# ISSN 1993-5056 (Print) ISSN 2587-8247 (Online) **KHAREHERHARA GEOLOGY KORLD** VOL. XV \* TOM XV \* 1/2020 \*

При поддержке:





Ассоциация кенерные изыскания

#### ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ Международный научный журнал

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издается с мая 2006 г. Выходит 4 раза в год.

> ISSN: 1993-5056 (Print), ISSN: 2587-8247 (Online) Префикс DOI: 10.25296

В журнале публикуются статьи ведущих специалистов в различных отраслях инженерной и экологической геологии. Основные темы история, теория и методология инженерной и экологической геологии, грунтоведение, инженерная геодинамика, региональная инженерная геология, механика грунтов, техническая мелиорация грунтов, инженерная геооргия криолитозоны, гидрогеологические исследования, инженерная геофизика, сохранение памятников культуры и многие другие вопросы.

#### учредитель

000 «Геомаркетинг», 115088, РФ, Москва, ул. Машиностроения 1-ая, д. 5

#### ИЗДАТЕЛЬСТВО

000 «Геомаркетинг», 115088, РФ, Москва, ул. Машиностроения 1-ая, д. 5

#### РЕДАКЦИЯ

Кондратьева Екатерина Андреевна Генеральный директор

Аверкина Татьяна Ивановна Литературный редактор

Кашкина Марина Сергеевна Отдел рекламы

Якимчик Ольга Леонидовна Отдел подписки

#### АДРЕС РЕДАКЦИИ

000 «Геомаркетинг» 107076, РФ, Москва, ул. Электрозаводская, д. 60 Тел. +7 495 210-63-90, +7 495 210-63-06 E-mail: info@geomark.ru http://deomark.ru

ИП Гилманов М.А. Допечатная подготовка, дизайн и верстка

#### ТИПОГРАФИЯ

ООО «ТЕКС-ПРИНТ», 107023, РФ, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 49

Свидетельство о регистрации средства массовой информации: ПИ № ФС77-48918 от 12 марта 2012 г.

Подписка может быть оформлена в редакции, через Агентство «Роспечать», ГК «Урал-Пресс», ООО «Информнаука» (подписной индекс 36611).

Электронная версия: www.geomark.ru/our\_journal/inzhenernaya-geologiya/

https://elibrary.ru/title\_about.asp?id=28249

Подписано в печать 31.03.2020.

Формат издания 50х70/8. Бумага глянцевая. Печать офсетная.

Тираж 1 500 экз.

В статьях представлена точка зрения авторов, которая может не совпадать с мнением редакции журнала.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.

© 000 «Геомаркетинг», 2020

Фото на обложке: https://pbs.twimg.com/media/EOnxmuAX4AABQze.jpg

#### ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДИНАМИКА

Динь Т.Х., Фоменко И.К., Вязкова О.Е., Сироткина О.Н. Изучение условий возможной потери устойчивости дамб в период паводка (на примере дамбы г. Ханой) 6 ГРУНТОВЕДЕНИЕ

#### Васенин В.А.

Метод определения давления переуплотнения на основе статистических зависимостей распределения индекса компрессии. Часть 3. Верификационные возможности метода и основные причины переуплотнения грунтов на территории 20 Санкт-Петербурга Фролова Ю.В., Рычагов С.Н., Чернов М.С., Суровцева К.И., Кузнецов Р.А., Большаков И.Е. Инженерно-геологические аспекты изменения вулканогенных пород в зоне кислотного выщелачивания Южно-Камбальных термальных полей (Южная Камчатка) 36 ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ Комаров И.А. Термодинамическое описание фазового и химического равновесия влаги в дисперсных мерзлых и промерзающих грунтах. Часть 1 52 ПРИЛОЖЕНИЕ Алешин А.С. Николай Иванович Кригер: ученый, воин, личность 70 Карта общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016. Введена в действие с 26 июня 2020 г. с Изменением № 1 к СП 14.13330.2018 Приказом Минстроя РФ 76 № 886/пр от 26 декабря 2019 г. КНИЖНОЕ ОБОЗРЕНИЕ Трофимов В.Т. Теоретические аспекты геоэкологии 80 Shpolyanskaya N.A. **Development of the Russian Arctic permafrost zone** in late Cenozoic 80 Королев В.А. Методология научных исследований в инженерной геологии 81 Мирный А.Ю. Осесимметричное трехосное сжатие в практике инженерных изысканий 81



#### ENGINEERING GEODYNAMICS

Dinh T.H., Fomenko I.K., Vazkova O.E., Sirotkina O.N. Studying the conditions of possible stability loss of dams during the flood period (by the example of the dam of Hanoi)

SOIL SCIENCE

#### Vasenin V.A.

The method of determining the overconsolidation pressure based on the statistical dependencies of the distribution of the compression index. Part 3. Verification possibilities of the method and the main causes of the soil preconsolidation on the territory of Saint Petersburg 20

Frolova J.V., Rychagov S.N., Chernov M.S., Surovtseva K.I., Kuznetsov R.A., Bolshakov I.E.

Engineering-geological aspects of volcanic rocks alteration under the acid leaching in the South Kambalny thermal fields (South Kamchatka)

ENGINEERING GEOLOGY OF PERMAFROST

#### Komarov I.A.

Thermodynamic description of phase and chemical equilibrium of water in frozen and freezing soils. Part 1

SUPPLEMENT

Aleshin A.S. Nikolai Ivanovich Krieger: scientist, warrior, personali

General seismic zoning map of the territory of Russian Federation GSZ-2016. Put into force since 26 June 2020 within the Amendment No. 1 of the SP 14.13330.2018, according to the administrative Order of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation No. 886/пр, 26 December 2019

#### **BOOK REVIEW**

Trofimov V.T.

Theoretical aspects of environmental geology

Shpolyanskaya N.A. Development of the Russian Arctic permafrost zone in late Cenozoic

Korolev V.A.

The methodology of scientific research in engineering geology

Mirnyy A.Yu. Axisymmetric triaxial compression in engineering surveys



Cover photo: https://pbs.twimg.com/media/EOnxmuAX4AABQze.jpg

## ENGINEERING GEOLOGY WORLD

The journal is included in the Russian List of peer-reviewed scientific publications, which should publish the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Science and Doctor of Science.

Published since May 2006. Issued 4 times a year.

6

ISSN: 1993-5056 (Print), ISSN: 2587-8247 (Online) Prefix DOI: 10.25296

The journal publishes articles of leading experts in the field of engineering and ecological geology. The main topics are history, theory and methodology of engineering and ecological geology, soil science, engineering geodynamics, regional engineering geology, soil mechanics, technical melioration of soils, engineering geology of cryolithozones, hydrogeological investigations, engineering geophysics, preservation of cultural monuments and many other issues.

FOUNDER

36 "Geomarketing" LLC, 115088, Russian Federation, Moscow, Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5

PUBLISHER

52

70

"Geomarketing" LLC, 115088, Russian Federation, Moscow, Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5

JOURNAL EDITORING

Ekaterina A. Kondratieva General Director

Tatyana I. Averkina Literary Editor

Marina S. Kashkina Advertising Department

Olga L. Yakimchik Subscription Department

76 CONTACTS

"Geomarketing" LLC 107076, Russian Federation, Moscow, Elektrozavodskava St., 60

80 Tel. +7 495 210-63-90, +7 495 210-63-06 E-mail: info@geomark.ru http://geomark.ru

80 Individual entrepreneur Gilmanov M.A. Prepress, Design and Layout

PRINTING HOUSE

81 "TEKS-PRINT" LLC, 107023, Russian Federation, Moscow, Bolshaya Semenovskaya St., 49

Certificate of registration of mass media: PI № ФС77-48918 12 March 2012.

81 Subscription can be issued in the editorial board, through "Rospechat" agency, GK "Ural-Press", "Informnauka" LLC (subscription index 36611)

Electronic version: www.geomark.ru/our\_journal/inzhenernaya-geologiya/

https://elibrary.ru/title\_about.asp?id=28249

Signed in print 31 March 2020.

Edition format 50x70/8. Glossy paper. Offset printing.

Edition 1 500 psc.

The article presents the authors' point of view, which may not coincide with

the opinion of the editorial board.

The editorial board is not responsible for the content of advertising materials.

## ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕНЕНИЯ ВУЛКАНОГЕННЫХ ПОРОД В ЗОНЕ КИСЛОТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЮЖНО-КАМБАЛЬНЫХ ТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА)

#### ФРОЛОВА Ю.В.\*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, ju\_frolova@mail.ru Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия

#### РЫЧАГОВ С.Н.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, rychsn@kscnet.ru Адрес: б-р Пийпа, д. 9, г. Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия

#### ЧЕРНОВ М.С.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, miha.chernov@yandex.ru

#### СУРОВЦЕВА К.И.

Школа № 1517, г. Москва, Россия, ks.surovtseva@gmail.com Адрес: ул. Живописная, д. 11, корп. 1, г. Москва, 123103, Россия



#### КУЗНЕЦОВ Р.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, ruslanalexeevich@yandex.ru

#### БОЛЬШАКОВ И.Е.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, bolshakov.ilya.210@yandex.ru

Оригинальная статья Поступила в редакцию 17.02.2020 / Принята к публикации 25.03.2020 / Дата публикации 31.03.2020 © ООО «Геомаркетинг», 2020

