволять учитывать не только геофизические поля, но и физико-механические параметры для прогноза поведения грунтового массива и выбора оптимальных решений по проектированию фундаментов или укрепляющих мероприятий.

### О ЧЕМ ЗАБЫВАЕТ ЗАКАЗЧИК ►

К сожалению, миф о простоте интерпретации геофизических данных все еще распространен. Нередко заказчики ожидают, что несколько дней съемки на местности и быстрое построение геофизического разреза в программном продукте смогут заменить комплексные инженерно-геологические и геотехнические изыскания. Это, конечно, не соответствует реальности. Геофизика лишь дополняет, но не отменяет необходимость инженерно-геологического бурения, полевых испытаний грунтов и лабораторного анализа образцов грунта, поскольку «точные» данные бурения дают референс для «калибровки» геофизических данных при расчете параметрических разрезов. Без такого «якоря» поток данных легко поддается неправильной интерпретации, приводя к недооценке или переоценке георисков.

Помимо этого при выполнении инженерно-геологических изысканий с применением геофизических методов недопустимо идти на компромиссы в части

квалификации исполнителей. Грамотный геофизик должен хорошо понимать основы инженерной геологии, а инженер-геолог – базовые принципы распространения упругих волн и электрического тока в грунтах. Только в этом случае возможно наладить продуктивный диалог и совместное толкование геофизических и геологических данных. Слаженное сотрудничество специалистов смежных направлений является критически важным для объективности и полноты итоговых выводов.

### ОШИБКИ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ ►

Стоит упомянуть и о практических примерах ошибок. Одним из типичных случаев выступает некорректное отождествление линзы более плотного или просадочного грунта в геофизических разрезах. Если не распознать правильную природу аномального сигнала, то итоговый отчет может привести к неверным рекомендациям по устройству фундамента.

Другая распространенная проблема – игнорирование сложного рельефа или техногенных объектов на площадке, которые меняют геометрическое положение приборов и электродов. В результате специалисты получают «скачущие» данные сопротивления или скорости упругих волн – и оператор интерпретации рискует неверно связать их с геологическими неоднородностями, хотя на практике это может являться воздействием техногенных объектов или форм рельефа.

### 3D РАЗВЕДКА ►

Наконец, важной вехой в развитии геофизических исследований для инженерно-геологических и геотехнических задач становится все более широкое применение методов трехмерных (площадных) исследований, позволяющих формировать объемную геофизическую модель участка. Однако создание и анализ трехмерных моделей требуют еще больших объемов полевых измерений, аккуратной привязки координат и сложных алгоритмов построения геофизических визуализаций. Зато при грамотной реализации 3D подход позволяет выделить сложные объекты – оползневые тела, зоны выветривания, карстовые каверны, зоны фильтрации флюидов – и детально проследить контрасты между слоями. Эти возможности особенно востребованы при проектировании крупных инфраструктурных объектов – мостовых переходов, тоннелей, высотных

зданий, плотин, где ошибки обходятся чрезвычайно дорого.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Таким образом, грамотное применение геофизических методов в инженерно-геологических и геотехнических изысканиях может значительно повысить точность и эффективность таких исследований, обеспечив целостную картину грунтового массива. Однако для этого требуется комплексный подход, сочетающий в себе надлежащую методическую подготовку, качественное оборудование, многопрофильные команды специалистов, обязательную «калибровку» геофизических показаний и обоснованную интерпретацию полученных данных. Только так можно минимизировать риски неточностей и обеспечить надежность будущих сооружений, особенно в условиях масштабного строительства и ограниченного времени на проектирование.

В заключение стоит отметить, что развитие отечественных и мировых технологий в изыскательской геофизике дает широкие возможности для еще более точного картирования грунтовых усло-



вий и выявления потенциально опасных зон. Но без глубокого понимания физики процессов, корректного получения полевых данных и тщательного сопоставления их с классическими методами инженерной геологии геофизика не сможет заменить комплексный подход в ин-

женерно-геологических изысканиях. Она должна рассматриваться как мощный инструмент в руках профессионала, позволяющий глубже проникнуть в структуру грунтового массива и создать более надежные и экономичные решения для строительной индустрии. **h**



Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал  
**ГеоИнфо**

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfoweb>



Источник фото: pexels.com. Автор фото: Franklin Pena Gutierrez

## ОБ ОЦЕНКЕ ОПОЛЗНЕВЫХ РИСКОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА

**ВАСИН МИХАИЛ**  
Обозреватель

### АННОТАЦИЯ

Недавно в журнале «Геоинфо» был опубликован адаптированный перевод [1] очень объемного обзора международной группы исследователей «Рекомендации по количественному анализу оползневых рисков», опубликованного в 2014 году в журнале *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* («Бюллетень по инженерной геологии и окружающей среде») [2]. С 2014 года прошло более десяти лет, но с тех пор мы не видели таких же емких и подробных обзоров, предназначенных для использования инженерами-геологами, работающими в направлении оценки оползневых рисков для их уменьшения или предотвращения. Однако по стопам указанного обзора [2] выходило и выходит множество статей разных авторов. Например, в 2019 году в колумбийской журнале *DYNA* была опубликована работа латиноамериканских специалистов «Оценка оползневых рисков на откосах и склонах. Методика и ее применение на практике» [3], где после небольшого, но достаточно примечательного обзора литературы на соответствующую тему была предложена общая методика оценки оползневых рисков на основе комплексного подхода, а затем был рассмотрен конкретный случай ее применения на практике. Здесь мы дадим краткий обзор материалов указанной статьи [3].