#### Аннотация

В последние десятилетия в мире происходит активное хозяйственное и туристическое освоение геотермальных районов, которое предполагает изучение инженерно-геологических условий территорий, включая оценку физико-механических свойств слагающих их пород. В России с точки зрения использования геотермальных ресурсов наиболее благоприятным является Курило-Камчатский регион, насчитывающий десятки гидротермальных систем. В пределах гидротермальных систем происходит масштабное изменение вмещающих пород и их свойств. В статье рассматривается изменение вулканогенных пород в приповерхностной зоне двух термальных полей Южно-Камбальной группы, расположенных на юге п-ва Камчатка. Выделены последовательные стадии преобразования пород под действием термальных вод и пара. Анализируется изменение их минерального состава, микростроения, пористости, физических и физико-механических свойств в зависимости от степени и характера гидротермальной переработки. Установлено, что исходные андезиты и андезибазальты постепенно трансформируются в глины, образующие покров на термальных полях мощностью несколько метров, а также в кремнистые породы (серные опалиты и вторичные кварциты), обычно слагающие возвышенные участки в пределах поля. Эти процессы сопровождаются закономерным выщелачиванием и разуплотнением пород, снижением их деформационных и прочностных свойств. Среди всех показателей физических свойств, наиболее тесная корреляция со степенью изменения пород обнаружена для магнитной восприимчивости. Показано, что гидротермальные преобразования вулканогенных пород, сопровождающиеся изменением их физико-механических свойств, свойств, наиболее тесная корреляция со степенью изменения пород обнаружена для магнитной восприимчивости. Показано, что гидротермальные преобразования вулканогенных пород, сопровождающиеся изменением их физико-механических свойств, способствуют развитию широкого курга геологических процессов и явлений, включая возникновение оползней, миграцию поверхностных термопроявлений, изменение рельефа, деформацию поверхности и другие

#### Ключевые слова:

термальное поле; андезибазальты; вторичные минералы; физико-механические свойства; опалиты; гидротермальные глины; вторичные кварциты

#### Благодарности:

работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-00102). Авторы благодарны коллегам из лаборатории геотермии ИВиС ДВО РАН за совместные полевые исследования. Также авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику В.В. Крупской, инженерам С.В. Закусину, С.А. Гараниной за выполнение минерального анализа исследуемых пород методом рентгеновской дифрактометрии. Исследования проведены с использованием оборудования, полученного в рамках реализации Программы развития Московского университета.

#### Ссылка для цитирования:

Фролова Ю.В., Рычагов С.Н., Чернов М.С., Суровцева К.И., Кузнецов Р.А., Большаков И.Е., 2020. Инженерно-геологические аспекты изменения вулканогенных пород в зоне кислотного выщелачивания Южно-Камбальных термальных полей (Южная Камчатка). Инженерная геология, Том XV, № 1, с. 36–51, https://doi.org/10.25296/1993-5056-2020-15-1-36-51.

## ENGINEERING-GEOLOGICAL ASPECTS OF VOLCANIC ROCKS ALTERATION UNDER THE ACID LEACHING IN THE SOUTH KAMBALNY THERMAL FIELDS (SOUTH KAMCHATKA)

**KSENIA I. SUROVTSEVA** 

**RUSLAN A. KUZNETSOV** 

ruslanalexeevich@yandex.ru

bolshakov.ilya.210@yandex.ru

ILYA E. BOLSHAKOV

School No. 1517, Moscow, Russia, ks.surovtseva@gmail.com

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,

Address: Bld. 11, Pde 1, Zhivopisnaya St., 123103, Moscow, Russia

#### JULIA V. FROLOVA\*

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, ju\_frolova@mail.ru Address: Bld. 1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

#### SERGEY N. RYCHAGOV

Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Science, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, rychsn@kscnet.ru Address: Bld. 9, Piip Blv., 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

#### **MIKHAIL S. CHERNOV**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, miha.chernov@yandex.ru

Original paper Received 17 February 2020 / Accepted 25 March 2020 / Published 31 March 2020 © "Geomarketing" LLC, 2020

#### Abstract

In recent decades, there has been an active economic and tourist development of geothermal areas all over the world, which involves the study of the engineering geological conditions of the territories, including the assessment of the physical-mechanical properties of the rocks. In Russia the richest geothermal heat reservoirs occur in the Kuril-Kamchatka region with dozens of hydrothermal systems. Large-scale change in the host rocks and their properties occurs within hydrothermal systems. The paper discusses the change in volcanic rocks in the subsurface horizon on two thermal fields of the South Kambalny group, located in the south of the Kamchatka Peninsula. The successive stages of the rocks transformation under the action of thermal water and steam are distinguished. Changes in their mineral composition, microstructure, porosity, and physical-mechanical properties are analyzed depending on the degree and type of hydrothermal alteration. It was established that the initial andesites and andesite basalts are gradually transformed into clays forming a cover several meters thick in the thermal field, as well as into siliceous rocks (sulphur opalites and secondary quartzites), which compose elevated areas within the field. These processes are accompanied by regular leaching and softening of rocks, a decrease in their deformation and strength properties. Among all physical properties, the closest correlation with the degree of alteration in rocks is found for magnetic susceptibility. It is shown that hydrothermal transformation of volcanic rocks, accompanied by a change in their physical-mechanical properties, contributes to the development of a wide range of geological processes and phenomena, including the occurrence of landslides, migration of surface thermal manifestations, a change in topography, surface deformation, etc.

#### Key words:

thermal field; basaltic andesites; secondary minerals; physical-mechanical properties; opalites; hydrothermal clays; secondary quartzites

#### Acknowledgments:

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-05-00102). The authors are grateful to colleagues from the Geothermal Laboratory of the Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences for joint field studies. The authors also thank the senior researcher V.V. Krupskaya, engineers S.V. Zakusin and S.A. Garanina for performing a mineral analysis of the studied rocks by X-ray diffractometry. The studies were carried out using equipment obtained as part of the Moscow University Development Program.

#### For citation:

Frolova J.V., Rychagov S.N., Chernov M.S., Surovtseva K.I., Kuznetsov R.A., Bolshakov I.E., 2020. Engineering-geological aspects of volcanic rocks alteration under the acid leaching in the South Kambalny thermal fields (South Kamchatka). Engineering Geology World, Vol. XV, No. 1, pp. 36–51, https://doi.org/10.25296/1993-5056-2020-15-1-36-51.

#### Введение

В последние десятилетия во всем мире происходит активное освоение геотермальных месторождений с целью тепло- и электрификации, включая бурение эксплуатационных и реинжекционных скважин, строительство дорог, трубопроводов, зданий геотермальных электростанций и пр. Помимо этого, геотермальные районы славятся горячими источниками, гейзерами и другими термопроявлениями, что привлекает множество туристов. Естественно, что хозяйственное и туристическое освоение таких районов предполагает изучение инженерно-геологических условий территорий, включая оценку физико-механических свойств слагающих их пород. Как правило, вулканогенные породы отличаются достаточно высокими значениями прочностных свойств и низкой деформируемостью под нагрузкой. Между тем фильтрующийся термальный флюид вызывает масштабные изменения состава и свойств вмещающих пород. Некоторые из этих изменений приводят к негативным



Рис. 1. Места отбора образцов на Южно-Камбальных термальных полях: а — Дальнем, b — Центральном. Фото Ю.В. Фроловой (a), М.С. Чернова (b)

Fig. 1. Sampling points of the South Kambalny thermal fields: a — Far, b — Central. Foto by J.V. Frolova (a) and M.S. Chernov (b)



Рис. 2. Ряд пород, отражающий степень гидротермального изменения — от исходного андезибазальта (слева) до вторичных кварцитов (справа). Южно-Камбальное Дальнее термальное поле. Фото К.И. Суровцевой

Fig. 2. A series of rocks reflecting the degree of hydrothermal change - from the initial basaltic andesite (left) to secondary quartzites (right). South Kambalny Far thermal field. Foto by K.I. Surovtseva

> последствиям, вызывая разуплотнение пород, повышение их пористости, существенное снижение физико-механических характеристик, вплоть до превращения вулканогенных пород в гидротермальные глины [18].

> Вопрос о влиянии гидротермальных процессов на физические и физико-механические свойства вулканогенных пород актуален для различных геотермальных регионов мира [19-24, 26, 29, 30]. На примере различных гидротермальных систем показано, что динамика изменения свойств пород под действием гидротерм может быть различной. В частности, во многих публикациях содержится информация о снижении значений физико-механических свойств в результате гидротермальных преобразований [16, 24, 25]. В других работах приводятся данные, что тенденция изменения свойств пород неоднозначна и может быть разнонаправленной в зависимости от ряда факторов [15, 20, 28-30]. В целом, вопрос об изменении физико-механических свойств пород под действием термальных вод далек от разрешения и остается весьма актуальной задачей.

> В России наиболее благоприятной территорией с точки зрения использования геотермальных ресурсов является Курило-Камчатский регион. Так, на Камчатке выделено более 20 современных высоко- и низкотемпературных гидротер

мальных систем, используемых для выработки электрической (Паужетская и Мутновская) и тепловой (Паратунская, Эссовская) энергии [12]. Перспективными являются разбуренные, но не эксплуатируемые в настоящее время Больше-Банное, Киреунское, Нижне-Кошелевское и другие геотермальные месторождения, общие запасы которых многократно превышают потребности Камчатского края в электрической и тепловой энергии. По-видимому, в будущем геотермальная энергетика неизбежно будет развиваться на Камчатке и Курильских островах, что повлечет за собой наукоемкое хозяйственное освоение новых территорий.

Паужетско-Камбально-Кошелевский геотермальный (рудный) район, расположенный на самом юге Камчатки, является одним из крупнейших в Курило-Камчатском регионе [9]. В состав района входят следующие основные геотермальные структуры: Паужетская гидротермальная система; Кошелевский вулканический массив, включающий длительно живущую гидротермально-магматическую и современную газо-гидротермальную систему; Камбальный вулканический хребет с многочисленными термоаномалиями.

Объектом исследования данной работы являются термальные поля Южно-Камбальной группы Камбального вулканического хребта.

Цель работы — выявить закономерности в изменении состава, строения и свойств вулканогенных пород на Южно-Камбальных термальных полях, показать стадии переработки пород и сопутствующие им изменения физико-механических свойств.

#### Геологические условия

Камбальный вулканический хребет представляет собой резургентное<sup>1</sup> тектоно-магматическое поднятие в структуре Паужетской вулкано-тектонической депрессии четвертичного возраста и является одной из крупнейших геотермальных систем Южной Камчатки [2, 7, 13]. С юга хребет замыкает действующий вулкан Камбальный базальтового состава, последнее извержение которого произошло в марте-апреле 2017 г. [11]. Основная часть хреб-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Резургентным называют поднятие, наложенное на структуру кальдеры на заключительном этапе ее развития, образующееся в результате подъема больших масс магматического материала, которые обнаруживаются в своде поднятия в виде интрузий и субвулканических тел.

та сложена цепочкой стратовулканов, экструзиями и субвулканическими телами плиоцен-плейстоценового возраста от андезидацитового до базальтового состава. Преобладают породы среднего состава, как правило, пропилитизированные и аргиллизированные.

Вдоль осевой части хребта, вытянутого субмеридионально на 18–20 км, располагаются три группы термальных полей: Северо-, Центрально- и Южно-Камбальные [1]. Каждая группа, вероятно, представляет собой крупную современную гидротермальную систему. Предполагается, что «отдельные» гидротермальные системы хребта Камбальный имеют гидродинамическую связь и единое тепловое и водное питание [10, 11].

Особый интерес представляет собой группа Южно-Камбальных термальных полей (далее т/п), приближенных к действующему вулкану. В этой части хребта исследователи выделяют сложный вулкан Термальный [8] или Северный Камбальный [2] средне-позднеплейстоценового возраста андезидацитового-андезибазальтового состава. Южно-Камбальная группа включает 3 т/п: Дальне-, Центрально- и Ближне-Камбальное (соответственно: ЮКД, ЮКЦ и ЮКБ). Работа выполнена на двух первых термальных полях.

ЮКД т/п расположено наиболее близко к Камбальному вулкану. Оно вытянуто на 1,2 км по V-образной долине крупного ручья — истока р. Этамынк. Термопроявления представлены грязеводными котлами, парогазовыми струями, парящими площадками. Температура воды в кипящих «котлах» и пара на устьях струй достигает 103– 104°С, отложений вблизи дневной поверхности — 107°С. В составе термальных вод преобладают слабокислые и кислые сульфатные растворы, в составе газа — углекислый газ и сероводород. Поверхность термального поля сложена гидротермальными глинами и опалитами зоны сернокислотного выщелачивания и в различной степени измененным делювием.

ЮКЦ т/п приурочено к кольцевой морфоструктуре диаметром ~ 1000-1200 м, по-видимому, представляющей собой эродированный кратер одного из конусов вулкана Термальный. По периферии морфоструктуры протягивается узкий гребень, сложенный лавами андезитов и андезибазальтов, незначительно подверженных гидротермальным изменениям. Термальное поле размером ~ 600×600 м находится в центральной части кратера. Термопроявления представлены кипящими водными и грязеводными котлами, пульсирующими источниками, парогазовыми струями и парящими площадками. Поверхностные отложения представлены гидротермальными глинами. Температура источников и глинистых отложений на дневной поверхности не превышает 98-100°С. ЮКЦ, в отличие от многих других термальных полей района, характеризуется проявлением контрастных физико-химических условий в зоне разгрузки парогидротерм: рН вод колеблется от 3,6 до 7,5 единиц, Eh — от +260 до -200. Минерализация достигает 4 г/л, что также не характерно для поверхностных разгрузок термальных вод (обычно общая соленость ниже 0,8-1,5 г/л). В крупных «котлах», насыщенных углекислым и сернистыми газами, и в пульсирующих источниках центральной части поля преобладают щелочные гидрокарбонатно-сульфатные аммониевые (кальций-аммониевые) воды. В то же время источники с нейтральными и щелочными растворами перемежаются с кислыми. По-ви-





Fig. 3. Section of hydrothermal clays, open pit UKD-1/12 and changes in soil temperature along the section (South Kambalny Far thermal field). Circles indicate sampling points; samples for which properties were determined are highlighted in red. Foto by M.S. Chernov

димому, на ЮКЦ разгружается поток глубинных восходящих минерализованных парогидротерм щелочного типа [10]. При смешении парогидротерм с метеорными водами и конденсатом пара формируются кислые термальные воды также с повышенной минерализацией.

#### Фактический материал

В ходе полевых работ, проводимых на Южно-Камбальных термальных полях в разные годы, была собрана коллекция образцов, в различной степени затронутых гидротермальной переработкой. Основная задача заключалась в исследовании механизмов изменения вулканогенных пород и их свойств в зонах разгрузки парогидротерм.

В 2017 г. был отобран ряд образцов (6 шт.) по профилю вкрест простирания ЮКД т/п — от свежих вулканитов до пород, полностью переработанных в опалиты и вторичные кварциты<sup>2</sup> (рис. 1, *a*; 2) [17].

Ранее, в 2012 г., в средней части поля, на прогретом, но относительно спокойном в плане термопроявлений участке, был пройден шурф глубиной 2 м, который вскрыл толщу гидротермальных глин. По разрезу было отобрано 8 образцов для изучения вещественного состава и 4 монолита для определения свойств (с глубины 56, 101, 145 и 188 см) (рис. 3).

<sup>2</sup> Породы в дальнейшем рассматриваются как скальные грунты.



Рис. 4. Неизмененный андезибазальт: а — образец, b — вид в шлифе (н+). Pl — плагиоклаз, Px — пироксен

Fig. 4. Unchanged basaltic andesite: a — the sample, b — photomicrograph with crossed nicols. Pl — plagioclase, Px — pyroxene

В 2018 г. были отобраны образцы по гребню, окружающему ЮКЦ т/п (рис. 1, *b*). Отбор проводился с помощью аккумуляторной портативной буровой установки с диаметром коронки 4 см. Среди образцов были неизмененные, слабо- и сильноизмененные андезибазальты. В пределах ЮКЦ т/п с поверхности был отобран и исследован один образец глины<sup>3</sup>, сохранивший псевдоморфную структуру андезибазальта.

#### Методы исследования

Методы исследований различались для скальных и дисперсных грунтов.

Скальные грунты. Для лабораторных испытаний из каждого образца было подготовлено по несколько проб (от 2 до 8) в виде цилиндров (всего 54 пробы). В ходе исследований были определены следующие показатели физических и физико-механических свойств: плотность воздушно-сухого грунта (ρ), плотность твердой фазы (ρ) на приборе ПЭЛА В.Я. Калачева, пористость — общая (*n*) и открытая  $(n_{n})$ , водопоглощение  $(W_{n})$ , скорость распространения продольных  $(V_{r})$  и поперечных  $(V_{c})$  волн (ультразвуковое просвечивание, прибор «Ультразвук»), динамический модуль упругости ( $E_{y}$ ), коэффициент Пуассона ( $\mu$ ), прочность на одноосное сжатие в сухом ( $R_{c}$ ) и водонасыщенном  $(R_{cB})$  состоянии, прочность на растяжение  $(R_{p})$ («бразильский» метод, пресс ZDM-10), коэффициент размягчаемости (К<sub>разм</sub>), магнитная восприимчивость (χ). Все определения проводились по стандартным методикам [14]. Сдвиговые характеристики — сцепление (С) и угол внутреннего трения (φ), рассчитывались по паспорту прочности, на основе значений  $R_{c}$  и  $R_{p}$ , в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 21153.8-88 «Метод определения предела прочности при объемном сжатии». Одновременно с определением свойств исследовались петрографические особенности пород<sup>4</sup> (с помощью оптического микроскопа «Olympus BX-41», рентгеновского дифрактометра «Rigaku ULTIMA-IV», сканирующего электронного микроскопа LEO 1450VP, оснащенного энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 300).

Дисперсные грунты. Ряд показателей — естественная влажность, плотность при природной влажности, сдви-

говые характеристики (угол внутреннего трения и сцепление) — определялись в полевых условиях. Испытания на сдвиг<sup>5</sup> проводились на приборе BCB-25. Схема испытаний соответствовала методике быстрого сдвига, с приложением сдвигающего усилия в кинематическом режиме, со скоростью 5–6 мм/мин.

Остальные определения выполнялись в лаборатории по стандартным методикам<sup>2</sup>. Гранулометрический состав изучался пипеточным методом. Подготовка к анализу проводилась по методике П.Ф. Мельникова (растирание с пирофосфатом натрия  $Na_4P_2O_7$ ). Плотность твердой фазы определялась пикнометрическим методом для засоленных грунтов, с использованием керосина; нижний предел пластичности  $W_p$  — методом раскатывания в шнур; верхний предел пластичности  $W_L$  — методом балансирного конуса. Название грунту давалось по числу пластичности  $I_p$  с учетом гранулометрического состава согласно ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация».

#### Изменение состава и физико-механических свойств андезитов под действием термальных вод

#### Исходные породы

Исходные породы представлены андезибазальтами темно-серого цвета с порфировой структурой (рис. 4). Среди порфировых вкрапленников преобладают плагиоклазы (размер кристаллов от 0,3-0,5 мм до 1-1,5 мм; содержание 10-15%), в меньшей степени — ромбо- и клинопироксены (размер 0,5-1 мм; содержание ~ 5-7%), встречаются калиевые полевые шпаты. Структура основной массы — интерсертальная (доля микролитов составляет более 50%, вулканическое стекло находится в промежутках между микролитами), среди микролитов присутствуют плагиоклазы и клинопироксены. В составе андезибазальтов присутствуют рудные минералы, в количестве 1-2%. Текстура пород преимущественно массивная, однако на отдельных участках встречаются поры округлой формы, размером 1-2 мм. Неизмененные андезибазальты очень плотные ( $\rho = 2,71$  г/см<sup>3</sup>), низкопористые (n = 6%), с высокими значениями показателей упругих ( $V_n = 5,2$  км/с,  $E_v = 54,8 \ \Gamma \Pi a$ ) и прочностных ( $R_c = 118 \ M \Pi a$ ) свойств, неразмягчаемые (табл. 1). Также данные породы отличаются высокими значениями магнитной восприимчивости  $(\chi = 28,8.10^{-3}CM)$ , что обусловлено присутствием в их составе титаномагнетита и сохранных пироксенов.