Обзор выполнен при поддержке ГК «ПЕТРОМОДЕЛИНГ» и Алексея Бершова.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

оползневый риск; оползневая опасность; количественный анализ; устойчивость; предрасположенность; подверженность; уязвимость.

# ON LANDSLIDE RISK ASSESSMENT BASED ON AN INTEGRATED APPROACH

VASIN MIKHAIL

Reviewer

## ABSTRACT

Recently, the journal "GeoInfo" published an adapted translation [1] of a very voluminous review "Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk" by an international group of researchers. The original review [2] was published in the journal "Bulletin of Engineering Geology and the Environment" in 2014. More than ten years have passed since 2014, but since then we have not seen such a capacious and detailed review intended for using by engineering geologists working in the direction of assessing landslide risks for reduction or prevention of them. However, in the footsteps of that review [2], many papers by various authors have been written and are being written. For example, in 2019, the Colombian journal "DYNA" published paper by Latin American specialists "Landslide risk assessment in slopes and hillsides. Methodology and application in a real case" [3]. After a short but quite remarkable review of the literature on the relevant topic, the authors of the paper [3] proposed a general technique for assessing landslide risks on the basis of an integrated approach, and then they considered a specific case of its application in practice. Here we will give a brief overview of the materials of that paper [3].

This review was carried out with the support of the "PETROMODELING" group of companies and Alexey Bershov.

## KEYWORDS:

landslide risk; landslide hazard; quantitative analysis; stability; vulnerability; exposure; susceptibility.

## ВВЕДЕНИЕ ►

Несмотря на имеющиеся знания о механизмах неустойчивости склонов/откосов и множества методов защиты, оползневые события по-прежнему приводят к серьезным экономическим потерям и большому количеству человеческих жертв во всем мире, особенно в менее развитых странах, где не хватает средств на дальнейшее изучение оползневых опасностей и рисков. Поэтому необходимы совместные исследования и более активные усилия в сфере соответствующих исследований [1, 2]. Здесь мы кратко рассмотрим материалы весьма примечательной в этом отношении статьи [3], написанной группой специалистов из Мексики, Эквадора и Колумбии, с привлечением небольшого количества дополнительных источников.

## О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА ►

Сначала авторы работы [3], ссылаясь на другие публикации, напоминают о том, что к различным видам оползней приводит неустойчивость склонов и откосов. Коэффициенты устойчивости участков и, соответственно, вероятность возникновения на них оползней зависят от сочетаний геологиче-

ских, гидрологических, гидрогеологических, геоморфологических условий, геодинамических процессов, частоты и интенсивности атмосферных осадков и сейсмических событий, а также от растительности, человеческой деятельности и пр. Поэтому время возникновения и даже виды возможных оползней характеризуются неопределенностью. При оценке оползневых рисков неопределенность может увеличиться из-за недостаточной достоверности данных и математических моделей, используемых для анализа. Поэтому различные виды и степень неопределенности необходимо учитывать.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ЭТАПЫ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА ►

Далее авторы напоминают, ссылаясь на другие работы, что оползневый риск определяется как вероятность возникновения потерь для подверженных опасности объектов с известной уязвимостью (предрасположенностью к получению ущерба/потерь), если в течение определенного периода возникнет оползень определенной интенсивности:

$$R_{ie|t} = f(H_i, V_e) | t, \quad (1)$$

где  $R_{ie|t}$  – риск в рассматриваемый пе-

риод;  $H_i$  – опасность интенсивностью  $i$ ;  $V_e$  – уязвимость объектов, подверженных риску,

или

$$R = \sum_i H_i \times \left[ \sum_j V_{ji} \times C_j \right], \quad (2)$$

где  $R$  – оцениваемый риск; ( $H_i$  – опасность интенсивностью  $i$ ;  $V_{ji}$  – уязвимость  $j$ -го объекта к этой опасности;  $C_j$  – стоимость или ценность  $j$ -го объекта.

Из приведенных формул видно, что в любом случае оценка оползневого риска должна включать:

- 1) анализ и оценку опасности;
- 2) определение объектов, подверженных опасности;
- 3) анализ и оценку уязвимости этих объектов;
- 4) анализ и оценку риска.

Далее эти этапы рассматриваются в работе [3] более подробно.

## ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ ►

Авторы работы [3], ссылаясь на другие статьи, напоминают, что природная опасность – это вероятность возникновения потенциально разрушительного природного явления на определенной территории в течение определенного

периода, причем для ее возникновения должны совпасть во времени предрасположенность территории к оползням и инициирующее событие, то есть:

$$H_i = f(S, P)/t, \quad (3)$$

где  $H_i$  – опасность интенсивностью  $i$ ;  $f$  – функция;  $S$  – предрасположенность территории к возникновению опасного события;  $P$  – вероятность возникновения этого события;  $t$  – период времени.

Стандартизированной методики оценки *предрасположенности* территории к оползням, по крайней мере к моменту написания статьи [3], не было. Но как указывают ее авторы, в ряде публикаций были описаны уровни предрасположенности и предложены ее классификации в соответствии с определенными критериями, в том числе с использованием карт, спутниковых снимков, результатов инвентаризаций ранее произошедших оползней, геоинформационных систем, а также оценок факторов, влияющих на предрасположенность. В самой статье [3] предлагается оценивать предрасположенность с использованием оценок ряда обуславливающих и инициирующих факторов, описанных в работе [4].

Вероятность возникновения оползневой опасности выражается либо через количество оползней, которые могут возникнуть на исследуемой территории в течение года, либо как вероятность того, что на определенном склоне/откосе произойдут оползни в течение определенного периода времени, например года. С приемлемым приближением эту вероятность можно выразить так [3]:

$$P_x = 1 - (1 - P_a)^x, \quad (4)$$

где  $P_a$  – вероятность для заданного промежутка времени;  $P_x$  – вероятность для длительного времени;  $x$  – период времени в годах.

Далее авторы напоминают, что *период повторяемости* оползней в основном зависит от периодов повторяемости интенсивных и/или длительных ливней и землетрясений определенной силы, однако оценка опасности должна проводиться для периода времени ( $x$ ), попадающего в пределы срока службы объектов, подверженных опасности.

К числу наиболее часто используемых *методов оценки вероятности возникновения оползней* авторы относят:

- использование исторических данных для исследуемой территории или территорий со сходными условиями;

**Таблица 1. Классификация оползневой опасности, рекомендуемая для ее зонирования (по [3, 5])**

Опасность	Статистические коэффициенты устойчивости	Псевдостатистические коэффициенты устойчивости
Низкая	>1,5	>1,15
Средняя	1,2–1,5	1,0–1,15
Высокая	<1,2	<1,0

- прямую оценку на основе суждений специалистов;
- применение статистических и детерминистических методов.

Для использования *статистических методов* для оценки оползневой опасности допускается, что условия территории, на которой ранее происходили оползневые события, предрасполагают к возникновению новых оползней, схожих по механизмам с предыдущими. Во многих случаях вероятность таких событий оценивается на основе диапазона частот или периодов повторяемости. При этом, как подчеркивают авторы, применение этих методов для склонов и откосов в городских зонах требует учета антропогенных факторов, которые могут изменить обуславливающие и инициирующие факторы неустойчивости.

Вероятность возникновения оползней при использовании *детерминистических методов* рассчитывается на основе анализа устойчивости, позволяющего определить наиболее вероятные поверхности скольжения и соответствующие им коэффициенты устойчивости. А по этим коэффициентам можно разделить исследуемую территорию на зоны, характеризующиеся высокой, средней или отсутствующей оползневой опасностью.

Поскольку на момент написания статьи [3] не было международного стандарта по классификации и оценке оползневой опасности, ее авторы рекомендовали использовать классификацию на основе диапазонов вероятности, предложенную в работе [5] (таблица 1). Однако они отметили, что при такой оценке необходимо учитывать уровни грунтовых вод в соответствии с периодами повторяемости.

Поскольку оценка оползневой опасности требует оценки вероятности возникновения опасных оползневых событий, то, как указывается в работе [3], для этого можно использовать определение:

- вероятности возникновения определенного опасного оползня  $P(H)$ ;
- пространственной вероятности воздействия потенциального оползня на

место расположения конкретного объекта  $P(S)$ ;

- временной вероятности воздействия потенциального оползня на движущийся объект  $P(T)$  (если объект неподвижен, то  $P(T)=1$ ).

### ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ОБЪЕКТОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ОПОЛЗНЕЙ ►

Авторы, ссылаясь на другие работы, напоминают, что уязвимость отражает степень потерь для определенного объекта или их группы в результате природного явления определенной величины и оценивается по шкале от нуля до единицы.

При анализе и оценке уязвимости к воздействию оползней необходимо учитывать физические и социальные аспекты.

К *физическим аспектам* авторы относят:

- вероятный объем или масштаб разрушения откоса или склона;
- величину, интенсивность, скорость и предполагаемое направление движения оползневой массы;
- тип, близость и пространственное распределение подверженных риску объектов (включая население);
- типы конструкций и их устойчивость/сопротивляемость (высоту, материалы, фундаменты и т.д.);
- меры по предотвращению возможных воздействий и/или по уменьшению их последствий (создание/наличие подпорных конструкций, систем мониторинга, систем раннего предупреждения и т.д.).