#### Измененные андезибазальты

Слабоизмененные андезибазальты. Визуально вторичные изменения проявляются в незначительном осветлении породы и появлении тонких прожилков (рис. 5). При микроскопических исследованиях были обнаружены более существенные изменения. Основными вторичными минералами являются смектиты (до 17%) и низкотемпературные минералы кремнезема (опал, кристобалит), в миндалинах встречается кальцит. Среди исходных компонентов андезибазальта первым изменяется вулканическое стекло, находящееся в интерстициях (промежутках) между микролитами. На РЭМ-изображениях при боль-

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Глины как породы в дальнейшем рассматриваются как глинистые грунты.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Трофимов В.Т., Королев В.А. (ред.), 2017. Лабораторные работы по грунтоведению, 3-е изд., КДУ, Москва.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Королев В.А. (ред.), 2000. Полевые методы гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических, инженерно-геофизических и эколого-геологических исследований. Изд-во МГУ, Москва.

## Средние значения показателей физических и физико-механических свойств андезибазальтов и продуктов их гидротермального изменения

Average values of physical and physical-mechanical properties of andesite basalts and products of their hydrothermal alteration

	Породы													
Показатели свойств		Исхо	дные	Гидротермально-метасоматические										
		Андезиты, ан	дезибазальты	Серные	Приповерхностные вторичные кварциты (монокварциты)									
	Неизмененные	Слабоизменен- ные	Среднеиз- мененные	Сильноизме- ненные	опалиты	Пористые	Плотные							
Плотность р,г/см <sup>3</sup>	$\frac{2,69-2,75}{2,71}$	$\frac{2,44-2,67}{2,56}$	$\frac{2,23-2,35}{2,29}$	$\frac{1,70-1,99}{1,86}$	<u>1,58–1,81</u> 1,66	$\frac{1,52-1,62}{1,56}$	<u>2,19–2,37</u> 2,27							
Плотность твердых частиц $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	2,90–2,95	2,90–2,95	2,84	-	2,36	2,72	2,78							
Пористость <i>n</i> , %	5–76	$\frac{10-15}{12}$	$\frac{17-22}{20}$	-	$\frac{23-33}{30}$	$\frac{40-44}{43}$	$\frac{15-21}{18}$							
Пористость открытая n <sub>0</sub> , %	<u>1,1–2,1</u> 1,7	$\frac{1,9-16,2}{5,7}$	-	<u>13,6–18,6</u> 6,1	12,7	25,6	6,4							
Водопоглощение <i>W</i> <sub>п</sub> , %	<u>0,4–0,8</u> 0,6	$\frac{0,8-6,6}{2,3}$	-	<u>6,8–10,9</u> 8,9	8,1	16,7	2,9							
Скорость продольных волн $V_p$ , км/с	<u>5,0–5,5</u> 5,2	$\frac{3,4-5,0}{4,4}$	3,4	<u>2,4–2,7</u> 2,6	<u>1,8–2,3</u> 2,1	$\frac{3,5-3,6}{3,5}$	$\frac{4,4-5,0}{4,7}$							
Динамический модуль упругости <i>E<sub>v</sub></i> , ГПа	$\frac{44,5-66,8}{54,8}$	$\frac{23,3-48,8}{36,7}$	<u>18,1–22,2</u> 20,2	<u>8,4–10,9</u> 9,6	<u>3,8–6,5</u> 5,5	$\frac{10,2-15,3}{12,3}$	<u>34,6–41,2</u> 38,1							
Прочность на одноосное сжатие $R_{\rm c}$ , МПа	$\frac{109-128}{118}$	$\frac{60-117}{83}$	49	$\frac{9-25}{15}$	$\frac{1,6-4,4}{3,1}$	$\frac{4,1-4,9}{4,5}$	$\frac{58-88}{73}$							
Коэффициент размягчаемости К <sub>разм</sub> , д.ед.	0,77	0,83	-	0,92	1,0	0,91	0,81							
Угол внутреннего трения $\phi$ , °	56	56	57	52	42	-	51							
Сцепление С, МПа	18,5	13,2	7,0	3,2	1,4	-	13,7							
Магнитная восприимчивость χ·10 <sup>-3</sup> СИ	$\frac{22,0-36,3}{28,8}$	$\frac{16,4-37,0}{26,8}$	<u>9,9–15,1</u> 12,5	<u>1,3–1,6</u> 1,4	<u>0,05–0,11</u> 0,08	<u>-0,03-0</u> -0,02	0,02							
Кол-во образцов/проб, шт.	2/9	4/22	1/2	1/8	1/6	1/3	1/4							

Примечание: определения выполнены по стандартным методикам<sup>2</sup> [14].

шом увеличении хорошо видно, как оно преобразуется в опал-смектитовое вещество с чешуйчатым микростроением (рис. 6, *a*). Тончайшие пленки опала покрывают также стенки микротрещин. Размер опаловых новообразований составляет 50–100 нм (рис. 6, *b*). Ромбические пироксены псевдоморфно замещаются смектитами, моноклинные остаются без изменений. Плагиоклазы незначительно выщелочены.

В результате изменения вулканического стекла и ромбических пироксенов, а также выщелачивания плагиоклазов, в два раза увеличивается пористость пород (n = 12%) и снижается их плотность. В свою очередь, увеличение пористости вызывает некоторое снижение прочности ( $R_c = 83 \text{ M}\Pi a$ ) и сильное уменьшение упругих свойств ( $V_p = 4,4 \text{ км/c}, E = 36,7 \Gamma\Pi a$ ). Магнитная восприимчивость на данной стадии снижается незначительно, хотя увеличивается разброс ее значений (см. табл. 1).

Среднеизмененные анбезибазальты. Макроскопически изменения проявляются в виде дальнейшего осветления породы (появляется бежевый оттенок), образования пор выщелачивания и увеличения количества микротрещин (рис. 7). Как и на предыдущей стадии, среди вторичных минералов преобладают смектиты (причем их количество не увеличивается) и кремнистые минера-



Рис. 5. Слабоизмененный андезибазальт: а — образец, b — вид в шлифе (н+). Pl — плагиоклаз, CPx — клинопироксен, Sm смектиты

Fig. 5. Slightly altered basaltic andesite: a — the sample, b — photomicrograph with crossed nicols. Pl — plagioclase, CPx — clinopyroxene, Sm — smectites



Рис. 6. Слабоизмененный андезибазальт (РЭМ-изображение): а — замещение вулканического стекла смектитами и опалом, b — начальная стадия образования опала на стенке трещины. Pl — плагиоклаз, Sm — смектиты, Op — опал

Fig. 6. Slightly altered basaltic andesite (SEM image): a — substitution of volcanic glass with smectite and opal, b — initial stage of opal formation on the fracture surface. Pl — plagioclase, Sm — smectites, Op — opal



Рис. 7. Среднеизмененный андезибазальт: а — образец, b — вид в шлифе (н+). Pl — плагиоклаз

Fig. 7. Moderately altered basaltic andesite: a — the sample, b — photomicrograph with crossed nicols. Pl — plagioclase

лы, в небольших количествах появляются каолинит, анатаз, гипс. Ромбические пироксены изменены, тогда как моноклинные пироксены, слагающие микролиты, остаются сохранными. На данной стадии очень интенсивно проявлен процесс выщелачивания (см. рис. 7), в результате которого продолжается увеличение пористости пород (n = 20%) и снижение плотностных, упругих ( $V_p = 3,4$  км/с, E = 20,2 ГПа) и прочностных свойств ( $R_c = 49$  МПа). Наблюдается значительное снижение магнитной восприимчивости — более, чем в два раза  $(\chi = 12,5 \cdot 10^{-3}$ СИ), связанное с началом разложения титаномагнетита (см. табл. 1).

Сильноизмененные анбезибазальты. Макроскопические изменения заключаются в сильном осветлении породы, вплоть до желтовато-бежевого цвета, и заметном выщелачивании первичного материала (рис. 8). В шлифах видно, что основными вторичными новообразованиями являются минералы кремнезема (опал, кристобалит). Они полностью замещают основную массу породы и большую часть плагиоклазов (см. рис. 8). Изменение плагиоклазов носит ярко выраженный псевдоморфный характер, когда форма кристалла остается сохранной, а его минеральная составляющая меняется (рис. 9). Следует отметить, что центральная часть кристаллов обычно более интенсивно переработана, тогда как внешние края часто остаются сохранными. Клинопироксены изменены не полностью.

#### Гидротермально-метасоматические породы

Конечными продуктами кислотного выщелачивания являются серные опалиты, вторичные кварциты (монокварциты) и гидротермальные глины. Кремнистые породы (опалиты и вторичные кварциты) образуются вокруг выходов кислых термальных вод и парогазовых струй, приуроченных к сети трещин в вулканическом массиве, и обычно слагают возвышенные участки на термальном поле. Парогазовые струи часто содержат значительную долю соединений серы во флюидной фазе. В результате конденсации парогазовой смеси образуются кислые растворы, которые, взаимодействуя с вмещающими породами, выщелачивают практически все компоненты и превращают их в метасоматиты, преимущественно состоящие из минералов кремнезема (опал, кристобалит, кварц) [6]. Есть данные, что эти породы образуются выше уровня грунтовых вод [27], тогда как ниже распространены породы, в которых среди метасоматических новообразований преобладают глинистые минералы.