К *социальным аспектам* авторы относят:

- плотность населения в зоне воздействия;
- объекты, подверженные риску (население, инфраструктуру, транспорт, окружающую среду);
- ключевые виды экономической деятельности;
- степень готовности населения и местных органов власти к опасному событию;

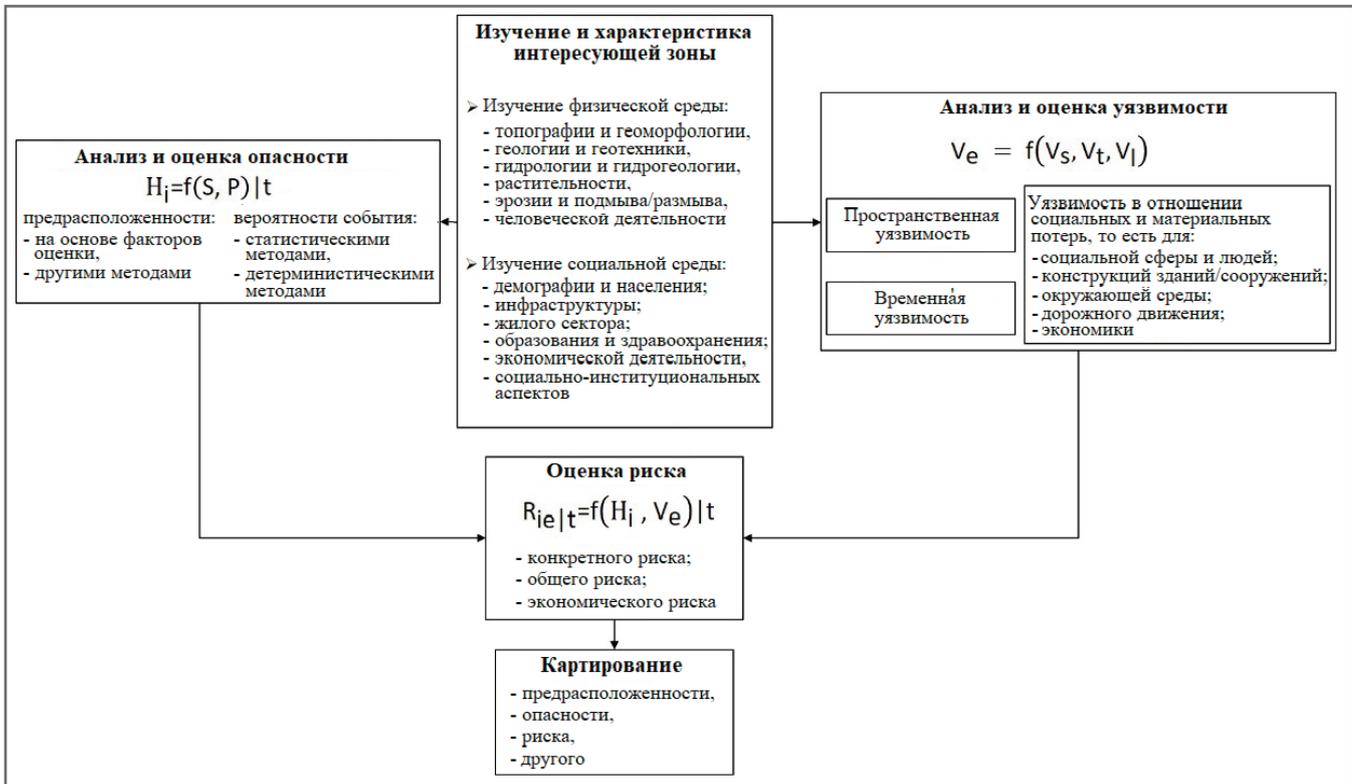


Рис. 1. Общая методика оценки оползневой риска (по [3])

- институциональный и общественный потенциал реагирования на опасное событие;
- возможность побочных эффектов.

С целью упрощения анализа и оценки авторы предлагают разделить уязвимость объектов к воздействию оползней ( $V_e$ ) на три группы:

- пространственную уязвимость ( $V_s$ ), зависящую от вероятности воздействия оползня на объект и нанесения ему ущерба;
- временную уязвимость ( $V_t$ ), зависящую от вероятности нахождения объекта в месте воздействия оползня в момент его схода (для неподвижных объектов);
- уязвимость в отношении социальных и материальных потерь ( $V_l$ ), зависящую от вероятности потерь для объекта, если он будет затронут оползнем, или для социальной сферы (жизни и здоровья людей, функционирования зданий и сооружений, дорожного движения, окружающей среды, экономики).

То есть уязвимость объекта к воздействию оползня можно представить как функцию:

$$V_e = f(V_s, V_t, V_l). \quad (5)$$

Далее авторы кратко рассказывают о рекомендациях из других работ, в которых предлагается применять те или иные показатели и их значения для оценки отдельных типов уязвимости

(физической, в том числе в зависимости от глубины фундаментов зданий/сооружений, социальной, экологической, экономической, а также для людей, находящихся на открытой местности, в транспортном средстве, в здании) в соответствии с ожидаемыми диапазонами потерь при воздействии потенциальных оползней.

### ПОСЛЕДСТВИЯ СХОДА ОПОЛЗНЯ ▶

Для оценки последствий схода оползня для подверженных опасности объектов в работе [3] приводится следующая формула:

$$C = P(S:H) \times P(T:S) \times V(L:T), \quad (6)$$

где  $P(S:H)$  – пространственная вероятность;  $P(T:S)$  – временная вероятность;  $V(L:T)$  – уязвимость (она обусловлена прежде всего наличием объекта на пути оползня именно во время этого события, то есть на практике она может меняться от одного момента к другому).

При предположении того, что оползень вызовет ущерб/потери для объекта, который будет находиться на его пути в момент его схода, будет выполняться равенство  $P(S:H)=P(T:S)=1$ . Тогда формулу (6) авторы упрощают так:

$$C = V(L:T). \quad (7)$$

### ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВОГО РИСКА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА ▶

Принимая во внимание рассмотренные выше аспекты, авторы предлагают общую методику оценки оползневой риска для откосов и склонов (рис. 4), которая включает такие этапы, как:

- 1) изучение и характеристика физической и социальной среды интересующей зоны;
- 2) анализ и оценка опасности в зависимости от предрасположенности территории к оползням (на основе факторов оценки) и от вероятности их возникновения (с помощью статистических и детерминистических методов);
- 3) анализ и оценка уязвимости объектов риска и ее компонентов (пространственной и временной уязвимости, а также уязвимости в отношении социальных и материальных потерь);
- 4) оценка риска (конкретного, общего, экономического – в зависимости от целей и объема исследования);
- 5) составление карт (предрасположенности, опасности, риска).

Более подробно эту методику авторы представили в виде блок-схемы (рис. 1).

### ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКИ НА ПРАКТИКЕ ▶

Далее, что весьма ценно, в статье [3] подробно рассматривается реальный случай

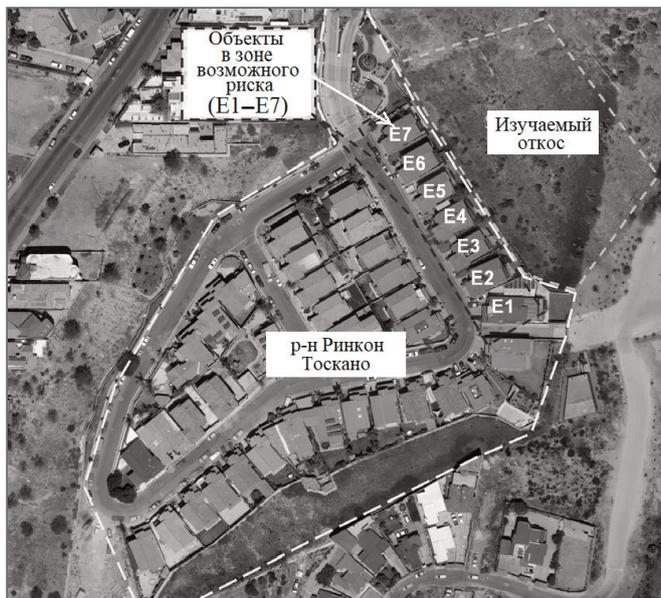


Рис. 2. Исследуемый откос и объекты, находящиеся в зоне потенциального риска (по [3])

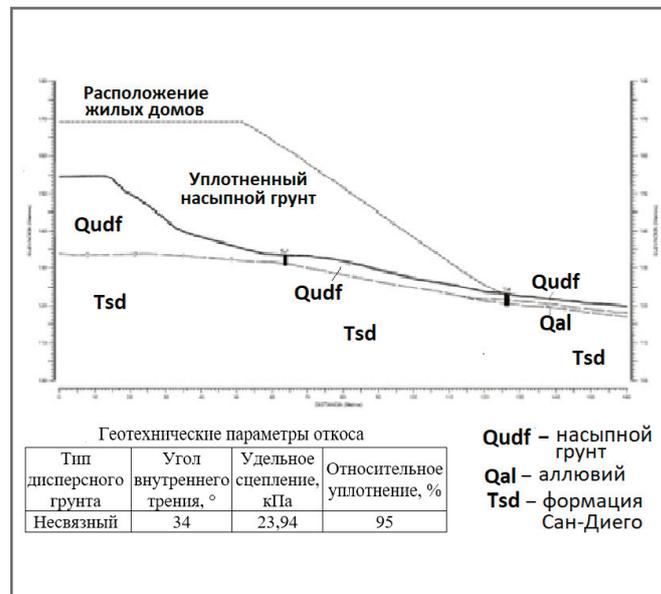


Рис. 3. Один из инженерно-геологических разрезов рассматриваемого откоса и его геотехнические параметры (по [3])