Серные опалиты. В их составе преобладают минералы аморфного кремнезема и сера (до 50%), также присутствуют каолинит, гипс, кварц, пирит, анатаз. Как правило, по основной массе породы развивается коллоидная сера, в полостях и трещинах образуется тонкокристаллическая (рис. 10). Наибольшие скопления серы приурочены к возвышенным участкам микрорельефа, представляющим собой старые серные бугры. Перемещение (миграция) выходов газопаровых струй и термальных вод по площади поля, вероятно, связано с рядом изменений — колебанием уровня грунтовых вод; «ухудшением» показателей физико-механических свойств пород при гидротермальных преобразованиях, инициирующим оползневые процессы в пределах поля; изменением порово-трещинного пространства массива и его фильтрационных свойств (залечивание трещин, с одной стороны, выщелачивание и формирование вторичной пористости, с другой). С инженерно-геологической точки зрения, серные опалиты являются наименее прочными породами ( $R_c = 3,1$  МПа), легко разрушающимися даже при небольших нагрузках и вовлекающимися в оползневые процессы вместе с глинами.

Вторичные кварциты. Минеральный состав вторичных кварцитов достаточно однообразен: преобладает метасоматический кварц (95%), с незначительной примесью гипса и анатаза и реликтовыми остатками плагиоклазов и калиевого полевого шпата (КПШ) (около 3%), что позволяет их называть монокварцитами. Микрокристаллический кварц (50–200 мкм) замещает исходную породу практически полностью, без сохранения остатков первичных минералов, за исключением их контуров, которые в некоторых случаях можно различить (рис. 11, *a*). Следует отметить, что в полостях, в условиях свободного роста, формируются идиоморфные микрокристаллы кварца (рис. 11, *b*), размером от 10 до 100 мкм и более, между тем как основная масса породы, где рост новообразований происходил в стесненных условиях, замещена плотным кварцевым микроагрегатом с извилистыми, ксено-

морфными очертаниями зерен (рис. 11, с). Среди монокварцитов выделяются относительно плотные (с пористостью n = 18%) и пористые (n = 43%) разности. В плотных кварцитах кварц не только замещает основную массу, но и заполняет большую часть пустот. Следует отметить, что зерна кварца в них имеют более совершенную форму по сравнению с пористыми кварцитами. Плотные кварциты обладают высокими значениями прочности (R<sub>c</sub> = 73 МПа) и упругих свойств, т.к. сложены плотно сросшимися зернами кварца с кристаллизационным типом контактов между ними. Пористые кварциты представляют собой малопрочные породы ( $R_c = 4,5$  МПа), по-видимому, вследствие высокой пористости (см. табл. 1). Характерной особенностью вторичных кварцитов являются низкие, в некоторых случаях даже отрицательные величины магнитной восприимчивости, что позволяет отнести их к классу диамагнетиков.

Гидротермальные глины. В приповерхностном горизонте термального поля исходные андезибазальты, а также перекрывающие их местами обломочные отложения смешанного генезиса (коллювиальные, делювиальные, аллювиальные), полностью трансформируются в гидротермальные глинистые отложения, которые образуют покров мощностью до нескольких метров. В строении толщи глин, изученной на ЮКД т/п с помощью шурфа, выделяются два горизонта. Верхний горизонт (0-80 см) сложен светлыми (светло-бежевыми, светло-серыми, белыми) глинами, образованными в условиях сернокислотного выщелачивания. Он очень неоднородный, с обилием псевдоморфных структур, унаследованных от первичных пород. При полевом описании консистенция была определена в диапазоне от тугопластичной до полутвердой и твердой. Согласно рентгенофазовому анализу в составе глин преобладает каолинит (14-34%), в меньшем количестве присутствует смектит (10-17%). Помимо глинистых минералов, данный горизонт характеризуется высоким содержанием дисперсного опала (18-54%) и кварца (до 39%) (рис. 12). На РЭМизображениях видно, что опал как бы «пропитывает» породу, создавая относительно жесткий каркас в глинистом матриксе. Он осаждается на частицах каолинита в виде тончайших пленок, толщиной доли микрона; кроме того, образует «мостики», цементирующие каолинитовые микроагрегаты между собой (рис. 13, *a*, *b*).

Одной из особенностей зоны сернокислотного выщелачивания являются резко изменчивые в пространстве и времени условия минералообразования, что отмечается многими исследователями. Это объясняет характерное для данной зоны развитие неравновесных ассоциаций и метастабильных фаз, в частности, совместное нахождение пирита и марказита, опала и кварца, каолинита и галлуазита. Более того, периодические изменения условий приводят к совместному существованию каолинита и



Рис. 8. Сильноизмененный андезибазальт: а — образец, b — вид в шлифе (н+). Pl — плагиоклаз, CPx — клинопироксен, SiO<sub>2</sub> — минералы кремнезема

Fig. 8. Strongly altered basaltic and esite: a — the sample, b — photomicrograph with crossed nicols. Pl — plagio clase, CPx — clinopyroxene, SiO<sub>2</sub> — silica minerals



Рис. 9. Псевдоморфозы кремнистых минералов по кристаллам плагиоклаза (РЭМ-изображения): а — общий вид, b — фрагмент при большом увеличении. Pl — плагиоклаз, SiO<sub>2</sub> — минералы кремнезема

Fig. 9. Pseudomorphs of siliceous minerals by plagioclase crystals (SEM images): a — general view, b — fragment at high magnification. Pl — plagioclase, SiO, — silica minerals



Рис. 10. Серные опалиты (РЭМ-изображения): а псевдоморфозы серы (S) и опала (Op) по первичному кристаллу, b — коллоидная сера в основной массе (S col) и кристаллическая сера в трещине (S cryst)

Fig. 10. Sulfur opalites (SEM images): a — pseudomorphoses of sulfur (S) and opal (Op) along the primary crystal, b — colloidal sulfur in the ground mass (S col) and crystalline sulfur in the fracture (S cryst)

смектитов, нередко в виде смешанослойных образований [3, 5]. Также существуют низкозарядные монтмориллониты, содержащие в тетраэдрах только катионы Si, которые являются крайним «кислым» членом Al-смектитов, и их рассматривают как своеобразные предшественники каолинитов. Отсюда тесная ассоциация каолинита и смектитов при колебаниях pH около 5,5 [4].

Нижний горизонт (80–195 см) сложен серыми, синевато-серыми глинами, твердыми, плотными, относитель-



гис. п. вторичные кварциты (г.Эм-изооражения): а — оощий вид, b — идиоморфные кристаллы кварца, образованные в поре (Q pore), с — ксеноморфные кристаллы кварца, замещающие основную массу исходного андезибазальта (Q matrix)

Fig. 11. Secondary quartzites (SEM images): a — general view, b — idiomorphic quartz crystals formed in the pore (Q pore), c — xenomorphic quartz crystals substituted ground mass of basaltic andesite (Q matrix)

но однородными, являющимися продуктом углекислотного выщелачивания. Для них характерны тонко рассеянный пирит, придающий породам синеватый оттенок, и обилие корочек (линз, жеод, прожилков), сложенных минералами кремнезема. Основу глинистых отложений составляют иллит-смектитовые смешанослойные минералы (46–49%) с преобладанием иллитовых слоев (рис. 13, *c*, *d*). Присутствует тонкодисперный кварц (6– 20%), количество каолинита (7–27%) и опала (0–11%) по сравнению с верхним горизонтом снижается, смектиты исчезают. Содержание пирита составляет 8–11%; в небольших количествах присутствуют алунит (1–6%) и геттит (2–4%) (см. рис. 12).

На границе двух горизонтов наблюдается охристо-бурый ожелезненный прослой — неровный, не выдержанный по мощности, по-видимому, отражающий смену условий вверх по разрезу от восстановительных к окислительным.

Гидротермальные глины характеризуются высокой пористостью (n = 55-79%) и естественной влажностью  $(W_{2} = 40-131\%)$ , причем снизу вверх по разрезу наблюдается разуплотнение, повышение пористости и влажности (табл. 2). Такая тенденция изменения свойств коррелирует с микростроением глинистых отложений, полученным по данным РЭМ, — плотным сложением глин в основании слоя и высокопористой ячеистой микротекстурой в верхнем горизонте. По числу пластичности  $(I_n = 32-47)$  и результатам гранулометрического анализа все исследованные гидротермальные глинистые грунты относятся к тяжелым глинам по ГОСТ 25100-2011. Однозначную закономерность в изменении гранулометрического состава по разрезу выявить сложно, поскольку глинистый горизонт в целом отличается большой неоднородностью, частично унаследованной от исходных пород, наличием реликтовых остатков первичных минералов, неравномерным распределением вторичных минералов в объеме породы. Наибольшее содержание глинистой фракции (30%) зафиксировано в верхнем слое светлых глин (рис. 14). Также для светлых глин характерно высокое содержание грубопесчаной фракции (22-36%), которую, по-видимому, составляют опаловые и кварцевые новообразования, и, кроме того, возможны не переработанные реликты первичных минералов.