Рис. 4. Расположение девяти разрезов с шагом 20 м (от 0+000,00 до 0+160,00) для анализа устойчивости исследуемого откоса (по [3])

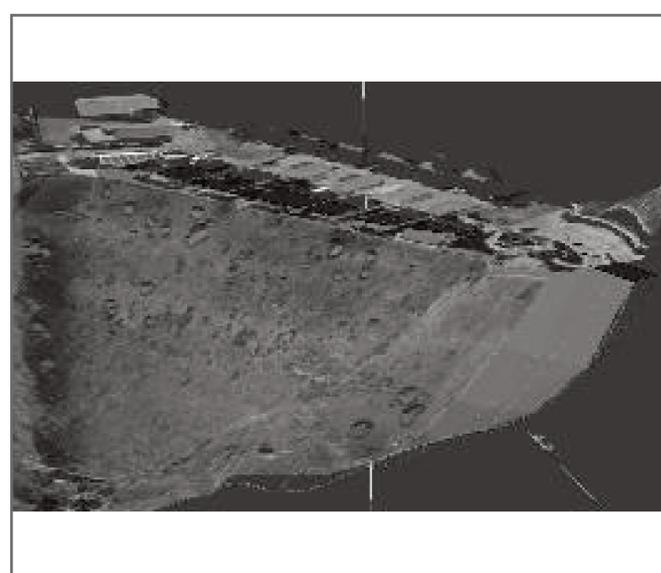


Рис. 5. Трехмерная модель откоса. Механизм разрушения (по [3])

анализа и оценки риска возникновения оползней на откосе насыпи из глинистого песка (высотой 35 м, с углом наклона 30%) и нанесения ущерба построенным на вершине откоса двухэтажным домам в черте мексиканского города Тихуана.

Жильцы этих домов заметили трещины в стенах и на земле. Как показали исследования, данные нарушения были вызваны фильтрацией воды и увлажнением насыпного грунта из-за неисправности в дренажной системе для отвода дождевой воды. Эта неисправность была устранена, но все же в рамках комплекса мер по мониторингу было решено провести оценку оползневой риска для подверженных ему объектов (семи домов – рис. 2, 3).

Для оценки оползневой риска для изучаемого откоса были выполнены все этапы рассмотренной выше методики, но здесь остановимся лишь на некоторых из них.

Как отмечают авторы, для оценки вероятности возникновения оползней на рассматриваемом откосе не применялись статистические методы, поскольку ни для этого насыпного сооружения, ни для его аналогов еще не накопились сведения об исторических оползнях. А для расчета вероятности возникновения оползня с использованием детерминистических методов было рассмотрено девять разрезов откоса, расположенных с шагом 20 м (рис. 4).

Анализ устойчивости изучаемого откоса выполнялся с учетом воздей-

ствий сейсмического ускорения (30% от силы тяжести) и 25%-ного водонасыщения грунта. Для каждого из девяти разрезов были определены: коэффициент устойчивости откоса  $K_s$ , глубина возможной поверхности скольжения, механизм разрушения, зона потенциально неустойчивого грунта, зона прогрессирующего разрушения. Результаты показали, что размеры и направления перемещения потенциальных оползней для девяти разрезов схожи.

На основе полученных данных была построена трехмерная модель откоса, на которой видны потенциально неустойчивые зоны и зоны прогрессирующего разрушения (рис. 5).

Таблица 2. Вероятность возникновения оползня (по [3, 4]).

Анализируемая характеристика устойчивости	Вероятность возникновения оползня $P$			
	поверхностного	неглубокого	глубокого	Очень глубокого
Глубина поверхности скольжения $h$	Если $h < 1,5$ м, то $P = 0,25$ , неустойчивость	Если $h = 1,5 \div 5,0$ м, то $P = 0,50$ , предел устойчивости	Если $h = 5,0 \div 12,5$ м, то $P = 0,75$ , предел устойчивости	Если $h = 12,5 \div 20$ м, то $P = 1$ , устойчивость
Коэффициент устойчивости $K_y$	Если $K_y < 1$ , то $P = 1$	Если $K_y = 1 \div 1,3$ , то $P = 0,75$		Если $K_y > 1,3$ , то $P = 0$