Консистенция глин варьирует от полутвердой в основании глинистого горизонта до скрытотекучей в верхней части (см. табл. 2). Следует пояснить понятие «скрытотекучая» консистенция. Согласно стандартному определению ГОСТ 25100-2011, консистенция глин верхнего слоя классифицируется как текучая, поскольку естественная влажность ( $W_e = 131\%$ ) выше, чем влажность на пределе текучести ( $W_L = 129\%$ ). Однако в естественном за-



Фролова Ю.В., Рычагов С.Н., Чернов М.С., Суровцева К.И., Кузнецов Р.А., Большаков И.Е., 2020 ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ Том XV, № 1/2020 с. 36-51



сцементированные опаловыми «мостиками»; с — общий вид нижнего горизонта (80–195 см); d — увеличенный фрагмент, микроагрегат из частиц иллит-смектита и микрокристаллов пирита Fig. 13. Microstructure of hydrothermal clays from the open pit UKD thermal field (SEM images): a — general view of the near-surface

Fig. 13. Microstructure of hydrothermal clays from the open pit UKD thermal field (SEM images): a — general view of the hear-surface horizon (0–80 cm); b — enlarged fragment, microaggregates of kaolinite cemented by opal "bridges"; c — general view of the lower horizon (80–195 cm); d — enlarged fragment, microaggregate of illite-smectite particles and pyrite microcrystals

легании грунты находятся в твердой или тугопластичной консистенции. Причиной такого несоответствия является высокое содержание в них микрокристаллических и аморфных минералов кремнезема (опал, кристобалит, кварц), которые выступают в качестве цемента и образуют жесткий каркас в глинистых грунтах (см. рис. 13, *a, b*). Гигроскопическая влажность (1,5–4,7%) отложений закономерно возрастает снизу вверх по разрезу, что определяется содержанием глинистых минералов, и в первую очередь высокогидрофильного смектита. Испытания на сдвиг показали, что глины верхнего горизонта менее прочные (C = 54-66 кПа;  $\varphi = 19-20^\circ$ ), по сравнению с глинами нижнего горизонта (C = 123 кПа;  $\varphi = 28^\circ$ ). Это вполне закономерно, так как напрямую связано с их высокой влажностью и пористостью.

На ЮКЦ т/п был изучен один образец глины, отобранный с поверхности. Глина имеет голубовато-серый цвет, твердую консистенцию и псевдоморфную структуру, унаследованную от порфировой структуры исходного андезибазальта. По составу глина смектитовая (70%), в небольших количествах присутствуют кварц (7%), пирит (3%), гипс, анатаз. Характерны реликтовые остатки первичных минералов — плагиоклазов (6%) и калиевого полевого шпата (12%). Плотность скелета грунта составляет 1,51 г/см<sup>3</sup>, пористость 41%, гигроскопическая влажность 4,7%, прочность на одноосное сжатие 0,3 МПа.

#### Обсуждение результатов

На Южно-Камбальных термальных полях происходит постепенная переработка вулканитов (преимущественно, андезибазальтов) вплоть до формирования гидротермаль-



hydrothermal clays UKD thermal field

но-метасоматических пород — опалитов, вторичных кварцитов и гидротермальных глин. Выделены стадии изменения андезибазальтов — слабо-, средне- и сильноизмененные. На первой стадии изменяются вулканическое стекло и ромбические пироксены, на второй — начинается изменение плагиоклазов, на третьей стадии изменениями затронуты все первичные компоненты андезибазальтов. Изменение минерального состава и пористости андезибазальтов, включая выщелачивание первичных компонентов породы и их замещение вторичными минералами, в первую очередь опалом и глинистыми ми-

### Влажностные, плотностные показатели свойств, сдвиговые характеристики гидротермальных глин шурфа ЮКД-1/12

Moisture, density properties, shear characteristics of hydrothermal clays from open pit UKD-1/12

<u>№</u> образца	Глубина, см	Температура $T$ , °С	Основные минералы	Влажность естественная $W_{\rm e}, \%$	Гигроскопическая влажность $W_{\rm p}$ %	Влажность верхнего предела пластичности <i>W</i> <sub>L</sub> , %	Влажность нижнего предела пластичности $W_p, \%$	Число пластичности $I_p$	Показатель консистенции $I_L$	Плотность грунта р, г/см <sup>3</sup>	Шлотность скелета грунта $\rho_{a^{\!$	Пористость n, %	Коэффициент пористости е, д.ед.	Сцепление С, кПа	Угол внутреннего трения $\phi$ , °	Разновидность	Консистенция
ЮКД 1/12-2	56	30	Опал, каолинит, смектит	131	4,7	129	82	47	1,04	1,31	0,57	79	3,80	54	20	Глина тяжелая	Текучая (скрытотекучая)
ЮКД 1/12-4	101	40		72	3,8	72	31	41	1,00	1,57	0,91	65	1,89	66	19	Глина тяжелая	Текучеплас- тичная
ЮКД 1/12-6	145	40	Смешанослойные иллит-смектит, каолинит	47	1,5	64	32	32	0,46	1,80	1,22	59	1,48	123	28	Глина тяжелая	Тугопластичная
ЮКД 1/12-8	188	50		40	1,5	68	35	33	0,14	1,90	1,36	54	1,20	-	-	Глина тяжелая	Полутвердая

Таблица 3 Table 3

#### Классификация исследованных скальных грунтов (по ГОСТ 25100-2011) Classification of investigated rocks (according to State Standard 25100-2011)

Пород	Ы	Разновидности грунта по классификациям ГОСТ 25100-2011					
Augustum augustum	Неизмененные	Скальные, очень плотные, слабопористые, прочные, неразмягчаемые					
	Слабоизмененные	Скальные, очень плотные, среднепористые, прочные, неразмягчаемые					
Андезиты, андезиоазальты	Среднеизмененные	Скальные, плотные, среднепористые, средней прочности, неразмягчаемые					
	Сильноизмененные	Скальные, средней плотности, малопрочные, неразмягчаемые					
Серные опалиты		Полускальные, средней плотности, среднепористостые, пониженной прочности, неразмягчаем					
Propulsi la la papilita l	Пористые	Полускальные, средней плотности, сильнопористые, пониженной прочности, неразмягчаемые					
вторичные кварциты	Плотные	Скальные, плотные, среднепористые, средней прочности, неразмягчаемые					

нералами, сопровождается заметным разуплотнением пород ( $\rho = 2,71 - 2,56 - 2,29 - 1,86$  г/см<sup>3</sup>) и существенным снижением показателей деформационных ( $E_y = 54,8 - 36,67 - 20,2 - 9,6$  ГПа) и прочностных свойств ( $R_c = 118 - 83 - 49 - 15$  МПа; C = 18,5 - 13,2 - 7,0 - 3,2 МПа) (см. табл. 1). Таким образом, модуль упругости снижается в 5–6 раз, прочность на одноосное сжатие в 7–8 раз, сцепление в 6 раз. Несмотря на гидротермальные изменения, все андезибазальты относятся к скальным неразмягчаемым грунтам (табл. 3). Однако разновидности их меняются от очень плотных и прочных (неизмененные породы) до средней плотности и малой прочности (сильноизмененные породы).

Конечными продуктами кислотного выщелачивания андезибазальтов являются серные опалиты, вторичные кварциты (монокварциты) и гидротермальные глины. На графиках зависимости скоростей упругих волн, модуля упругости, прочности на сжатие от плотности четко выделяется единый тренд снижения этих показателей по мере изменения исходных андезибазальтов с постепенным превращением их в опалиты и гидротермальные глины (рис. 15, a - c). При этом вторичные кварциты выделяются из общего тренда повышенными упругими свойствами: при одинаковой с андезибазальтами плотности скорость продольных волн выше на 1,0–1,5 км/с, а модуль упругости примерно в два раза. Это обусловлено тем фактом, что вторичные кварциты сложены прочно сросшимися микрокристаллами кварца.

Отдельно следует остановиться на магнитной восприимчивости, отражающей изменение рудных минералов под действием гидротермальных процессов, а значит, и степень гидротермальной переработки. Ее значения у андезибазальтов снижаются в 20 раз по мере разложения темноцветных, а главным образом, рудных минералов



Рис. 15. Изменение свойств пород в процессе гидротермальной переработки: а — зависимость скорости продольных волн от плотности, b — зависимость динамического модуля упругости от плотности, с — зависимость прочности на одноосное сжатие от плотности, d — изменение магнитной восприимчивости. 1–4 андезибазальты: 1 — неизмененные, 2 — слабоизмененные, 3 — среднеизмененные, 4 — сильноизмененные; 5 — серные опалиты; 6 — вторичные кварциты пористые; 7 — вторичные кварциты плотные; 8 — гидротермальные глины Fig. 15. Change in rock properties during hydrothermal processing: a — velocity of longitudinal waves vs density, b — dynamic elastic

modulus vs density, c — uniaxial compression strength vs density, d — the change in magnetic susceptibility. 1–4 basaltic andesites: 1 — unchanged, 2 — slightly changed, 3 — moderately changed, 4 — strongly changed; 5 — sulfuric opalites; 6 — porous secondary quartzites; 7 — dense secondary quartzites; 8 — hydrothermal clays

(рис. 15, *d*). Опалиты и вторичные кварциты являются диамагнетиками, поскольку состоят из немагнитных кремнистых минералов.

В пределах термального поля кремнистые породы (опалиты и вторичные кварциты) образуются вокруг выходов кислых термальных вод и парогазовых струй, обычно приуроченных к трещинам в вулканическом массиве. Вторичные кварциты, образующиеся на первой стадии, являются высокопористыми (n > 40%) и не прочными ( $R_c = 4,5$  МПа), так как преобладает процесс выщелачивания всех породообразующих компонентов исходных пород, за исключениям SiO<sub>2</sub>. По мере того, как термальные растворы насыщаются кремнекислотой, начинается процесс осаждения минералов кремнезема в порах и трещинах, в результате чего породы существенно уплотняются и упрочняются (n = 15-22%,  $R_c = 58-$ 88 МПа). Постепенно трещины залечиваются кремнистыми минералами, термальные флюиды меняют пути фильтрации, и происходит смещение термальных источников и газопаровых струй на поверхности термального поля. На тот факт, что источники меняют свое местоположение, указывает наличие массивов вторичных кварцитов при отсутствии в настоящее время на них термопроявлений (рис. 16, а). Обычно вторичные кварциты слагают возвышенные участки на термальном поле, поскольку являются достаточно прочными породами по сравнению с окружающими их гидротермальными глинами, которые, напротив, легко разрушаются, размываются и на склонах вовлекаются в оползневые процессы. На склонах и в бортах долины ручья наблюдаются многочисленные оползни. В основном это мелкоблоковые оползни и оползни течения, механизм которых заключается в вязкопластическом движении увлажненных толщ гидротермальных глин (мощностью первые метры) по жесткому скальному основанию. Обычно хорошо видна стенка отрыва, высотой до 0,5-1 м, и оползневые массы, образующие мелкобугристый рельеф (рис. 16, b). Следует отметить, что при гидротермальных процессах кардинально изменяются сдвиговые характеристики пород: у андезибазальтов сцепление составляет 18,3 МПа, угол внутреннего трения 56°, а при их трансформации в глинистые отложения сцепление снижается на три порядка — до 54-123 кПа, а угол внутреннего трения в 2-3 раза — до 18-28°. Естественно, что такое существенное снижение сдвиговых характеристик пород является причиной широкого распространения склоновых процессов.