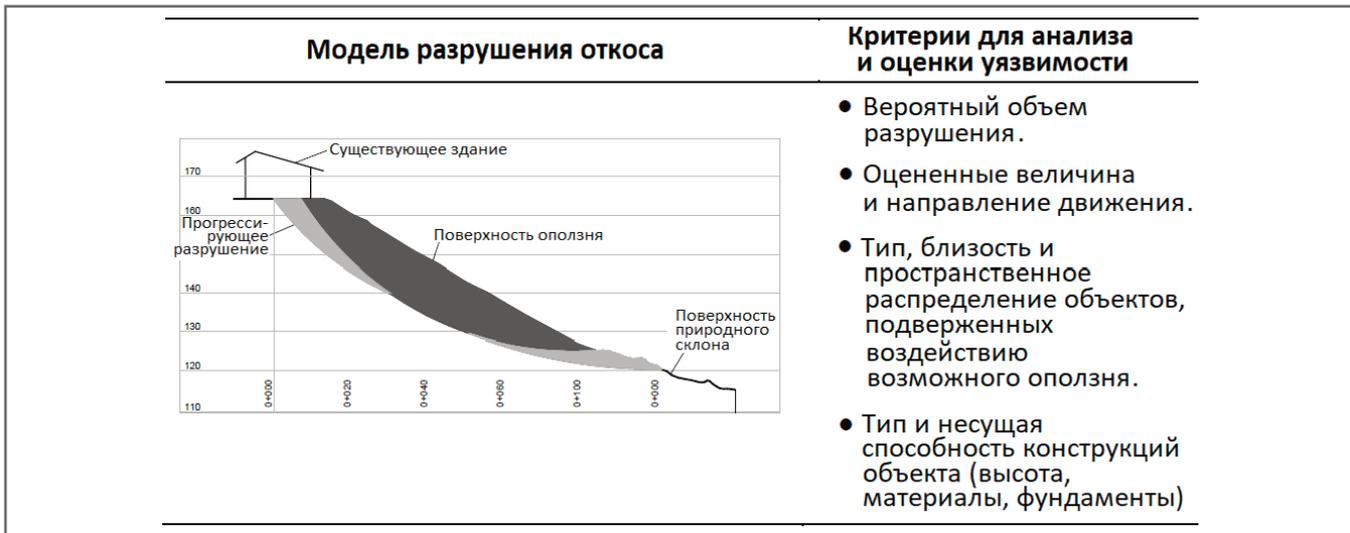


Рис. 6. Модель разрушения откоса для одного из разрезов и критерии для анализа и оценки уязвимости семи двухэтажных домов на вершине откоса (по [3])

Таблица 3. Уязвимость подверженного риску здания

Тип уязвимости	Описание	Значение	Пояснение
В отношении пространственного эффекта ( $V_s$ )	Выражает ожидаемый диапазон потерь в конструкции в зависимости от вероятности того, что оползень окажет воздействие на здание	0,25	Ожидается, что локальные повреждения составят 25% от конструкции здания
В отношении временного эффекта ( $V_t$ )	Выражает вероятность того, что здание будет находиться на пути оползня в момент его схода	1,00	Здание находится на пути оползня в момент его схода
В отношении социальных и материальных потерь ( $V_r$ )	Выражает ожидаемые потери в конструкциях здания в зависимости от глубины фундамента и глубины оползня	1,00	Глубина оползня превышает 10 м
Уязвимость объекта (здания) 0,75			

Далее для каждого разреза на основе результатов анализа устойчивости с использованием факторов оценки, предложенных в статье [4], авторами работы [3] были получены вероятности возникновения разных оползней (таблица 2). При этом общая вероятность возникновения оползня – это среднее значение из вероятностей, полученных при анализе поверхности скольжения и  $K_y$ .

В соответствии с коэффициентами устойчивости и вероятностями возникновения оползней было выполнено

зонирование исследуемой территории по оползневой опасности – низкой и средней.

Предрасположенность исследуемого откоса к оползням была получена с использованием оценки влияния параметров, не учитываемых детерминистическими методами.

Был проведен количественный анализ предрасположенности откоса к оползням и опасности их возникновения как результата взаимодействия предрасположенности и вероятности

схода оползня с учетом критических коэффициентов устойчивости.

Анализ и оценка уязвимости выполнялись для указанных выше семи домов на вершине исследуемого откоса. Для этих объектов ожидаемая степень потерь и разрушений в результате воздействия возможного оползня оценивалась на основе модели разрушения откоса и ряда критериев (рис. 6).

Все семь зданий были расположены на одинаковом расстоянии от бровки откоса и имели схожие характеристики,

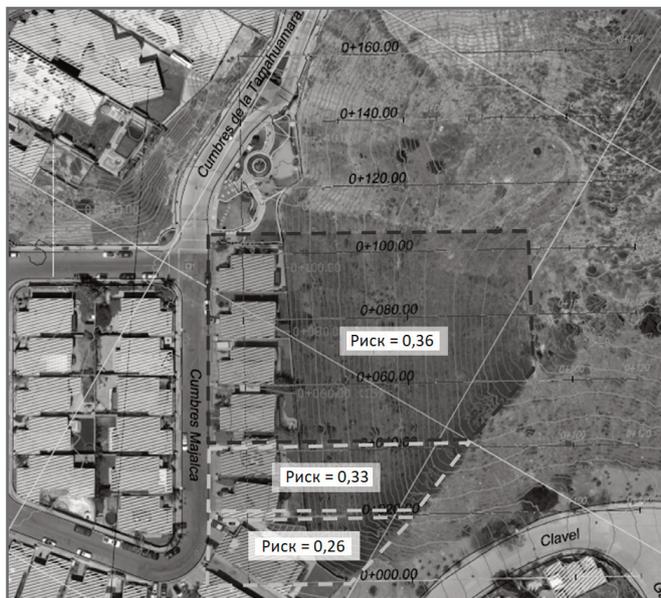


Рис. 7. Зонирование конкретных рисков для исследованного участка

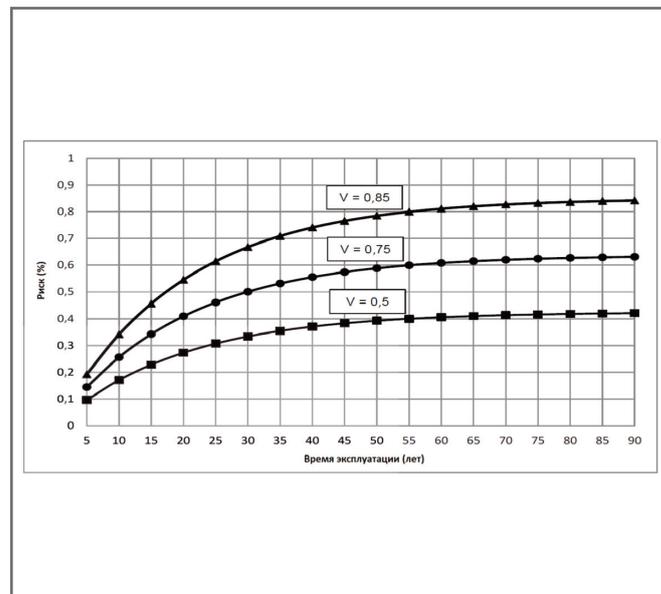


Рис. 8. Развитие рисков во времени при разной уязвимости (V) при периоде повторяемости 20 лет

как и все девять разрезов этого откоса. Были получены величины уязвимости такого здания (таблица 3). При этом социальная (человеческая) уязвимость была принята равна нулю, поскольку пострадавших людей не ожидалось.

На основе полученных оползневой опасности для исследуемого откоса и уязвимости подверженных риску объектов были количественно определены риски для конкретных зданий, которые расположены на вершине данного отко-

са. И было выполнено зонирование этих конкретных рисков на карте (рис. 7).

Также были построены кривые развития рисков во времени для подверженных ему объектов, для которых опасность является более высокой, при разной уязвимости (V) с учетом периода повторяемости 20 лет (рис. 8).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ ▶

Итак, в работе [3] была рассмотрена общая методика оценки оползневой

риска на основе комплексного подхода. И был разобран пример использования этой методики на практике. Ее применение, по мнению предложивших его авторов, значительно снижает неопределенность для проектов, для которых устойчивость склонов/откосов играет ключевую роль, и поэтому может быть ценным инструментом в руках проектировщиков и органов власти для предотвращения катастрофических событий, связанных с оползнями. **и**

#### Список литературы ▶

1. Короминас Х., Ван Вестен К., Фраттини П., Кашини Л., Мале Ж.-П., Фотопулу С., Катани Ф., Ван Ден Экхаут М., Мавроули О., Альярди Ф., Питилакис К., Винтер М.Г., Пастор М., Ферлизи С., Тофани В., Эрвас Й., Смит Дж.Т. Рекомендации по количественному анализу оползневых рисков // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 12. С. ...-... DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-12-...-....
2. Corominas J., Van Westen C., Fratini P., Cascini L., Malet J.-P., Fotopoulou S., Catani F., Van Den Eeckhaut M., Mavrouli O., Agliardi F., Pitilakis K., Winter M.G., Pastor M., Ferlisi S., Tofani V., Hervás J., Smith J.T. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2014. Vol. 73. № 2. P. 209–263. DOI:10.1007/s10064-013-0538-8. URL: [https://www.researchgate.net/publication/259032330\\_Recommendations\\_for\\_the\\_quantitative\\_analysis\\_of\\_landslide\\_risk](https://www.researchgate.net/publication/259032330_Recommendations_for_the_quantitative_analysis_of_landslide_risk).
3. Oliva-Gonzalez A.O., Ruiz-Pozo A.F., Gallardo-Amaya R.J., Jaramillo H.Yu., Landslide risk assessment in slopes and hillsides. Methodology and application in a real case // DYNA. 2019. January – March. Vol. 86. № 208. P. 143–152. ISSN 0012-7353 DOI: <http://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.72341>.
4. Cuanalo O.A., Oliva A.O., Gonzalez C. Estabilidad de laderas. Analisis mediante factores de valuacion // Revista IngeoPress. 2007. № 164. P. 38–44.
5. Lopez P.A. Analisis de umbrales de precipitacion de procesos de remocion en masa, en laderas urbanizadas de la costa de Chile centro-sur // Cuadernos de Geografia: Revista Colombiana de Geografia. 2015. Vol. 24. № 2. P. 93–112. DOI:10.15446/rcdg.v24n2.50212.



<https://t.me/geoinfonews>