Рис. 16. Геологические явления на Южно-Камбальном Дальнем термальном поле, вызванные гидротермальной деятельность: а — бугор, сложенный вторичными кварцитами и опалитами, иллюстрирующий процесс миграции поверхностных термопроявлений; b — оползни в гидротермальных глинах. Фото Ю.В. Фроловой

Fig. 16. Geological phenomena in the South Kambalny Far Thermal Field caused by hydrothermal activity: a — hillock composed of secondary quartzites and opalites, illustrating the process of migration of surface thermal manifestations; b — landslides in hydrothermal clays. Foto by J.V. Frolova

#### Заключение

1. В пределах Южно-Камбальных термальных полей (Дальнего и Центрального) выделены последовательные стадии изменения исходных пород: неизмененные андезибазальты → слабоизмененные → среднеизмененные → сильноизмененные андезибазальты → гидротермальнометасоматические породы (серные опалиты, монокварциты, гидротермальные глины).

2. Под действием термальных вод, в процессе изменения андезибазальтов, происходит постепенное выщелачивание первичных минералов с формированием новых пустот, метасоматическое замещение первичных компонентов вторичными, в первую очередь кремнистыми и глинистыми минералами, что сопровождается закономерным разуплотнением пород, снижением показателей их деформационных и прочностных свойств. Среди исследованных пород самыми «слабыми» являются серные опалиты, относящиеся к полускальным грунтам, и гидротермальные глины. На завершающем этапе гидротермального процесса, при формировании вторичных кварцитов, происходит осаждение и кристаллизация кремнистого вещества из термальных растворов в порах и трещинах, приводящие к уменьшению пористости, уплотнению пород и повышению показателей их физико-механических свойств.

3. Среди всех показателей физических свойств наиболее тесная корреляция со степенью изменения пород обнаружена для магнитной восприимчивости. По мере распада первичных рудных минералов и пироксенов, ее значения закономерно снижаются от 28,8<sup>•</sup>10<sup>-3</sup> СИ у исходных андезибазальтов до нулевых и отрицательных значений у вторичных кварцитов.

4. Гидротермальные преобразования пород и сопровождающие их изменения порово-трещинного пространства, прочностных, упругих и, по-видимому, фильтрационных свойств, способствуют динамичному развитию термального поля во времени, включая миграцию поверхностных термопроявлений, изменение микрорельефа, формирование оползневых процессов и пр. •

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоусов В.И., Сугробов В.М., Сугробова Н.Г., 1976. Геологическое строение и гидрогеологические особенности Паужетской гидротермальной системы. В сб. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Изд-во ДВНЦ АН СССР, Владивосток, с. 23–57.
- 2. Белоусов В.И., Ломоносов И.С. (ред.), 1993. Структура гидротермальной системы. Наука, Москва.
- 3. Градусов Б.П., Зотов А.В., Русинов В.Л., 1975. Условия образования каолинита и монтмориллонита на современных сольфатарных полях. Доклады Академии наук СССР, Том 222, № 5, с. 1190–1193.
- 4. Дриц В.А., Коссовская А.Г., 1990. Глинистые минералы: смектиты, смешаннослойные образования. Наука, Москва.
- Ерощев-Шак В.А., Набоко С.И., Карпов Г.А., Ильин В.А., Главатских С.Ф., 1977. Формирование глинистых минералов при низкотемпературном гидротермальном процессе (на примере кальдеры Узон). В сб. Гидротермальный процесс в области тектоно-магматической активности. Наука, Москва, с. 172–184.
- 6. Жариков В.А., Рунинов В.Л. (ред.), 1998. Метасоматизм и метасоматические породы. Научный мир, Москва.
- 7. Масуренков Ю.П. (ред.), 1980. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. Наука, Москва.
- 8. Нехорошев А.С., 1959. Гидротермальная деятельность района хребта Камбального на южной Камчатке. Бюллетень вулканологической станции, № 28, с. 23–32.

- 9. Рычагов С.Н., Давлетбаев Р.Г., Ковина О.В., 2009. Гидротермальные глины и пирит геотермальных полей: значение в геохимии современных эндогенных процессов (Южная Камчатка). Вулканология и сейсмология. № 2, с. 39–55.
- 10. Рычагов С.Н., Кравченко О.В., Нуждаев А.А., Чернов М.С., Карташева Е.В., Кузьмина А.А., 2020. Южно-Камбальное Центральное термальное поле: структурное положение, гидрогеохимические и литологические характеристики. Вулканизм и связанные с ним процессы, Материалы XXIII научной конференции, посвященной Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 2020. (в печати)
- 11. Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Сергеева А.В., Нуждаев И.А., 2017. Состав пепла вулкана Камбальный (извержение 2017 г.). Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, Вып. 36, № 4, с. 13–27.
- 12. Сорокин А.П. (ред.), 2001. Стратегия развития топливно-энергетического потенциала Дальневосточного экономического района до 2020 г. Дальнаука, Владивосток.
- Сугробов В.М., 1979. Геотермальные ресурсы Камчатки, классификация и прогнозная оценка. В сб. Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. Наука, Москва, с. 26–35.
- 14. Фролова Ю.В., 2015. Скальные грунты и лабораторные методы их изучения. КДУ, Москва.
- Bozkurtoğlu E., Vardar M., Suner F., Zambak C., 2006. A new numerical approach to weathering and alteration in rock using a pilot area in the Tuzla geothermal area, Turkey. Engineering Geology, Vol. 87(1–2), pp. 33–47, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.06.002.
- Coggan J.S., Stead D., Howe J.H., Faulks C.I., 2013. Mineralogical controls on the engineering behavior of hydrothermally altered granites under uniaxial compression. Engineering Geology, Vol. 160, pp. 89–102, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.04.001.
- Frolova J., Chernov M., Rychagov S., Kuznetsov R., Surovtseva K., 2019. Alteration of volcanic rocks and changes in physicalmechanical properties on the South-Kambalny thermal field (South Kamchatka). Proceedings of 16th International Symposium on water-rock interaction (WRI-16) and 13th International Symposium on applied isotope geochemistry (1st IAGC International Conference), Tomsk, 2019, Vol. 98, article No. 08002, https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199808002.
- Frolova J., Ladygin V., Rychagov S., Zukhubaya D., 2014. Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril-Kamchatka island arc. Engineering Geology, Vol. 183, pp. 80–95.
- Koros W., O'Sullivan J., Pogacnik J., O'Sullivan M., Pender M., Bromley C., 2015. Variability of geotechnical properties of materials within Wairakei subsidence bowl, New Zealand. Proceedings of 37th New Zealand geothermal Workshop, Taupo, New Zealand, 2015, pp. 1–8.
- Lutz S.J., Zutshi A., Robertson-Tait A., Drakos P., Zemach E., 2011. Lithologies, hydrothermal alteration, and rock mechanical properties in wells 15–12 and BCH-3, Bradys hot springs geothermal field, Nevada. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 35, pp. 469–476.
- Mielke Ph., Prieto A., Bignall G., Sass I., 2015. Effect of hydrothermal alteration on rock properties in the Tauhara geothermal field, New Zealand. Proceedings World geothermal Congress, Melbourne, Australia, 2015, URL: https://www.geothermalenergy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/12081.pdf (дата обращения: 15.02.2020).
- Navelot V., Geraud Y., Diraison M., 2016. Physical properties of fresh or hydrothermal volcanic rocks from the west coast of Basee-Terre and Terre-de-Haup (Guadeloupe archipelago). Proceedings of the European geothermal Congress, Strasbourg, France, 2016, pp. 1–10.
- Pola A., Crosta G., Fusi N., Barberini V., Norini G., 2012. Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks. Tectonophysics, Vol. 566-567, pp. 67-86.
- Potro R., Hürlimann M., 2009. The decrease in the shear strength of volcanic materials with argillic hydrothermal alteration, insights from the summit region of Teide stratovolcano, Tenerife. Engineering Geology, Vol. 104(1–2), pp. 135–143.
- 25. Rigopoulos I., Tsikouras B., Pomonis P., Hatzipanagiotou K., 2010. The influence of alteration on the engineering properties of dolerites: the examples from the Pindos and Vourinos ophiolites (Northern Greece). Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 47, No. 1, pp. 69–80.
- Shevko A.Ya., Gora M.P., Golikov N.A., Panin G.L, Bessonova E P., 2013. Using petrophysical properties of volcanic rocks in the interpretation of geophysical data (volcano Ebeko, Kuril Islands). Open Journal of Geology, No. 3, pp. 77–80.
- 27. Shoen R., White D.E., Hemley J.J., 1974. Argillization by descending acide at Stemboat Springs, Nevada. Clays Clay Minerals, Vol. 23, No. 1, pp. 1–23.
- Sigurdsson O., Gudmundsson A., Fridleifsson G.O., Franzson H., Gudlaugsson S.Th., Stefansson V., 2000. Database on igneous rock properties in Icelandic geothermal systems. Status and unexpected results. Proceedings World geothermal Congress, pp. 2881–2886.
- 29. Siratovich P.A., Heap M.J., Villeneuve M.C., Cole J.W., Reuschle T., 2014. Physical property relationships of the Rotokawa andesite, a significant geothermal reservoir rock in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. Geothermal Energy, 2014, Vol. 2, article No. 10, https://doi.org/10.1186/s40517-014-0010-4.
- Wyering L.D., Villeneuve M.C., Wallis I.C., Siratovicha P.A., Kennedy B.M., Gravley D.M., Cant J.L., 2014. Mechanical and physical properties of hydrothermally altered rocks, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 288, pp. 76–93.

#### REFERENCES

- Belousov V.I., Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., 1976. Geological structure and hydrogeological features of the Pauzhetskaya hydrothermal system. In collection of papers Hydrothermal systems and thermal fields of Kamchatka. Publishing house of the Far Eastern Scientific Center, USSR Academy of Sciences, Vladivostok, pp. 23–57. (in Russian)
- 2. Belousov V.I., Lomonosov I.S. (eds.), 1993. The structure of the hydrothermal system. Nauka, Moscow. (in Russian)
- Gradusov B.P., Zotov A.V., Rusinov V.L., 1975. Conditions for the formation of kaolinite and montmorillonite in modern solfatar fields. Doklady of the USSR Academy of Sciences, Vol. 222, No. 5, pp. 1190–1193. (in Russian)
- 4. Drits V.A., Kossovskaya A.G., 1990. Clay minerals: smeetites, mixed layer formations. Nauka, Moscow. (in Russian)
- Eroshev-Shak V.A., Naboko S.I., Karpov G.A., Ilyin V.A., Glavatskikh S.F., 1977. Formation of clay minerals during the lowtemperature hydrothermal process (using the Uzon caldera as an example). In collection of papers Hydrothermal process in the field of tectono-magmatic activity. Nauka, Moscow, pp. 172–184. (in Russian)
- 6. Zharikov V.A., Runinov V.L. (eds.), 1998. Metasomatism and metasomatic rocks. Nauchniyj mir, Moscow. (in Russian)
- 7. Masurenkov Yu.P. (ed.), 1980. The long-lived center of endogenous activity of South Kamchatka. Nauka, Moscow. (in Russian)
- Nekhoroshev A.S., 1959. Hydrothermal activity of the region of the Kambalny Ridge in southern Kamchatka. Bulletin of the Volcanological Station, No. 28, pp. 23–32. (in Russian)
- 9. Rychagov S.N., Davletbaev R.G., Kovina O.V., 2009. Hydrothermal clays and pyrite of geothermal fields: significance in the geochemistry of modern endogenous processes (South Kamchatka). Volcanology and Seismology, No. 2, pp. 39–55. (in Russian)
- Rychagov S.N., Kravchenko O.V., Nuzhdaev A.A., Chernov M.S., Kartasheva E.V., Kuzmina A.A., 2020. South Kambalny Central thermal field: structural position, hydrogeochemical and lithological characteristics. Volcanism and related processes, Proceedings of the XXIII scientific Conference dedicated to the Volcanologist's Day, Petropavlovsk-Kamchatsky, 2020. (in press) (in Russian)
- Rychagov S.N., Sandimirova E.I., Sergeyeva A.V., Nuzhdaev I.A., 2017. Composition of ash from the 2017 Kambalny Volcano eruption. Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences, Issue 36, No. 4, pp. 13–27. (in Russian)
- Sorokin A.P. (ed.), 2001. Strategy for the development of the fuel and energy potential of the Far Eastern economic region until 2020. Dalnauka, Vladivostok. (in Russian)
- 13. Sugrobov V.M., 1979. Kamchatka geothermal resources, classification and predictive assessment. In collection of papers Study and use of geothermal resources in volcanic areas. Nauka, Moscow, pp. 26–35. (in Russian)
- 14. Frolova J.V., 2015. Rocks and laboratory methods for their study. KDU, Moscow. (in Russian)
- 15. Bozkurtoğlu E., Vardar M., Suner F., Zambak C., 2006. A new numerical approach to weathering and alteration in rock using a pilot area in the Tuzla geothermal area, Turkey. Engineering Geology, Vol. 87(1–2), pp. 33–47, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.06.002.
- Coggan J.S., Stead D., Howe J.H., Faulks C.I., 2013. Mineralogical controls on the engineering behavior of hydrothermally altered granites under uniaxial compression. Engineering Geology, Vol. 160, pp. 89–102, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.04.001.
- Frolova J., Chernov M., Rychagov S., Kuznetsov R., Surovtseva K., 2019. Alteration of volcanic rocks and changes in physicalmechanical properties on the South-Kambalny thermal field (South Kamchatka). Proceedings of 16th International Symposium on water-rock interaction (WRI-16) and 13th International Symposium on applied isotope geochemistry (1st IAGC International Conference), Tomsk, 2019, Vol. 98, article No. 08002, https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199808002.
- Frolova J., Ladygin V., Rychagov S., Zukhubaya D., 2014. Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril-Kamchatka island arc. Engineering Geology, Vol. 183, pp. 80–95.
- Koros W., O'Sullivan J., Pogacnik J., O'Sullivan M., Pender M., Bromley C., 2015. Variability of geotechnical properties of materials within Wairakei subsidence bowl, New Zealand. Proceedings of 37th New Zealand geothermal Workshop, Taupo, New Zealand, 2015, pp. 1–8.
- Lutz S.J., Zutshi A., Robertson-Tait A., Drakos P., Zemach E., 2011. Lithologies, hydrothermal alteration, and rock mechanical properties in wells 15–12 and BCH-3, Bradys hot springs geothermal field, Nevada. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 35, pp. 469–476.
- Mielke Ph., Prieto A., Bignall G., Sass I., 2015. Effect of hydrothermal alteration on rock properties in the Tauhara geothermal field, New Zealand. Proceedings World geothermal Congress, Melbourne, Australia, 2015, URL: https://www.geothermalenergy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/12081.pdf (accessed: 15 February 2020).
- Navelot V., Geraud Y., Diraison M., 2016. Physical properties of fresh or hydrothermal volcanic rocks from the west coast of Basee-Terre and Terre-de-Haup (Guadeloupe archipelago). Proceedings of the European geothermal Congress, Strasbourg, France, 2016, pp. 1–10.
- Pola A., Crosta G., Fusi N., Barberini V., Norini G., 2012. Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks. Tectonophysics, Vol. 566-567, pp. 67-86.
- 24. Potro R., Hürlimann M., 2009. The decrease in the shear strength of volcanic materials with argillic hydrothermal alteration, insights from the summit region of Teide stratovolcano, Tenerife. Engineering Geology, Vol. 104(1–2), pp. 135–143.

- 25. Rigopoulos I., Tsikouras B., Pomonis P., Hatzipanagiotou K., 2010. The influence of alteration on the engineering properties of dolerites: the examples from the Pindos and Vourinos ophiolites (Northern Greece). Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 47, No. 1, pp. 69–80.
- 26. Shevko A.Ya., Gora M.P., Golikov N.A., Panin G.L, Bessonova E P., 2013. Using petrophysical properties of volcanic rocks in the interpretation of geophysical data (volcano Ebeko, Kuril Islands). Open Journal of Geology, No. 3, pp. 77–80.
- 27. Shoen R., White D.E., Hemley J.J., 1974. Argillization by descending acide at Stemboat Springs, Nevada. Clays Clay Minerals, Vol. 23, No. 1, pp. 1–23.
- Sigurdsson O., Gudmundsson A., Fridleifsson G.O., Franzson H., Gudlaugsson S.Th., Stefansson V., 2000. Database on igneous rock properties in Icelandic geothermal systems. Status and unexpected results. Proceedings World geothermal Congress, pp. 2881–2886.
- Siratovich P.A., Heap M.J., Villeneuve M.C., Cole J.W., Reuschle T., 2014. Physical property relationships of the Rotokawa andesite, a significant geothermal reservoir rock in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. Geothermal Energy, 2014, Vol. 2, article No. 10, https://doi.org/10.1186/s40517-014-0010-4.
- Wyering L.D., Villeneuve M.C., Wallis I.C., Siratovicha P.A., Kennedy B.M., Gravley D.M., Cant J.L., 2014. Mechanical and physical properties of hydrothermally altered rocks, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 288, pp. 76–93.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### ФРОЛОВА ЮЛИЯ ВЛАДИМИРОВНА

Доцент кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

#### РЫЧАГОВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

Заведующий лабораторией геотермии Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, д.г.-м.н., г. Петропавловск-Камчатский, Россия

#### ЧЕРНОВ МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

Старший научный сотрудник лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

#### СУРОВЦЕВА КСЕНИЯ ИГОРЕВНА

Учитель начальных классов школы № 1517, г. Москва, Россия

#### КУЗНЕЦОВ РУСЛАН АЛЕКСЕЕВИЧ

Ведущий инженер лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

#### БОЛЬШАКОВ ИЛЬЯ ЕВГЕНЬЕВИЧ

Магистрант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

#### **JULIA V. FROLOVA**

Associate Professor of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, Russia

#### **SERGEY N. RYCHAGOV**

Head of the Laboratory of Geothermy, Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Science, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

#### **MIKHAIL S. CHERNOV**

Senior research scientist of the Laboratory of Soil Science and Soil Improvement, Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, Russia

#### **KSENIA I. SUROVTSEVA**

Primary school teacher of the School No. 1517, Moscow, Russia

#### **RUSLAN A. KUZNETSOV**

Leading engineer of the Laboratory of Soil Science and Soil Improvement, Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

#### ILYA E. BOLSHAKOV

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



Frolova J.V., Rychagov S.N., Chernov M.S., Surovtseva K.I., Kuznetsov R.A., Bolshakov I.E., 2020 ENGINEERING GEOLOGY WORLD Vol. XV, No. 1/2020 pp. 36-51